

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт з курсу

“Молекулярна фізика”

для студентів першого курсу

фізико-технічного факультету

XAPKIB-2005

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

з курсу “Молекулярна фізика” для студентів першого курсу
фізико-технічного факультету

Упорядники: Гірка Володимир Олександрович

Гірка Ігор Олександрович

Кондратенко Анатолій Миколайович

Рекомендовано Вченою радою Інституту Високих
Технологій ХНУ.

Протокол #1 від 21 січня 2005 року.

Харків – 2005

ЗМІСТ

1. Георгій Гамов – видатний український фізик.....4
2. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса та довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря.....6
3. Визначення частки теплоємностей газу C_p/C_v та відносної вологості повітря10
4. Визначення швидкості звуку у повітрі інтерференційним методом.....15
5. Визначення коефіцієнта теплопровідності металів.....17
6. Визначення питомої теплоємності твердих тіл методом адіабатичного калориметра.....19
7. Вимірювання зміни ентропії термодинамічних систем..22
8. Визначення коефіцієнтів пружності при поздовжній та поперечній деформаціях.....25
9. Вимірювання тиску газу в вакуумній камері, що відкачується форвакуумним насосом.....32
10. Визначення питомої теплоти пароутворення води....36
11. Література.....39

Георгій Гамов – видатний український фізик

Кожен, хто чув про гіпотезу “гарячого первинного вибуху” (hot big bang), або про генетичний код ДНК (дезоксирибонуклеїнової кислоти) повинен знати, що коли 29 серпня 1968 р. в місті Боулдер (штат Колорадо, США) помер професор Георгій Гамов, який був автором цих епохальних відкриттів, науковий світ втратив одного із своїх визначних фізиків. Між тим мало хто з українців (а ще значно менше - з неукраїнців) знає, що Георгій Гамов, був гордий з того, що його мати походила з родини Лебединців, яка вела свій родовід від запорізьких козаків. Сам Гамов любив жартувати, що Гамови з Лебединцями зустрілися вперше не в особах його батька й матері, а в особах його двох пра - прадідів, коли царський офіцер Гамов та запорізький осавул Лебединець схрестили свої шаблі в бою за Запорізьку Січ.

Георгій Антонович Гамов народився 4 березня 1904 року в м. Одеса, де його дід, Митрополит, Арсеній Лебединцев (це змосковщиний варіант прізвища Лебединець) був настоятелем кафедрального храму й правлячим ієрархом православної церкви “Новоросії”. Гамов провів своє дитинство в Одесі, де він пережив Першу світову війну і де розпочав свої перші університетські студії, які він закінчив 1926р. вже в Ленінграді. Там він відразу вибився в передові лави фізиків і став одним з так званих “трьох мушкетерів” (Лев Ландау з Баку, Дмитро Іваненко з Полтави та Георгій Гамов з Одеси), які скоро вийшли на арену світової теоретичної фізики.

В цей час Радянський Союз ще не закрити свого залізного заслону й талановиті науковці мали змогу виїздити “у відрядження” до закордонних наукових установ. Так Гамову пощастило працювати у 1928-1931 у таких відомих наукових центрах, як Геттінген, Копенгаген, Кембридж. Всесвітнього визнання отримав Гамов вперше у 1928р., коли на підставі нової тоді квантової механіки він вивів теорію проникнення альфа частинок крізь ядерний потенціальний бар’єр. Він не лише якісно описав, але й кількісно з’ясував особливості явища радіоактивного альфа-розпаду.

Коли у 1931р. Гамов повернувся до Ленінграду, справи в Радянському Союзі стали набагато гіршими і він докладав зусилля, щоб знову виїхати “у відрядження” за кордон, але вже з притаєним наміром більше не вертатись в СРСР. Та хоча Гамов отримав офіційні запрошення з Риму і Мічигану, візи на виїзд йому не дали. На додаток ситуація ускладнилася, бо Гамов одружився і без дружини не думав залишати Союзу. Тоді вони з дружиною розробили одчайдушний план втечі з Союзу до Туреччини – перепливши Чорне море каяком! Всупереч всіляким труднощам

вони цей план таки провели в життя, скориставшись з родинного відпочинку в Криму. Але підчас плавання їх захопила буря, і їх ледве живих викинуло море знов на кримське узбережжя. Їм співчували за важку пригоду і ніхто не здогадувався, яка була справжня мета їхньої прогулянки каяком у відкрите море...

На початку 1933 року Гамов отримав запрошення взяти участь у міжнародному “Солвей” – конгресі, що був призначений на осінь 1933р в місті Брюсселі (Бельгія). Неочікувано Гамов отримав візу на виїзд. Але він відмовився їхати, обумовлюючи свою згоду тим, щоб і його дружині дали візу. За свою “нахабність” Гамов очікував арешту, аж ось він отримав візу й для неї. Лише згодом у Франції Гамов довідався, що на домагання відомого французького фізика Пола Ланжевена, члена французької Комуністичної партії, Радянський Уряд оголосив Гамова своїм офіційним делегатом на цей престижний конгрес.

Після Солвейського Конгресу Гамов переїхав до Америки, де працював у кількох університетах, зокрема, у Вашингтонському та Колорадському.

Зацікавлення Гамова охоплювали повний діапазон фізичного світу. Окрім свого великого успіху у з'ясуванні характеристик процесу альфа-розпаду, Гамов зробив ще один визначний внесок у фізику ядерного мікрокосмосу: у співпраці з Едвардом Теллером (автор американської водневої бомби) він удосконалив теорію Фермі про бета-розпад. Та мабуть найбільш відомим є Гамов через свої праці з космічної тематики. Він поєднав фізику ядерного мікрокосмосу з космологічною гіпотезою Жоржа Ляметра про первинний вибух і розробив всеохоплюючу теорію еволюції всесвіту, відому тепер як “hot big bang”. Він зробив значний внесок у теорію утворення хімічних елементів у поєднанні з теорією розвитку зірок.

Коли 1954р. Джеймс Ватсон і Франсіс Крік відкрили структуру ДНК, основного складника генетичної субстанції, Гамов був першим, що висунув обґрунтовану теорію про те, що ця структура заключає в собі генетичний код, через який життя на Землі себе відтворює. В основних своїх рисах ця теорія є і сьогодні загально прийнятою.

Професор Гамов був прекрасним популяризатором науки і дуже дотепною людиною. За його великі заслуги в популяризації науки, ЮНЕСКО призначило Георгію Гамову свою премію за 1956 рік.

(за матеріалами публікації
професора фізики
Олекси Біланюка, США

в журналі “Всесвіт”)

**Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини
методом Стокса та довжини вільного пробігу й ефективного
діаметра молекул повітря**

1. Вступ

Питання, які експериментально досліджуються в даній роботі, вивчає молекулярно-кінетична теорія. Ця теорія дозволяє зв'язати макроскопічні параметри газового середовища (наприклад, тиск, температуру, об'єм) із його мікроскопічними параметрами (розміри та маса молекул, їх швидкість, середня довжина вільного пробігу). Іншою сферою застосування молекулярно-кінетичної теорії є опис явищ переносу, що виникають в термодинамічних системах, де існує перепад певного макропараметра.

Метою даної роботи є визначення довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря шляхом вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя та визначення коефіцієнта внутрішнього тертя через вимірювання швидкості руху середовища. Якщо певна частина газу або рідини знаходиться в стані руху під дією зовнішньої сили, яка підтримує цей рух, тоді при невеликих швидкостях течії у цьому середовищі утворюється режим його шарованого (ламінарного) протікання. На поверхні розподілу двох прошарків середовища, що рухаються із швидкостями V та $V + dV$, діють однакові за величиною сили f , одна з них є гальмуюча, а друга - така, що прискорює рух прошарку. Це є прояв такої властивості рідини, яке називають внутрішнім тертям (грузькістю). Унаслідок внутрішнього тертя, імпульс більш швидкої течії переноситися до прошарку з меншим імпульсом та в протилежному напрямку, відповідно. Таким чином, через наявність внутрішнього тертя в середовищі, прошарки якого рухаються з різними швидкостями, створюється потік імпульсу.

2. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини.

Перша частина роботи присвячена визначенню коефіцієнта внутрішнього тертя рідини, оскільки для газів це явище є менш промовистим. Сила взаємодії прошарків рідини з різними швидкостями визначається наступною формулою:

$$f = -\eta S dV / dx, \quad (1)$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя, S - поверхня взаємодії шарів рідини, dV / dx - перепад швидкості в поперечному напрямку.

У даній роботі явище внутрішнього тертя вивчається на прикладі руху маленької кульки в досліджуваній рідині. На кульку,

що падає в рідині під дією сили тяжіння, насправді діють ще сила Архімеда, що виштовхує кульку, занурену в дану рідину, та сила опору. Якщо кулька повільно падає в безмежному середовищі, не залишаючи за собою вихорів, тоді, як показав ще Стокс, сила опору дорівнює

$$f = 6\pi\eta rV, \quad (2)$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя, V - швидкість кульки, r - радіус кульки. Рівняння руху кульки в рідині має такий вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} = mg - m_1g - 6\pi\eta rV. \quad (3)$$

Оскільки сила опору при збільшенні величини швидкості руху кульки зростає, тому потрапивши до рідини майже з нульовою швидкістю, кулька спочатку рухається з додатнім прискоренням, але нарешті, коли величина останнього доданку стане достатньо великою, настане момент, коли кулька почне рухатися рівномірно із швидкістю V_0 . Це відбудеться за умови рівності нулю рівнодійної сили, тому для цієї умови маємо:

$$4\pi r^3(\rho - \rho_1)g/3 - 6\pi\eta rV_0 = 0, \quad (4)$$

де ρ - густина металу, з якого виготовлено кульку, ρ_1 - густина рідини, у якій відбувається рух, g - прискорення сили тяжіння.

З рівняння (4), якщо від радіуса кульки перейти до d - діаметра кульки, можна здобути наступний вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя η :

$$\eta = (\rho - \rho_1)gd^2/18V_0. \quad (5)$$

Оскільки в даній роботі кулька падає вздовж осі довгої циліндричної посудини з діаметром D , то врахування наявності стінки призводить до певної модифікації виразу (5):

$$\eta = (\rho - \rho_1)gd^2/[18V_0(1 + 2.4d/D)]. \quad (6)$$

Усі величини, що входять до (6), визначаються або експериментально, або є табличними даними.

3. Опис лабораторного устаткування для визначення коефіцієнта

внутрішнього тертя рідини

Лабораторне устаткування складається з: скляного циліндра, що наповнено досліджуваною рідиною, металевих кульок, діаметри яких попередньо вимірюють за допомогою мікроскопу, секундоміра, призначеного для вимірювання часу руху кульки. На скляному циліндрі нанесено горизонтальні мітки для вимірювання довжини пройденого шляху.

4. Хід роботи з визначення η певної рідини

1. Визначити ціну поділки мікроскопа, роздивляючись через окуляр будь-який предмет з нанесеними на ньому еталонними

поділками довжини.

2. Виміряти діаметр кульки. Кульку кладуть на предметне скло, потім разом з ним ставлять на столик мікроскопа.
3. Занурити кульку в досліджувану рідину без початкової швидкості. Виміряти секундоміром час τ рівномірного руху кульки між мітками (у середній частині циліндра). При вимірюванні довжини шляху рівномірного руху на мітки циліндра слід дивитись під прямим кутом так, щоб уникнути помилки через паралакс.
4. Вимірявши відстань між мітками, визначити швидкість рівномірного руху. Дослід повторити для різних кульок 10-12 разів.
5. Обчислити за формулою (6) коефіцієнт η для кожної кульки, знайти його середнє значення при фіксованому значенні температури.
6. Обчислити абсолютну похибку визначення η .
7. Результати дослідів занести до таблиці.

дослід #	діаметр , м	довжина шляху ,м	час τ , с	швидкість v , м/с	η
----------	-------------	------------------	----------------	---------------------	--------

5. Визначення довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря

Визначивши коефіцієнт внутрішнього тертя η певного середовища, можна знайти величину мікропараметрів, які впливають на величину η . У другій частині цієї роботи визначаються довжина вільного пробігу та ефективний діаметр молекул повітря. Для цього вимірюють коефіцієнт внутрішнього тертя, скориставшись методом дослідження витікання газу через капілярну трубку. Об'єм газу V , що протікає через трубку з круглим внутрішнім перерізом за час τ , визначається формулою Пуазейля:

$$V = \pi r^4 \tau \Delta p / 8 \eta L \quad (7)$$

де r - радіус капіляру, L - довжина капіляру, Δp - різниця тиску на кінцях капіляру, який обумовлено течією газу.

Рівняння (7) записано для течії через труби великого діаметру, у випадку течії крізь капіляр коефіцієнт внутрішнього тертя виражається наступним співвідношенням:

$$\eta = \pi \tau \Delta p [R^4 - r^4 - (R^2 - r^2)^2 (\ln R / r)^{-1}] / (8VL), \quad (8)$$

у якому усі величини можна безпосередньо виміряти. Через це, ним можна скористатися для експериментального визначення грузькості газу.

З іншого боку, молекулярно-кінетична теорія газів дозволяє встановити зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя ідеальних газів η та середньої довжини вільного пробігу молекули газу λ , середньої арифметичної швидкості V_T їхнього руху у вигляді:

$$\eta = \lambda \rho V_T / 3, \quad (9)$$

де ρ - це густина газу. Більш точно виведення співвідношення (9), яке враховує розподіл швидкостей молекул за законом Максвелла, дає дещо інше значення коефіцієнта пропорційності у формулі (9). Так для повітря співвідношення (9) приймає вигляд:

$$\eta = \lambda \rho V_T / 2. \quad (10)$$

Замінивши в цьому рівнянні V_T за допомогою відомих з молекулярно-кінетичної теорії газів співвідношень, здобудемо наступну формулу для визначення середньої довжини вільного пробігу частинок повітря:

$$\lambda = \frac{2\eta}{\lambda V_T} = \frac{\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi \mu}{2RT}}, \quad (11)$$

де T абсолютна температура, R універсальна газова стала, $\mu = 29$ г/моль – ефективна величина молекулярної маси частинки повітря.

У свою чергу середня довжина вільного пробігу λ та ефективний діаметр молекули повітря σ зв'язані співвідношенням:

$$\lambda = 1/(\sqrt{2} \pi n \sigma^2), \quad (12)$$

де n концентрація молекул газу. З формули (12) можна визначити ефективний діаметр молекул повітря для певної температури, якщо відомі λ та n . Число молекул в одиниці об'єму визначається з рівняння:

$$n = n_0 p T_0 / (p_0 T), \quad (13)$$

де n_0 - концентрація молекул в одиниці об'єму за нормальних умов (P_0, T_0). Воно називається числом Лошмідта. З рівнянь (13) та (12) ефективний діаметр молекул повітря визначається формулою:

$$\sigma = \sqrt{p_0 T (\sqrt{2} \pi \lambda n_0 p T_0)^{-1}}. \quad (14)$$

6. Опис лабораторного устаткування для визначення довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря

При виконанні другої частини даної лабораторної роботи скористаємося посудиною, яка має кран у своїй нижній частині. Серед приналежностей також є дві мензурки, секундомір та термометр. Посуд наповнено водою так, що рівень води не виходить за межі шкали, що прикріплена до стінки посуду. Крізь пробку в посуд проходить капіляр, радіус та довжина якого вказано на приладі. Капіляр не торкається поверхні води. Кран має отвір з значно більшим перерізом, ніж капіляр. При закритому крані тиск повітря над рідиною всередині посуду дорівнює атмосферному, бо посуд з'єднано з атмосферою через капіляр.

Коли кран відкривається, то починається витікання рідини у вигляді струмочка. Цей процес відбувається внаслідок дії гідростатичного тиску. Такий режим витікання буде тривати, доки

сумарний тиск газу та рідини всередині посуду на рівні отвору не стане дорівнювати атмосферному тискові:

$$p_1 + \rho g h_1 = p_{atm}, \quad (15)$$

де p_1 - тиск газу в посуді, h_1 - висота стовпа рідини в даний момент часу від рівня крана до рівня води, ρ - густина рідини, g - прискорення сили тяжіння.

При цьому на кінцях капіляру утвориться різниця тиску:

$$\Delta p = p_{atm} - p_1 = \rho g h_1. \quad (16)$$

Вона буде причиною того, що почнеться процес надходження повітря крізь капіляр у посуд, у результаті чого рідина буде витікати краплями крізь повністю відкритий кран. Різниця тиску на кінцях капіляру, яка спочатку дорівнювала $\rho g h_1$, з часом буде змінюватися, оскільки зменшуватиметься висота стовпа рідини над краном. Зміна висоти стовпа рідини буде незначною, бо площа перерізу посуду є великою, а об'єм рідини, що витікає з крана, є порівняно малим. Тому і зміна тиску Δp буде малою величиною. Скориставшись цим, у формулі (7) у якості Δp можна взяти середнє значення різниці тиску на кінцях капіляру на початку та в кінці досліду, і таким чином:

$$\Delta p = (h_1 + h_2) \rho g / 2. \quad (17)$$

Об'єм газу V , що протік через капіляр, буде дорівнює об'ємові рідини, що витікла крізь нижній кран до мензурки.

7. Хід роботи з визначення довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря

1. Визначити рівень h_1 води в посуді, підставити велику мензурку під кран, що в нижній частині посуду.
2. Відкрити кран, зачекати, доки вода почне випливати краплями, підставити нову мензурку, одночасно включивши секундомір.
3. Зупинити секундомір, коли в мензурці буде 50 см^3 води, закрити кран. Відзначити новий рівень води в посуді h_2 . Записати значення h_2 та показання секундоміра τ .
4. За формулою (17) обчислити Δp , знайти у довіднику густину води ρ .
5. За формулою (8) обчислити коефіцієнт внутрішнього тертя η води.
6. Виміряти кімнатну температуру T та атмосферний тиск p_{atm} . По формулі (12) обчислити λ .
7. Визначити число молекул в одиниці об'єму газу за формулою (13).
8. Обчислити σ за формулою (14).
9. Обчислити відносні похибки отриманих результатів.

Контрольні питання

1. Які явища носять спільну назву явищ переносу?
2. Порівняти залежності коефіцієнтів внутрішнього тертя в газах та рідинах від температури, пояснити природу внутрішнього тертя в цих середовищах.
3. Що та в якому напрямку переноситься внаслідок внутрішнього тертя?
4. Який загальний вигляд мають рівняння переносу у феноменологічному підході?
5. Що таке λ , σ та η , в яких одиницях вони вимірюються?
6. Якою є залежність параметрів λ , σ та η від температури для газів?
7. Що та в якому напрямку переноситься в процесі дифузії?

Лабораторна робота №2

Визначення частки теплоємностей газу C_p/C_v та відносної вологості повітря

1. Вступ

Дана робота складається з двох частин, кожна з яких виконується на своєму окремому обладнанні, і при виконанні кожної частини роботи ставиться своя окрема мета.

1.1. Метою першої частини роботи є експериментальне визначення частки теплоємності газу при сталому тиску C_p до теплоємності газу при сталому об'ємі газу C_v . Частка $C_p/C_v = \gamma$ є показником ступеня в рівнянні Пуассона, яке описує адіабатичний процес, вона грає також важливу роль і в описанні реальних технічних процесів, що є близькими до адіабатичного. Для приклада вкажемо, що нею, зокрема, визначається швидкість поширення звуків у газах, від неї залежить плин газів по трубах зі звуковими швидкостями і таке інше.

Описаний нижче спосіб визначення частки питомих теплоємностей газу був запропонований Дезормом і Клеманом. Суть методу полягає в наступному. У скляному балоні, який з'єднано з манометром, знаходиться певний обсяг газу (повітря). Визначимо це, як перший стан термодинамічної системи (повітря в балоні). Якщо до балону швидко, за допомогою гумової груші, нагнітати повітря, то повітря в ньому до певної міри нагріється. Це буде другий стан нашої термодинамічної системи.

Внаслідок теплообміну між повітрям в балоні та навколишнім

середовищем через якийсь час їх температури зрівняється з кімнатною температурою T_1 . В міру охолодження газу в балоні до кімнатної температури тиск його трохи зменшиться, але залишиться все-таки більше атмосферного. Позначимо цей стан повітря в балоні, як третій. Нехай у цьому, третьому, стані повітря характеризується наступними параметрами: $V_1, T_1, P_1 = P_0 + h_1$, де P_0 - атмосферний тиск, h_1 додатковий тиск, що створився через швидке нагнітання повітря до балону, яке вимірюється різницею рівнів робочої рідини (гасу) у манометрі, T_1 - кімнатна температура.

Якщо тепер змусити повітря в балоні швидко розширитися, відкривши кран балону, та одразу ж його закрити, тоді внаслідок розширення повітря охолоне і тиск упаде до атмосферного. Цей процес розширення можна вважати адіабатичним. В кінці його стан газу (назвемо його четвертим) визначається параметрами V_2, T_2, P_0 , при цьому $T_2 < T_1$.

Потім через теплообмін між повітрям в балоні та оточуючим середовищем почнеться нагрівання повітря в балоні до кімнатної температури T_1 . При цьому тиск його стане вищим за атмосферний тиск $P_2 = P_0 + h_2$, де h_2 - додатковий тиск повітря в балоні, що вимірюється через різницю рівнів гасу у манометрі. Назвемо це стан повітря у балоні, як п'ятий. В цьому стані повітря характеризується параметрами: V_2, T_1, P_2 .

Перехід з третього до четвертого стану буде описуватися рівнянням Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{Const}, \quad (1)$$

де $\gamma = C_p / C_v$. Для нашого випадку маємо:

$$p_1 / p_2 = (V_2 / V_1)^\gamma. \quad (2)$$

Перехід з п'ятого стану в третє відбувається ізотермічно, тобто описується законом Бойля - Маріотта:

$$PV = \text{Const}. \quad (3)$$

Для нашого випадку можна записати:

$$P_1 / P_2 = V_2 / V_1. \quad (4)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (4) та (2), одержимо наступний вираз для коефіцієнта Пуассона γ :

$$\gamma = \ln((p_0 + h_1) / p_0) / \ln((p_0 + h_1) / (p_0 + h_2)). \quad (5)$$

Формулу (5) зручно переписати, використовуючи малість часток h_1 / p_0 та h_2 / p_0 , у такому вигляді:

$$\gamma = h_1 / (h_1 - h_2). \quad (6)$$

1.2. Друга частина роботи присвячена визначенню вологості повітря. Як відомо, атмосферне повітря містить деяку кількість водяної пари. Кількість цієї пари може змінюватися як за абсолютною величиною, так і за ступенем насичення, що

характеризується абсолютною і відносною вологістю. Саме визначення цих величин для повітря, яке заповнює лабораторне приміщення, і становить другу мету даної лабораторної роботи.

Абсолютна вологість - це кількість водяної пари, що знаходиться в одному кубічному метрі повітря, яку виражено в грамах. Маса 1 м^3 сухого повітря при 0° С та при тиску 760 мм рт. ст. дорівнює 1293 г. На підставі рівняння Клапейрона маса 1 м^3 повітря при температурі $t \text{ }^\circ\text{С}$ та при тиску P мм рт. ст. буде дорівнювати (в грамах):

$$M = \frac{1293p}{760(1+\alpha t)} = \frac{1.701p}{1+\alpha t}, \quad (7)$$

де $\alpha=1/273$ це коефіцієнт розширення повітря.

Застосовуючи до водяної пари рівняння Клапейрона (це справедливо тільки для пари, яка знаходиться у станах, що є далекими від стану насичення), одержимо для маси 1 м^3 водяної пари рівняння (7). Використовуючи вираз (7), можна визначити абсолютну вологість повітря, якщо відомим є парціальний тиск водяної пари. З формули (7) видно, що при малих значеннях t величина абсолютної вологості M чисельно мало відрізняється від величини пружності водяної пари, якщо виражати її у міліметрах ртутного стовпа.

Відносна вологість визначається в наступний спосіб:

$$\mu = p / P_{нас} 100\%, \quad (8)$$

де $P_{нас}$ це тиск пари, що насичує повітряний простір при даній температурі t . Таким чином, відносна вологість характеризує ступінь насичення повітря водяною парою. Визначення вологості повітря робиться, за звичай, з використанням табличних даних або шляхом визначення точки роси психрометричним методом.

2. Хід роботи з визначення частки C_p / C_V

Лабораторне обладнання: Прилад Клемана і Дезорма з гасовим манометром і триходовим краном; гумова груша.

1. Повернути кран балону так, щоб балон був з'єднаний з гумовою грушею і зробити нагнітання повітря до тиску, що відповідає різниці рівнів h рідини в манометрі приблизно 10-15 поділок.

Увага! Нагнітати повітря потрібно обережно, щоб гас не піднявся в пастку. У протилежному випадку, повітря слід випустити, і дослід повторити з початку.

2. Закрити кран, повернувши його на 90° . Почекати, доки температура повітря в балоні досягне температури навколишнього середовища. Вимірити різницю рівнів, що встановлюється при цьому, h_1 .

3. Швидко повернути кран балону, повернувши його ще на 90° для під'єднання балону до атмосфери. Тримати кран відкритим необхідно короткий проміжок часу: доти, поки рівні рідини в обох колінах манометра зрівнюються. У момент відкриття крану повітря швидко розширюється, тиск його в балоні стає рівним атмосферному, (при відкритті крана через різку зміну тиску повітря в балоні можливе коливання рідини, але воно не впливає на наслідки досліду).
4. Почекати поки повітря в балоні, що охолонуло при адіабатичному розширенні, знову нагріється до кімнатної температури. Вимірити показання манометра h_2 .
5. Досвід повторити 8-10 разів і обчислити коефіцієнт Пуассона. Знайти середнє значення γ .
6. Усі дані занести до таблиці:

№ досліду	h_1	h_2	γ	$\Delta\gamma$	$\gamma = \gamma_c \pm \Delta\gamma$
Середнє значення					

7. Визначити абсолютну похибку для γ .

3. Метод психрометра для визначення вологості повітря

Лабораторне обладнання: стандартний аспіраційний психрометр.

Метод психрометра є найчастіше вживаним методом вимірювання вологості повітря. Сутність його полягає в наступному: нехай два однакових термометри знаходяться в однакових потоках повітря. Показання термометрів, природно, повинні бути однаковими. Але якщо ж балончик одного з термометрів буде увесь час змочений, наприклад, буде загорнутий у мокрий батист, тоді показання термометрів виявляться різними.

Завдяки випаровуванню води з батисту, так званий «мокрый» термометр показує температуру нижчу, ніж сухий термометр. Чим менше вологість навколишнього повітря, тим інтенсивніше буде випаровування і тем нижчими будуть показання мокрого термометра. Відлік значень по двох термометрах дасть різницю температур, що буде характеризувати вологість повітря. При сталому режимі випаровування, коли температура мокрого термометра вже стабілізувалася, приплив тепла Q_1 ззовні дорівнює витраті тепла Q_2 на випаровування води з поверхні термометра. Експериментальним шляхом встановлено, що за одиницю часу надходження тепла дорівнює:

$$Q_1 = \beta (t - t_1) S_1, \quad (9)$$

де $t - t_1$ найбільша різниця температур, S_1 - поверхня балончика

мокрого термометра, β коефіцієнт пропорційності. За законом Дальтона маса рідини при випаровуванні в одиницю часу визначається виразом:

$$m = \varepsilon S_2(p_{нас} - p)/H, \quad (10)$$

де m - маса води, що випарувалася, S_2 - площа поверхні, що випаровує воду, H - тиск повітря в цьому процесі, $p_{нас}$ - тиск водяної пари, що насичується при температурі рідини, яка випаровується, тобто температурі t , тиск водяної пари, що знаходиться в повітрі, позначено літерою p , ε - коефіцієнт пропорційності, залежний від швидкості потоку повітря.

Кількість тепла Q_2 , що потрібна для випаровування маси води m може бути записана у вигляді:

$$Q_2 = C_v S_2(p_{нас} - p)/H, \quad (11)$$

де C_v - питома теплота випаровування води. За умов $Q_1 = Q_2$, $S_1 = S_2$ одержуємо рівняння:

$$\beta(t - t_1) = C_v(p_{нас} - p)/H \quad (12)$$

звідкіля знайдемо пружність водяної пари, яка в даний момент знаходиться у повітрі:

$$p = p_{нас} - A(t - t_1)H, \quad (13)$$

де A – константа приладу, величина якої визначається, в основному, швидкістю потоку повітря і знаходиться експериментально.

4. Опис приладу та вимірювання відносної вологості повітря

Для визначення відносної вологості повітря в лабораторії застосовується стандартний аспіраційний психрометр. Він складається з двох однакових спеціальних термометрів. Балончик одного з них замотано клаптиком батисту, що змочується перед дослідом водою. Прилад має електричний гвинтилятор для прискорення процесу вимірювання. Для усунення нагрівання приладу його металеві частини нікельовано. Варто звертати увагу на те, щоб при змочуванні вода не потрапила на інший термометр або на внутрішню поверхню його екранної трубки. Включають гвинтилятор і стежать за показанням термометра. Коли показання стануть сталими (через 4-5 хв.), їх записують. При відліку показань термометрів варто відрахувати десяті частини градусів і записати їх, а тільки після цього їх цілі значення.

Абсолютна вологість по стандартному аспіраційному психрометрі визначається формулою

$$p = p_{нас} - 0,000662(t - t_1)H. \quad (14)$$

Величину $p_{нас}$ беруть з таблиці. Барометричний тиск визначають лабораторним барометром. Якщо з таблиці узяти величину тиску пари, що насичується, при температурі навколишнього повітря, то легко визначити за формулою (8) відносну вологість. Зручніше,

однак, скористатися спеціальними номограмами у вигляді кривих, за допомогою яких, знаючи температуру t і t_1 , відразу шляхом простого відліку визначається величина відносної вологості.

Завдання:

1. Визначити за допомогою психрометра відносну вологість повітря в лабораторії.
2. Порівняти цей експериментальний результат з даними лабораторного приладу, що визначає відносну вологість через зміну коефіцієнта пружності спеціального матеріалу внаслідок змін вологості повітря.

Контрольні питання

1. Яким рівнянням описується процес нагнітання повітря до балону? Побудуйте графік цього процесу в координатах T, S .
2. Накреслити на графіку P, V усі наявні в роботі процеси (послідовно).
3. У чому причина розходження значень теплоємностей C_p та C_v для ідеального газу?
4. Що таке точка роси, абсолютна і відносна вологість?
5. Як зміниться відносна вологість при зміні температури?
6. Що таке пара, яка насичується, та від чого залежить її тиск?
7. Намалюйте графіки ізотермічного, ізохоричного та ізобаричного процесів на діаграмі P, T .

Лабораторна робота №3

Визначення швидкості звуку у повітрі інтерференційним методом

1. Вступ

Інтерференція, що виникає при визначенні даним методом швидкості звуку внаслідок взаємодії двох звукових монохроматичних хвиль зі сталими частотами, призводить до періодичної зміни величини тиску повітря вздовж об'єму трубки, в якій ці хвилі поширюються. Інтерференційну картину можна було б зафіксувати рухомими датчиками, але це технічно важко зробити. Значно простіше зробити нерухомий датчик, а натомість змінювати шлях, який проходять хвилі від їх джерела до місця їх детектування. Як відомо з теорії інтерференції: результат взаємодії двох хвиль (тобто збільшення або зменшення амплітуди результуючої хвилі) залежить від різниці фаз, з якими хвилі приходять до точки їх взаємодії. Тому в даній роботі змінюється

пройдений шлях однієї хвилі. Вимірюючи відстань між двома сусідніми максимумами (або мінімумами) результуючої хвилі за допомогою нерухомого датчика, можна зробити висновок про довжину взаємодіючих хвиль. Таким чином, експериментальний метод, що використано у даній роботі, для визначення швидкості звуку V базується на вимірюванні його частоти ν та довжини хвилі λ , які зв'язано формулою:

$$V = \lambda \nu. \quad (1)$$

В описаному досліді довжина хвилі λ визначається за наслідком взаємодії (інтерференції) двох звукових хвиль. Різниця ходу S між ними (від місця їх утворення до місця їх взаємодії та детектування), при якій спостерігається найменша (чи найбільша) інтенсивність звуку, як відомо з теорії інтерференції, пов'язана з довжиною взаємодіючих хвиль співвідношенням:

$$S = 2N \cdot (\lambda / 2), \quad (2)$$

де N - натуральне число. Ця різниця ходу визначається у досліді за допомогою приладу Квінке, опис якого подано нижче. Частота ν задається електричним генератором в діапазоні звукових частот (20 ÷ 20000 Гц).

Поширення звуку в повітрі, як свідчать експериментальні дані, досить точно описується адіабатичним процесом. Швидкість звуку при цьому приблизно дорівнює:

$$V = \sqrt{\gamma p / \rho}, \quad (3)$$

де γ - коефіцієнт Пуассона, ρ та p - густина та тиск повітря, відповідно.

Експериментально було здобуто формулу, що зв'язує величину швидкості звуку в повітрі, яку заміряно при якомусь значенні температури T_1 середовища (в градусах Цельсія), до величини швидкості при нормальному значенні температури (0°C). Вона має вигляд:

$$V(T = 0^\circ\text{C}) = V(T_1) / \sqrt{1 + 0,004T_1}. \quad (4)$$

2. Опис лабораторного обладнання

До виходу звукового генератора, що задає частоту електричних коливань, підключено звичайний радіонавушник, що перетворює ці електричні коливання в звукову хвилю. Навушник і прикріплена до нього порцелянова трубка знаходяться в скриньці, яку виготовлено з фанери і заповнено ватою. У кришці скрині над трубкою зроблено отвір, який закривається дерев'яною пробкою, що закінчує оливкою. На оливку надівається гумова трубка, по якій звукова хвиля йде від навушника до приладу Квінке.

Прилад Квінке складається з двох U – подібних латунних трубок, покритих зверху шаром нікелю. Одна з трубок може

частково висуватися з нерухомо закріпленої трубки. Переміщення цієї рухомої трубки здійснюється за допомогою стрижня з гвинтовою нарізкою і рукоятки. Разом із рухомою трубкою переміщується уздовж шкали, яку закріплено на підставці, і показчик.

Звукова хвиля надходить у прилад Квінке через патрубок з надітою на нього гумовою трубкою, що з'єднує прилад із джерелом звуку. У цьому місці звукова хвиля розділяється на дві хвилі, що рухаються по різних колінах назустріч одна одній. Проти цього першого патрубку знаходиться другий патрубок, до якого приєднано другий навушник, зв'язаний безпосередньо з осцилографом. Відлік розмаху (амплітуди) звукової хвилі ведеться безпосередньо по шкалі на екрані осцилографа.

Вважаючи, що $V \approx 340$ м/с, $\Delta v = 0.02v$, а абсолютна похибка при вимірюванні різниці ходу становить 1 мм, можна легко встановити, що мінімальне значення $\Delta V/V$ здобувається при частотах близьких до 1700 Гц. Відповідно найменше значення $\Delta V/V$ складає близько п'яти відсотків. У процесі вимірювання різниця ходу повинна пройти значення $3\lambda/2$, тобто показчик має переміститися на відстань $3\lambda/4$, яке задає найменшу довжину застосованої шкали. Значить, довжина шкали повинна бути не менше, ніж $3\lambda/4 = 3v/4V = 15$ см.

3. Хід роботи

1. Показчик приладу Квінке установити на нуль шкали. Включити звуковий генератор, якому слід дати 20 хвилин на прогрівання, потім задати певну частоту V та амплітуду вихідного сигналу.

2. Обертанням рукоятки рухома трубка поступово виводиться з нерухомої трубки доти. При цьому з кроком 1 см виконується вимірювання розмаху результуючого сигналу та відлік n_1 по шкалі. Для точки максимуму сигналу, що реєструється осцилографом різниця ходу становить:

$$S_1 = \lambda. \quad (5)$$

3. Зсув трубки продовжується до свого наступного максимального значення. При виявленні другого максимуму по шкалі визначається n_2 . Відповідна різниця ходу:

$$S_2 = 2\lambda. \quad (6)$$

Оскільки зсув показчика відбувся на $(n_2 - n_1)$, з рівнянь (5) та (6) одержуємо:

$$\lambda = 2(n_2 - n_1) \quad (7)$$

4. За формулою (1) визначити швидкість звуку при кімнатній температурі, яка вимірюється по настінному термометрі. За формулою (4) визначити швидкість звуку в повітрі при 0°C .
5. Побудувати графік залежності квадрата розмаху (амплітуди) результуючих звукових коливань від різниці ходу взаємодіючих хвиль, з графіка визначити довжину звукової хвилі.
6. Обчислити відносну похибку визначення швидкості звуку, знайти її величину при нормальній температурі.

Контрольні питання

1. Пояснити залежність швидкості звуку від температури і від тиску газового середовища.
2. Що таке інтерференція?
3. Пояснити механізм утворення звукової хвилі.
4. Вивести формулу для швидкості звуку в газах та у твердому тілі.
5. Яке співвідношення між швидкостями звуку та руху молекул середовища, в якому поширюється звукова хвиля?
6. Що таке довжина звукової хвилі? Як вона зв'язана зі швидкістю поширення звуку?
7. Що таке частота звукової хвилі?

Лабораторна робота №4

Визначення коефіцієнта теплопровідності металів

1. Вступ

Метод визначення коефіцієнта теплопровідності металів, застосований у цій роботі, базується на вимірюванні кількості тепла Q , яке проходить за одиницю часу через поперечний переріз S металевого зразка. Як відомо з теорії теплопровідності:

$$Q = -\kappa S \nabla T, \quad (1)$$

де κ - коефіцієнт теплопровідності, $\nabla T = \text{grad}(T)$ – градієнт температури металевого зразка в напрямку, перпендикулярному до площі перерізу.

Незмінність градієнта температури забезпечується нагріванням лівого краю зразка в електричній печі з сталою температурою та одночасним охолодженням його правого краю проточною водою, що також має постійну температуру T_1 . Кількість тепла Q , що проходить через зразок і передається воді за одиницю часу, дорівнює:

$$Q = Cm(T_2 - T_1), \quad (2)$$

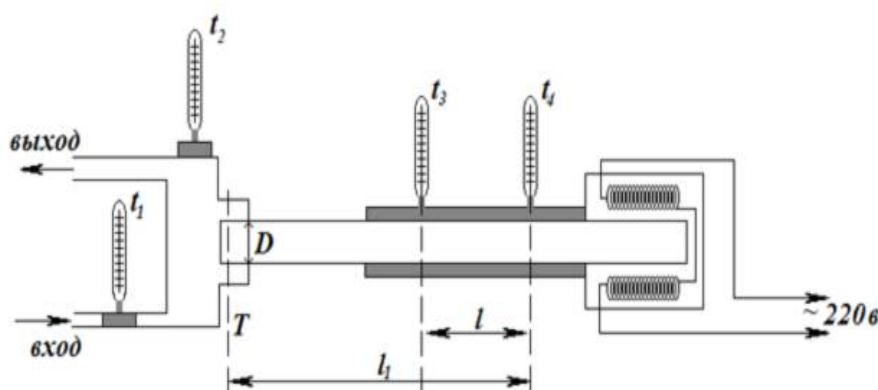
де m - маса води, що протікає за одиницю часу в системі, C – питома теплоємність води, T_2 - температура, до якої нагрівається вода, що проходить повз охолоджуваний кінець металевого зразка.

Нехтуючи втратами тепла через бокову поверхню металевого зразка, яку обгорнено у теплоізоляційний матеріал, та прирівнюючи один до одного праві частини формул (1) і (2), одержуємо наступний вираз для коефіцієнта теплопровідності:

$$\kappa = Cm(T_2 - T_1)/(S|\nabla T|). \quad (3)$$

2. Опис лабораторної установки

Досліджуваний зразок являє собою виготовлений з червоної міді циліндричний стрижень, що має діаметр перетину 26 мм. Один з торців зразка поміщено до закріпленого на штативі нагрівача (див. Мал.1). Другий його торець через пробку введено до скляного



Мал.1

холодильника. Бокова поверхня стрижня має теплоізоляційне покриття, в якому зроблено два гнізда, куди вставлено термометри. Проточна вода надходить у патрубок скляного

холодильника, охолоджує один з кінців стрижня і виходить через трубку, у якій мається гніздо для іншого термометра. Гумова трубка зв'язує холодильник з хімічним краном, що регулює витрати води. Кран встановлено над раковиною. Таким чином, вода надходить у холодильник через відросток посудини, у якому є відвід для підтримання сталого рівня води в ньому. Посудина зверху відкрита, у неї введено гумову трубку, крізь яку з водопроводу надходить вода, а також встановлено ще один термометр, призначений для вимірювання початкової температури проточної води.

3. Хід роботи

1. Записати до лабораторних зошитів довжину відстані між термометрами, що вимірюють градієнт температури металевого стрижня, а також його діаметр. Обчислити площу перетину S стрижня.
2. Увімкнути нагрівач до електромережі, почати пропускати воду через холодильник.

3. За допомогою крана установити певну сталу величину витрат води в холодильнику, що вимірюється за допомогою секундоміра і мензурки з поділками. Маса m води, що протікає за одиницю часу через холодильник, дорівнює:

$$m = V\rho / \tau, \quad (4)$$

де V - об'єм води, що виливається з холодильника за час τ , а ρ - густина води.

4. Після встановлення стаціонарного режиму теплопровідності, якому відповідає незмінність показань термометрів, проводиться вимірювання температур T_1 і T_2 (на вході та на виході з холодильника), а також температур T_3 і T_4 у гніздах вздовж досліджуваного стрижня. Дві останні величини визначають перепад температури уздовж стрижня:

$$\nabla T = (T_4 - T_3) / l, \quad (5)$$

де l - відстань між термометрами на металевому стрижні.

5. На підставі формул (1)- (5) обчислюється коефіцієнт теплопровідності металевого стрижня, який використовується в роботі:

$$\kappa = \frac{V\rho Cl(T_2 - T_1)}{S\tau(T_4 - T_3)}. \quad (6)$$

4. Обчислення похибок

Для зменшення теплових втрат між ділянками стрижня, на якій вимірюється різниця $T_4 - T_3$ і ділянкою, де тепловий потік переходить зі стрижня до води, варто помістити термометр, що вимірює температуру T_3 , якомога ближче до холодильника. Зменшення цієї відстані l також сприяє зменшенню втрат тепла на ділянці цієї довжини, але зі зменшенням l зменшується і різниця $T_4 - T_3$, чим знижується точність її вимірювання. Експерименти показали, що вибір $l \approx 10$ (см) забезпечує прийнятну величину $T_4 - T_3$. Для зменшення втрат природно використовувати стрижень великого діаметра, виготовлений з матеріалу з високою теплопровідністю. У нашому випадку $D=2,6$ (см) і $\kappa = 0,91$ кал/(см с град). Проточна вода не може нагріватися до температури охолоджуваного нею ділянки стрижня, тому $T_2 < T < T_3$. При великих витратах води в експерименті будемо мати $T \approx T_2$, а при малих витратах T наблизиться до T_3 .

Відносна похибка при визначенні коефіцієнта теплопровідності металевого стрижня за формулою (6) обчислюється в наступний спосіб:

$$\frac{\Delta \kappa}{\kappa} = \frac{\Delta(T_2 - T_1)}{T_2 - T_1} + \frac{\Delta(T_4 - T_3)}{T_4 - T_3} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta \pi}{\pi}. \quad (7)$$

Два перших доданки цієї формули в зазначених умовах складають близько 2%. При вимірюванні діаметра та довжини стрижня штангенциркулем третій та четвертий доданки дадуть внесок в похибку на рівні 1%. Якщо використовувати для вимірювання витрати води мензурку ємністю 250 (см³) з ціною поділки в 2 (см³), а така мензурка заповнюється приблизно за час $\tau=50$ (с), який вимірюється секундоміром з точністю в $\pm 0,2$ (с), то це забезпечить нам сумарну відносну похибку ще майже в 1%. Отже, $\Delta\kappa/\kappa$ складає приблизно 4 ÷ 5 %, якщо ρ і C узяті з точністю до третього знака після коми, а Π прийнято рівним 3,14.

Для більш точної оцінки похибки результату даного експерименту варто враховувати втрати тепла через бокову поверхню досліджуваного стрижня, наявність таких втрат вимагає наступного запису формули (6) :

$$\kappa = [mC(T_2 - T_1) + \delta Q] / SgradT, \quad (8)$$

де δQ - кількість тепла, що проходить в одиницю часу через теплоізоляцію бокової поверхні стрижня. З аналізу формули (8) ясно, що використання формули (3) зв'язано з відносною погрешністю

$$\frac{\delta\kappa}{\kappa} = \frac{4l\delta Q}{\kappa\pi D^2(T_4 - T_3)}. \quad (9)$$

Грубу оцінку δQ можна зробити, вважаючи основною частиною теплоізоляції сантиметровий шар азбесту ($\kappa_a = 3 \cdot 10^{-4}$ кал / (см с град)) довжиною 10 (см). При цьому температуру внутрішньої поверхні теплоізоляції природно прийняти рівною $(T_3 + T_4)/2$, а температуру зовнішньої її поверхні можна вважати приблизно рівною T_3 . Тоді на підставі відомої формули теплопровідності межу циліндричними поверхнями одержимо:

$$\delta Q = \pi l \kappa_1 \frac{T_4 - T_3}{\ln(1 + 2d/D)}, \quad (10)$$

де d - товщина теплоізоляції. Це дає похибку ще приблизно в 3%. Таким чином, в сумі відносна похибка обчислення коефіцієнта теплопровідності може становити близько 8%.

Завдання

1. Визначити запропонованим методом коефіцієнт теплопровідності κ металу, що використовується в даній роботі.
2. Визначити відносну похибку вимірювання κ .
3. Порівняти здобутий результат з табличними даними для міді.

Контрольні питання

1. Яке явище називають теплопровідністю? Що та в якому напрямку переноситься при цьому явищі?
2. Яка залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для ідеального газу?
3. У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? В яких одиницях він вимірюється?
4. Що дає внесок до коефіцієнта теплопровідності твердих тіл?
5. Порівняти значення коефіцієнтів теплопровідності металу й ідеального газу.
6. Пояснити характер залежності κ від температури.
- 7.

Лабораторна робота №5

Визначення питомої теплоємності твердих тіл методом адіабатичного калориметра

1. Вступ

Під питомою теплоємністю тіла (термодинамічної системи) слід розуміти величину:

$$C_m = \delta Q / (m dT), \quad (1)$$

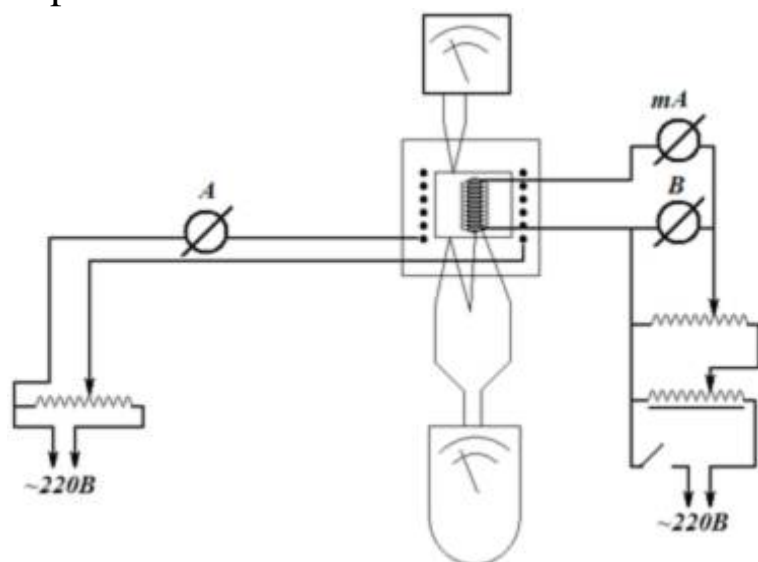
де δQ - кількість тепла, що передана тілу під час певного процесу теплопередачі; dT - зміна температури, що відбуває внаслідок передачі тілу тепла; m - маса тіла, що нагрівається. В дослідах, звичайно, визначається середня питома теплоємність якоїсь речовини C , яка чисельно дорівнює кількості тепла ΔQ , яку треба передати одиниці маси цієї речовини, щоб підняти її температуру на один градус:

$$C = \Delta Q / (m \Delta T), \quad (2)$$

де ΔT - різниця кінцевої і початкової температур досліджуваної речовини під час певного процесу теплопередачі. Зрозуміло, що ця величина залежить від способу передачі тепла для газів та рідин, але для твердих тіл різниця між результатами, здобутими при різних процесах, є неістотною.

Для дослідного визначення теплоємності твердих тіл існують різні калориметричні методи. Одним з найбільш точних методів визначення теплоємності є метод адіабатичного калориметра. Ускладнення, які зв'язані з необхідністю обліку теплових втрат, у

калориметрах цього типу усувається тим, що вимірювання виконується за умов теплової рівноваги, тобто для однакових температур досліджуваного твердотілого зразка і навколишнього середовища, що знаходиться в ізольованому блоці. До переваг цього метода поряд з високою точністю, відноситься також можливість визначення теплоємності твердих тіл у широкому температурному інтервалі, що особливо важливо в тому випадку, якщо з речовиною при нагріванні можуть відбуватися фазові перетворення. Устрій адіабатичного калориметра показано на Мал. 1. Досліджуваний зразок міститься в мідному блоці і разом з ним нагрівається в печі. Сам зразок ще додатково нагрівається нагрівачем, що введено в середину зразка. Після подачі електроенергії до електричної мережі, у якій знаходиться блок разом із зразком, температура зразка починає підвищуватися, залишаючись при цьому нижчою за температуру блоку. Щоб встановити рівність температур зразка та блоку, підключають додатковий нагрівач, в середині зразка. Коли температура зразка стане трохи вище температури блоку, цей нагрівач вимикають.



Мал. 1

Надалі підключення та вимикання відбувається періодично, так щоб різниця температур ΔT зразка і блоку весь час змінювала знак. У той момент, коли ΔT дорівнює нулеві (при підключеному внутрішньому нагрівачі), теплообмін між зразком та блоком відсутній і вся кількість тепла ΔQ , яка виділяється внутрішнім нагрівачем, витрачається тільки на нагрівання зразка. Тому в цей момент питома теплоємність може бути визначена за формулою (2). Кількість тепла, що виділяється внутрішньому нагрівачем, визначається за формулою:

$$\Delta Q = IU\Delta t \text{ (Дж)}, \quad (3)$$

де I - струм, що тече через нагрівач, U - різниця потенціалів, час нагрівання Δt . За цих умов питома теплоємність зразка визначається формулою:

$$C = \frac{IU\Delta t}{m\Delta T} = \frac{IU}{m(dT/dt)}. \quad (4)$$

Температура калориметра вимірюється термопарою. Різниця температур блоку і зразка вимірюється диференціальною термопарою. Для визначення температури калориметра використовується градувальна крива термопари, яка переводить поділки гальванометра в градуси. Різниця температур блоку і зразка визначають у поділках гальванометра (тому потрібно лише помітити той момент, коли різниця температур блоку і зразка змінює знак).

2. Опис лабораторного обладнання

Перед початком вимірювання необхідно перевірити положення нуля дзеркального гальванометра, який під'єднано до диференціальної термопари. Для цього необхідно під'єднати термопару до гальванометра та за допомогою гвинта, виведеного на лицевий бік панелі приладу, установити нульове положення світлового променя.

Зразок знаходиться в нагрівачеві, і все це разом розташовано всередині мідного блоку. До зразка і до блоку підведено спай диференціальної термопари, а до блоку ще й спай простої термопари. Блок разом зі зразком знаходяться в печі, яку закрито кришкою. Спочатку подається електрична напруга на електричний нагрівач печі, у якій знаходиться блок. Періодично включається і виключається власне нагрівач зразка, при цьому записуються значення електричного струму та напруги у цій електричній мережі.

Протягом досліду записуються дані для побудови графічних залежностей T температури блоку та ΔT (різниці температур блоку та зразка) від часу. Для визначення кутового коефіцієнта dT/dt , що входить до формули (5), слід побудувати дотичну лінію. Саме по значенню кутового коефіцієнта у точці, де ΔT змінює знак (тобто коли встановлюється теплова рівновага між блоком та зразком), і слід обчислювати питому теплоємність зразка, скориставшись формулою (5). Слід записати в зошиті, що ця теплоємність відноситься саме до тієї температури, яку потрібно відрахувати за даними простої термопари саме в той момент, коли різниця температур блоку та зразка змінює знак.

Завдання

- 1). Побудувати графіки залежності $\Delta T(t)$ для трьох значень фонові температури.
- 2). Побудувати графік залежності температури блоку $T(t)$ від часу, позначити на ньому точками температури, за яких визначалася теплоємність зразка.

Контрольні питання

1. Що таке теплоємність?
2. За яких умов ця величина має певний фізичний зміст?
3. Яким чином теплоємність твердих тіл залежить від температури?

4. Чому на графіку $T(t)$ змінюється нахил дотичної в "нульовій" точці різниці температур при різних значеннях фонові температури (температури блоку)?
5. В яких одиницях вимірюється теплоємність?
6. Як теплоємність ідеального газу залежить від температури?
7. Як застосовується квантова теорія до розрахунку теплоємності твердих тіл? (по Енштейну, по Дебаю).

Лабораторна робота №6

Вимірювання зміни ентропії термодинамічних систем

1. Вступ

Поняття про ентропію термодинамічної системи є одним з найбільш складних в курсі "Молекулярна фізика", тому виконання лабораторної роботи на цю тему є дуже корисним для розуміння зазначеного терміну. Інтеграл $\int_1^2 dQ/T$, що виражає суму зведеної теплоти під час оборотної зміни стану системи від 1 до 2, не залежить від шляху проходження цього процесу, він визначається винятково початковими і кінцевими станами термодинамічної системи. З цієї обставини впливає, що існує певна величина S , яка визначається станом системи і має в стані 1 значення S_1 , а в стані 2 – значення S_2 , причому $S_2 - S_1$ дорівнює:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 dQ/T. \quad (1)$$

Таким чином, $S_2 - S_1$ дорівнює сумі зведених теплот для будь-якого оборотного процесу, що протікає між станами 1 і 2. Тобто фізична величина S є функцією стану, називається вона ентропією. При переході системи з одного стану в інший зміна S буде завжди дорівнювати різниці значень її в цих станах незалежно від шляху, по якому відбувається перехід, тобто незалежно від процесу або сукупності процесів, які призвели до переходу системи з одного стану в інший.

Визначення ентропії (1), яке було уведене вперше Клаузіусом, не дозволяє розрахувати її абсолютне значення. Можна тільки обчислити різницю ентропії $S_2 - S_1$ двох станів: 2 і 1. Фізичний зміст цієї величини став цілком зрозумілий лише після того, як Больцман зв'язав цю величину зі статистичною імовірністю або статистичною вагою стану системи W :

$$S = k \ln(W), \quad (2)$$

де k – постійна Больцмана.

Порівняно з внутрішньою енергією, яка також є функцією стану, і при цьому є мірою внутрішнього руху в системі, про ентропію можна сказати, що вона є мірою безладності цього руху. Ентропія – адитивна величина. Це означає, що ентропія системи дорівнює ентропії окремих її частин. Ентропія в ізольованій системі не може зменшуватися:

$$\Delta S \geq 0. \quad (3)$$

Вона зростає при необоротних процесах ($\Delta S > 0$), а при оборотних – залишається незмінною ($\Delta S = 0$). Нерівність (3) є найбільш загальним формулюванням другого закону термодинаміки, що називається також принципом зростання ентропії.

Процес вирівнювання температур є тим ближчим до оборотного, чим швидше у всьому об'ємі речовин, які змішуються, зникають місцеві (локальні) неоднорідності температур та чим менші величини об'ємів цих речовин. У реальному нерівноважному процесі швидкість вирівнювання температур речовин, що перемішуються, є пропорційною до величини об'єму, та обернено пропорційною до теплоємності тіл.

2. Опис лабораторного устаткування та процедури вимірювання.

Обладнання: калориметр із мішалкою, досліджувані тіла (циліндри з олова, свинцю, міді), термометр (ртутний або термопара з вимірювальним приладом), нагрівач (електрична піч).

Якщо в калориметр, що містить визначену кількість води при заданій температурі, опустити нагріте до великої температури тіло, то відбудеться теплообмін і установиться загальна температура. Повторимо дослід з тими ж вихідними даними, зменшивши теплоємність тіла, що занурюється у воду. Одержимо більш близький до зворотного процес. Ступінь його оборотності в ізольованій системі можна визначити, розрахувавши зміну ентропії. Для твердих тіл та рідин $\Delta Q = mCdT$, де C – питома теплоємність тіла, оскільки роботою з їх розширення можна знехтувати, то $C_v \approx C_p \approx C$. Зміна ентропії процесу між станами 1 і 2 визначається через наступний інтеграл:

$$\Delta S_{1,2} = \int_{T_1}^{T_2} C m d \ln(T) = C m [\ln T_2 - \ln T_1]. \quad (4)$$

В силу своєї адитивності зміна ентропії всієї системи, що складається з n частин дорівнює сумі змін ΔS_i ентропії однієї частини. До складу досліджуваної термодинамічної системи входять: випробуване тіло масою m_x з питомою теплоємністю C_x , яке нагріто до температури киплячої води T_1 ; склянка з кварцового скла масою m_k з питомою теплоємністю C_k і початковою

температурою T_0 , вода у калориметрі (що становить собою склянку в футлярі з пенопласту) має масу m_b , теплоємність C_b та температуру T_0 . Після закінчення процесу теплообміну установиться температура Θ (всі температури обчислюються в Кельвінах). При вирівнюванні температури ентропія кожного з тіл термодинамічної системи (досліджуваного тіла, мішалки, калориметра, води) змінюється:

$$\Delta S_i = m_i C_i \ln(\Theta/T_i). \quad (5)$$

Тоді зміна ентропії всієї системи:

$$\Delta S = (m_k C_k + m_b C_b + m_m C_m) \ln(\Theta/T_0) + m_x C_x \ln(\Theta/T_1). \quad (6)$$

У роботі пропонується розрахувати зміну ентропії трьох тіл при опусканні їх у воду однакової маси і температури. Наявність зовнішнього футляра у склянки калориметра робить систему майже адіабатично ізольованою.

Вимірювання зміни температури виконується або звичайним ртутним термометром, або за допомогою диференціальної термопари. Використання диференціальної термопари дає змогу з високою точністю робити виміри температури. Струм, що протікає по приладу, визначається, різницею електрорушійних сил спаїв двох металів.

Хід роботи

1. Визначити масу випробуваних тіл m_x .
2. Включити нагрівач, помістивши в нього кварцову склянку з водою та зануреним в неї досліджуваним тілом.
3. Доки тіло нагрівається, визначити масу калориметра і масу води в ньому.
4. Виміряти температуру води в калориметрі (T_0).
5. Після того, як закипить вода в нагрівачі, зачекати не менш п'яти хвилин, після чого за допомогою спеціального пристосування досліджуване тіло перемістити до калориметру і простежити за зростанням температури.
6. Зафіксувати максимальне значення температури (Θ). По формулі (6) знайти ΔS . (T_1 , T_0 , Θ визначати по шкалі Кельвіна).
7. Вилити воду з калориметра і охолодити його.
8. Дії, перераховані в пунктах 4 – 7, повторюють для кожного з досліджуваних тіл.
9. Побудувати графік залежності ΔS від $m_x C_x$.

Примітка:

Важливо, щоб у кожному досліді кількість і початкова температура води в калориметрі були однаковими (слід користуватися мензуркою). Натуральні логарифми обчислювати з точністю до

чотирьох знаків. $C_b = 4.19$ (Дж/кг К), $C_{Sn} = 126$ (Дж/кг К), $C_{Al} = 875$ (Дж/кг К), $C_{Cu} = 395$ (Дж/кг К).

Контрольні питання

1. Дайте різні формулювання другого закону термодинаміки.
2. Що таке статистична імовірність (статистична вага)?
3. Дайте визначення оборотним і необоротним процесам.
4. Дайте визначення ентропії по Клаузіусу і по Больцману.
5. Який статистичний зміст другого закону термодинаміки?
6. Намалюйте, як змінюється ентропія ідеального газу з температурою при ізобаричному процесі.
7. Як змінюється ентропія ідеального газу при розширенні в вакуум?

Лабораторна робота №7

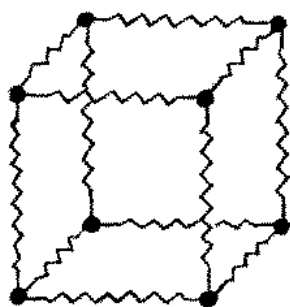
Визначення коефіцієнтів пружності при поздовжній та поперечній деформаціях

1. Вступ

Під дією зовнішніх сил змінюється взаємне розташування частинок твердого тіла, вони зміщуються з своїх рівноважних положень, які відповідають мінімумам їх потенціальної енергії. Через це в твердих тілах виникають сили, що обумовлені міжатомною взаємодією, які прагнуть повернути частинки кристала в їх первісні положення. Ці внутрішні сили, за третім законом Ньютона, протидіють зовнішнім силам і при досягненні стаціонарного стану врівноважують їх.

Якщо зовнішні сили не перевищують певного рівня, що змінюється в досить широкому діапазоні для кристалів різних речовин, то зсув частинок і деформації, що виникають внаслідок цього, є лінійними та оборотними. Такі деформації називають пружними. При пружній деформації після зняття дії зовнішніх сил кристал під дією внутрішніх сил повертається до свого первісного стану. У пружно деформованому стані про величину і характер деформації можна судити по зміні зовнішньої форми кристала. Величину внутрішніх напружень можна визначити по величині зовнішніх напружень, що діють на тверде тіло. Енергію пружної деформації, накопиченої твердим тілом, можна виміряти, обчисливши роботу, що виконана зовнішніми силами. Лінійна залежність між силою і пружною деформацією для твердих тіл

свідчить про те, що криву потенціальної енергії при малих зсувах можна приблизно замінити параболою. Це відповідає моделі твердого тіла (кристалу) у вигляді квазіпружних вібраторів (див. Мал.1). Пружні властивості твердих тіл визначаються двома константами: модулем Юнга E і модулем зсуву G . Важливою властивістю пружної деформації є лінійна залежність величини деформації від прикладеної зовнішньої сили F . Пружна деформація видовження твердого тіла вздовж однієї осі (Мал. 2,а) кількісно



Мал. 1

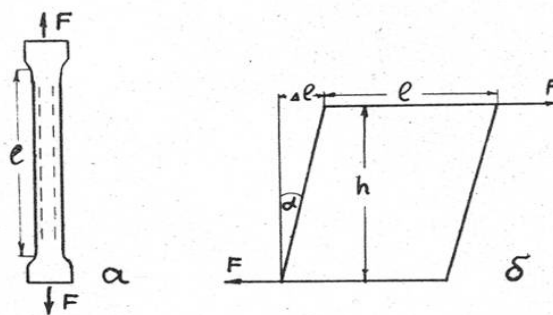


РИС. 2

описується законом Гука (1635-1703 р.):

$$F = Es\Delta l/l, \quad \text{або} \quad \sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

де l і S – первісні (рівноважні) значення довжини і площі поперечного перерізу зразка, σ - напруга розтягування, $\varepsilon = \Delta l/l$ - відносна деформація.

При простому зсуві (Мал. 2, б) зв'язок між силою і деформацією задається аналогічним співвідношенням:

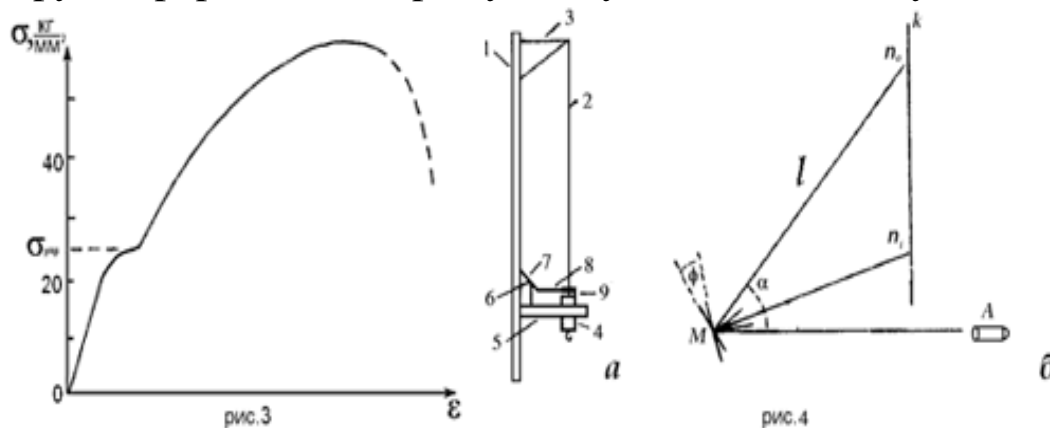
$$F = GS\Delta l/h = GStg(\alpha), \quad \text{або} \quad \tau = Gtg(\alpha), \quad (2)$$

де S - площа перетину зразка в площині зсуву, h - товщина в напрямку, перпендикулярному площі зсуву, α - кут зсуву, τ - напруга зсуву, або тангенціальна напруга. Якщо гранична межа пружності лежить досить високо, то можливі відхилення від лінійного закону за рахунок впливу ангармонійних членів у розкладанні потенціальної енергії по зсувах від положення рівноваги. Для кристалів та інших анізотропних середовищ залежність між силою і деформацією виявляється більш складної, ніж це описується формулами (1) та (2). Значення пружних модулів E та G залежать від розташування поверхонь зразка щодо кристалографічних осей і зв'язані між собою коефіцієнтом Пуассона μ , що характеризує поперечне стискання твердого тіла при поздовжньому розтягуванні:

$$G = E/2(1 + \mu). \quad (3)$$

Відповідно число пружних констант для кристала більше, ніж для ізотропного тіла, і їх величини змінюються в залежності від симетрії кристала. Основними видами деформації твердих тіл, до яких

зводяться всі інші види (вигин, кручення і т.д.), є: лінійне розтягування (стискання) (Мал. 2, а) та простий зсув (Мал. 2, б). При розтягуванні сталевго зразка в пристроях захоплення розривної машини до нього прикладається сила F , під дією якої в зразку виникає напруга σ , що обумовить виникнення відносної деформації ϵ . Залежність $\sigma = \sigma(\epsilon)$ представлена на Мал. 3. З нього видно, що при напругах від нуля до $\sim 20 \text{ кг/мм}^2$ залежність між напругою і деформацією подовження є прямолінійна й оборотна, тобто вона не залежить від напрямку дії F . У цьому інтервалі напруг деформація матеріалу описується законом Гука. Величина



модуля Юнга є сталою, що залежить тільки від матеріалу стрижня. При збільшенні напруги до приблизно 25 кг/мм^2 оборотність деформацій сталевго стрижня зберігається, але закон Гука вже не виконується: відношення σ / E вже не є постійним, хоча як і раніше, не залежить від напрямку F . Ця ділянка графіка відноситься до області нелінійної пружності. Найбільшу напругу, при якій закон Гука ще є справедливим, називають межею лінійної пружності. Напругу ж, при якій деформації перестають бути оборотними, називають межею пружності.

При напругах, що перевершують межу пружності, спостерігається нове явище: зразок деформується так, що ϵ не зникає цілком після зняття зовнішньої сили. Процес деформації має тут особливий характер: при незмінній за величиною F стрижень повільно подовжується, ніби тече. Така деформація називається пластичною, її широко використовують в техніці: волочіння, пресування, кування. В цих процесах до матеріалу прикладають такі напруги, при яких тіло стає пластичним та приймає потрібну форму. Для ряду матеріалів, головним чином металів, спостерігається після пластичної деформації зміцнення матеріалу. Це використовується в техніці: відбивання вістря коси молотком зміцнює її; прокатаний метал є жорсткішим, ніж не катаний і т.д. Такий процес зміцнення зветься гартування (від hard – англійською – твердий). При подальшому збільшенні величини F пластична деформація припиняється, видовження нелінійно зростає. Нарешті настає розрив - руйнування матеріалу (пунктирна частина кривої).

Сказане вище відноситься головним чином до технічних металів. Інші матеріали мають інші властивості. Такі матеріали, як гума, різні пластмаси і т.д. підкоряються закону Гука лише при дуже малих напругах, вище яких пропорційність між деформацією і напругою відсутня (нелінійна пружність).

2. Опис лабораторної установки для визначення модуля Юнга

Обладнання: прилад Лермонтова, освітлювач зі шкалою, тягарці, лінійка, штангенциркуль, мікрометр.

В даній роботі визначається статичним методом модуль Юнга, шляхом розтягування дроту в установці Лермонтова (Мал. 4, а). Прилад Лермонтова складається з вертикально закріпленої на стіні дошки 1. Досліджуваний дріт 2 жорстко закріплюється в кронштейні 3 і натягується за допомогою металевого вантажу 4. У нижній частині вантажу 4 є гачок для підвішування різних додаткових тягарців. На дерев'яній платформі 5 є дві стійки 6, у яких може вільно обертатися стрижень з укріпленням на ньому люстерком 7. Цей стрижень жорстко зв'язаний з важелем 8, що закінчується кільцем, у яке вкручується гвинт 9, що спирається на вантаж 4. Така конструкція зручна тим, що фіксує взаємне розташування люстерка 7 і важеля 8.

Для зняття показань використовується метод люстерка і шкали (Мал. 4, б). Цей метод надзвичайно розповсюджений при вимірюванні невеликих кутів, на які повертаються рухливі частини в приладах, наприклад, кут повороту котушки в гальванометрі і т.п. При цьому, до обертової частини приладу прикріплено плоске люстерко М. Для вимірювання кутів повороту люстерка можна скористатися суб'єктивним чи об'єктивним відліком.

У даній роботі використовується об'єктивний відлік, що полягає в наступному: джерело світла А направляє промінь на люстерко М. При цьому (див. Мал. 4,б), якщо дзеркальце М повернути на деякий кут φ , то кут між променем падаючим і відбитим буде 2φ . Цей факт використовується для збільшення чутливості у випадках малих переміщень. Переміщення вантажу 4 на відстань Δl під дією сили тяжіння викликає поворот важеля 8 та люстерка 7 на кут φ . Тоді з мал.4.а видно, що:

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta l / r, \quad (4)$$

де Δl - абсолютне видовження дроту, r - довжина важеля 8. Формула (4) справедлива, якщо важіль 7 у початковому положенні був горизонтальний. При малих φ можна записати:

$$\varphi = \Delta l / r. \quad (5)$$

Внаслідок повороту люстерка 7 на кут φ , кут, що утворився світловим променем до повороту та після повороту люстерка 7, зміниться на 2φ і на шкалі промінь зупиниться на поділці N_i (мал.

4, б). Якщо позначити через α кут, утворений напрямком променя від N_0 до люстерка М та від люстерка до джерела світла А, то можна написати:

$$\frac{N_0 - N_i}{\sin 2\varphi} = \frac{L}{\sin(90 + \alpha - 2\varphi)}, \quad (6)$$

де L відстань між люстерком та світловою плямою на вимірвальній лінійці, з (6) випливає, що:

$$\sin 2\varphi = (N_0 - N_i) \cos(\alpha - 2\varphi) / L. \quad (7)$$

Якщо вважати кут $\alpha - 2\varphi \ll 1$, тоді формулу (7) можна переписати так:

$$\varphi = (N_0 - N_i) / 2L. \quad (8)$$

Порівнявши формули (5) та (8), одержимо:

$$\Delta l = r(N_0 - N_i) / 2L. \quad (9)$$

Підставляючи у формулу (1) в якості зовнішньої сили вагу P тягарців та використовуючи вираз (9), одержимо значення модуля Юнга:

$$E = 2lLP_i / [rS(N_0 - N_i)], \quad (10)$$

де P_i - певна вага тягарців, якій відповідає визначений зсув світлової плями по лінійці $N_0 - N_i$, S - площа перерізу дроту.

3. Хід роботи з визначення модуля Юнга

1. Включити освітлювач А и підібрати відстань від А до шкали К так, щоб на К було видно чіткий світловий промінь. Визначити початкове показання N_0 на шкалі.
2. Штангенциркулем виміряти довжину r важеля 8.
3. Мікрометром виміряти діаметр дроту, визначити площу його перетину - S
4. За допомогою нитки виміряти довжину l дроту 2.
5. Тим же способом можна зробити вимір відстані L від люстерка 7 до поділки N_0 на шкалі К.
6. На гак вантажу 4 обережно підвішуються послідовно, один за одним, тягарці відомої маси (загальне навантаження на дріт не повинно перевищувати 4 кг!), на шкалі беруться відповідні показання N_1, N_2, N_3, N_4 .
7. Повторити вимірювання подовження дроту в зворотному порядку: при послідовному зніманні тягарців.
8. Обчислити середнє значення частки: $P_i / (N_0 - N_i)$, підставити до (10), знайти модуль Юнга.
9. Визначити відносну похибку $\Delta E / E$.

4. Визначення модуля зсуву G

Теоретичне обґрунтування цієї роботи в основному викладено раніше, в підрозділі 1. Тут необхідно додати лише наступне. Якщо жорстко закріпити верхній кінець дроту, а з боку вільного кінця прикласти пару сил з моментом M , то кут закручування φ буде дорівнює:

$$\varphi = M / f . \quad (11)$$

Між модулем зсуву G і модулем кручення f існує наступне співвідношення:

$$f = \pi r^4 G / 2L, \quad (12)$$

де r та L , відповідно радіус і довжина дроту. Для визначення модуля зсуву в роботі використовується метод крутильних коливань.

5. Опис лабораторної установки з визначення модуля зсуву

Обладнання: крутильний маятник, тіло кільцеподібної форми, лінійка, мікрометр, штангенциркуль, секундомір.

Схематично установка зображена на Мал. 5. У верхній частині дугоподібної опори 1, що стоїть на підставці 2, підвішено дрід 3. Цей дрід верхнім краєм закріплюється в спеціальному поворотному механізмі 4, що дозволяє передати йому обертальний момент, а іншим зашпаровується в центрі масивного диска 5. Якщо цій системі надати обертальний рух, повернувши механізм 4, то виникнуть гармонічні коливання з періодом T :

$$T = 2\pi\sqrt{I/f}, \quad (13)$$

де I - момент інерції диска 5.

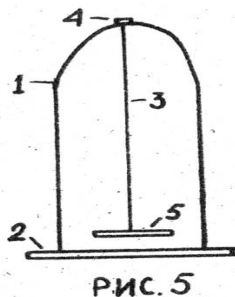


Рис. 5

Мал. 5

Для того щоб з (13) визначити модуль кручення f , знаючи T , необхідно визначити невідомий момент інерції I . З цією метою на диск 5 кладеться додаткове тіло у вигляді кільця, момент інерції I_0 якого визначається за теоретичною формулою:

$$I_0 = m(R_1^2 + R_2^2)/2, \quad (14)$$

де m – маса кільця, R_1 та R_2 , відповідно, його внутрішній та зовнішній радіус. Потім вимірюється новий період коливань, коли на диск по-

кладено кільце:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{(I + I_0)/f}. \quad (15)$$

Використовуючи формули (13) - (15), маємо:

$$I = I_0 T^2 / (T_1^2 - T^2) = 0.5m(R_1^2 + R_2^2) T^2 / (T_1^2 - T^2). \quad (16)$$

Підставивши (12) та (16) до (13), одержимо вираз для модуля зсуву:

$$G = 4\pi L m (R_1^2 + R_2^2) / r^4 (T_1^2 - T^2). \quad (17)$$

6. Хід роботи з визначення величини G

1. Визначити довжину дроту лінійкою, а діаметр – мікрометром.
2. Вимірити штангенциркулем радіуси кільця R_1 та R_2 .
3. Для визначення періоду коливань не навантаженого та навантаженого кільцем диска, повертають диск поворотним механізмом 4 на невеликий кут і відпускають його. За допомогою секундоміра визначають час 20-30 коливань, стежачи за відхиленням по мітці на диску. Маса кільця є константою приладу.
4. Визначити модуль зсуву G . Знайти відносну похибку $\Delta G/G$.

Контрольні питання

1. Яка залежність спостерігається між пружною деформацією і силою в кристалах та чому?
2. Як слід розуміти модель кристалу, що складається з квазіпружних вібраторів?
3. Що таке межі лінійної і нелінійної пружності, які приклади використання їх у техніці?
4. Яка деформація називається пластичною? Навести приклади використання її в техніці?
5. Наведіть приклади методів зміцнення металів. За рахунок яких фізичних процесів це відбувається?
6. Як виконується закон Гука для твердих тіл, що не мають кристалевої ґратки?
7. Вивести формулу, що пов'язує модуль Юнга з модулем зсуву.

Лабораторна робота №8

Вимірювання тиску газу в вакуумній камері, що відкачується форвакуумним насосом

1.1. Вступ

Мета роботи - вивчення елементарних основ вакуумної техніки, методів попередньої відкачки, одержання форвакууму, здобуття навичок вимірювання величини залишкового тиску газів за допомогою вакуумметрів, визначення швидкості натікання газу до об'єму відкачування та швидкості дії форвакуумного насоса.

Якщо довжина вільного пробігу молекул перевищує лінійні розміри посудини, говорять, що в посудині досягнуто стану вакуум, газ у цьому випадку вважають ультрарозрідженим. Хоча в буквальному значенні слово "вакуум" значить "порожня", в

ультрарозрідженому газі міститься досить велике число молекул в одиниці об'єму. Так, при тиску в 10^{-6} мм рт.ст. у 1 м^3 міститься 10^{16} молекул. Більш того, в об'ємах дуже малого розміру стан, визначений як вакуум, може бути досягнутим навіть при атмосферному тиску, але в більшості випадків властивості вакууму виявляються, починаючи з тисків $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

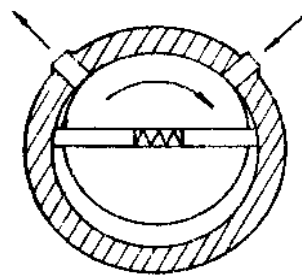
1.2. Вакуумні насоси

Вакуумні насоси служать для відкачування повітря і пари з вакуумного об'єму. Для створення розрідження з тиском до 10^{-3} мм рт.ст. застосовуються різні способи відкачки, що використовують або механічне видалення газів з вакуумного об'єму за допомогою механічних вакуумних насосів, або насоси, в основі яких лежить низькотемпературна конденсація і фізична чи хімічна адсорбція газів і пари за допомогою охолоджених до низьких (порядку 77 К) температур сорбентів, таких, як активоване вугілля, цеоліти або силікагель. У даній роботі передбачається, що відкачка виконується механічним вакуумним насосом. У механічних вакуумних насосах робочі органи періодично захоплюють визначений обсяг газу, відокремлюють його від вакуумного балону, стискають і виштовхують (зазвичай в атмосферу). Такий процес відбувається внаслідок періодичної зміни обсягу робочої камери, утвореної циліндром і частинами насоса, що рухаються. Робоча камера при збільшенні обсягу з'єднується з вхідним отвором насоса і "засмоктує" газ з вакуумного балону. При досягненні робочою камерою найбільшого обсягу вона від'єднується від вхідного отвору насоса; обсяг робочої камери зменшується, газ стискається і виштовхується у бік вихлопу. За своїми конструктивними особливостями механічні насоси можуть бути розділені на такі групи: а) зворотно-поступальні, у яких обсяг робочої камери змінюється за рахунок зворотно-поступального руху частин (металевого чи рідинного поршня); б) обертальні (ротаційні), у яких обсяг робочої камери змінюється внаслідок обертового руху частин (мал.1).

1.3. Манометри (вакуумметри), що вимірюють низький тиск

В залежності від ступеня розрідження газу стан вакууму вимірюється вакуумметрами різних типів. Для вимірювання тиску від сотень міліметрів до десятих часток міліметра ртутного стовпа застосовуються зразкові вакуумметри (ВО). Стрілка ВО вказує на нульову відмітку при вимірі тиску, що є рівним атмосферному, при зниженні тиску стрілка рухається уздовж кругової шкали, показуючи тиск у з'єднаному з вакуумметром об'ємі. Вакуум 10^{-1} -

10^{-3} мм рт. ст. вимірюється за допомогою термопарного манометра. Основною його частиною є манометрична лампа (ЛМ), що з'єднується з об'ємом, у якому вимірюється тиск газу. Її дія заснована на тім, що температура нитки нагрівача, поміщеного в манометричну лампу, при достатнім розрідженні газу залежить від тиску. Це обумовлено тим, що якщо довжина вільного пробігу молекул більше розмірів лампи, то коефіцієнт теплопровідності газу зменшується зі зниженням тиску [2]. Тем-



Мал. 1. Пластинчатороторний форвакуумний насос [1]

пература нитки нагрівача реєструється за допомогою термопар; також поміщеної усередині манометричної лампи і приєднаної до мілівольтметра.

1.4. Вакуумметр ВІТ-2 (призначення та правила роботи)

Іонізаційно-термопарний вакуумметр ВІТ-2 являє собою комбіновану вимірювальну установку, що складається з іонізаційного манометра ЛМ-2, термопарного манометра ЛТ-2, електронної вимірювальної схеми, схеми для електроживлення нагрівача термопар і приладу, що вимірює ЕРС чи струм розжарення нагрівача термопар. Загальний діапазон тисків, вимірюваних вакуумметром, складає $10^{-1} - 10^{-7}$ мм рт.ст. Тиск у межах $10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт.ст. вимірюють термопарним манометром, а $10^{-3} - 10^{-7}$ мм рт.ст. - іонізаційним.

Термопарний манометр розрахований на роботу з термопарною лампою (ЛТ-2) без прямого відліку по шкалі приладу. Відлік термоелектро-рушійної сили виконується по шкалі, що має 100 поділоків, а потім ці дані переводяться в тиск (мм рт.ст.).

1.4.1. Підготовка приладу до роботи і вимірювання тиску

Перед включенням вакуумметра необхідно переконатися, що розжарення іонізаційного манометра ЛМ-2 виключено і вимикач з написом "розжарення ЛМ-2" поставлений у нижнє положення.

1.4.2. Вимикання приладу ВІТ-2

Виключити термопарний манометр. Тумблер "струм розжарення - вимір" поставити в положення "струм розжарення", а тумблер "термовакуум" у нижнє положення. Тумблером "мережа 220 В" виключити електроживлення приладу ВІТ-2.

1.5. Вакуумметр термопарний

І. Перевірка на працездатність. Поставити реостат "Регулювання струму розжарення" у крайнє лівє положення. Увімкнути перемикач "струм розжарення". Увімкнути штепсель до мережі з напругою 220 В. Увімкнути тумблери "термовакуумметр" і

"мережа 220 В", при цьому ліворуч на панелі повинна засвітитися лампочка. Установити заданий струм розжарення, поставити тумблер "струм розжарення-вимір" у положення "струм розжарення". Перевести тумблер у положення "вимір". Якщо при цьому стрілка приладу відключається, то вакуумметр і термопара працездатні.

2. *Вимірювання тиску.* Тумблер "струм розжарення - вимір" поставити в положення "струм розжарення" і за допомогою реостата "Регулювання струму розжарення" встановити струм розжарення по нижній шкалі приладу. Струм розжарення зазначений на панелі приладу. Потім тумблер "струм розжарення - вимір" поставити в положення "вимір" і по середній шкалі приладу визначити Термо - ЕРС лампи ЛТ-2 у розподілах шкали. Відлік у розподілах перевести в тиск за градувальною кривою термопары ЛТ-2, наданої до приладу.

2. Опис установки

Прилади і приналежності: вакуумна установка з ротаційним масляним насосом, вакуумметр іонізаційно-термопарний (ВІТ-2), годинник із секундною стрілкою, схема ротаційного насоса.

Вакуумна установка, використовувана в даній роботі, являє собою розрядну кварцову камеру з форвакуумним балоном (мал.2). Розрядження створюється форвакуумним насосом, приєднаним до установки гнучким вакуумним шлангом. Вакуум-провід має патрубков для напуску повітря до атмосферного тиску при вимиканні насоса. В установці використовується зразковий манометр, за допомогою якого контролюється час зменшення тиску у відкачуваному об'ємі від атмосферного тиску до одиниць мм рт.ст., і термопарний вакуумметр із лампою термопарного датчика тиску, для виміру тиску від 10^{-1} мм рт.ст. до 10^{-4} мм рт.ст.

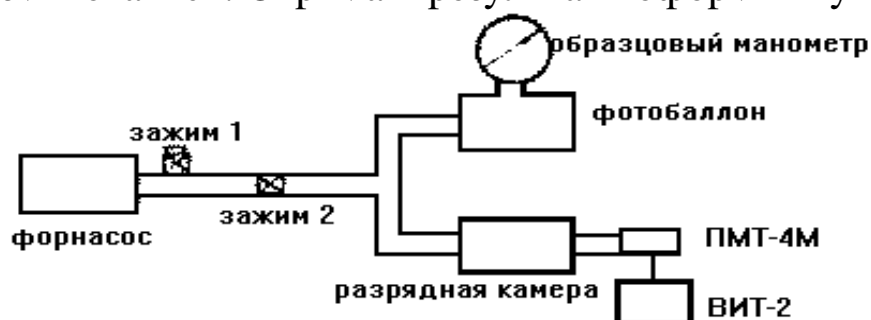
3. Хід роботи

1. Ознайомитися з вакуумною установкою і приладами для одержання і виміру вакууму.
2. Користаючись описом установки, розібратися практично в пристрої вакуумної установки. Обчислити швидкість відкачки.
3. Вивчити правила роботи з вакуумметром ВІТ-2, освоїти порядок включення термопарного вакуумметра.
4. Виміряти швидкість натікання газів до відкачуваного об'єму і швидкість відкачки насоса.

3.1. Вивчення дії форвакуумного насоса

1. Перед початком роботи перевірити вихідний стан установки і вакуумної арматури. Затискувачі 1 і 2 повинні бути закриті.
2. Увімкнути форвакуумний насос. За 10с відкрити затискувач 2.

3. Зняти залежність тиску в установці від часу роботи насоса з моменту підключення його до установки, використовуючи зразковий манометр. Спочатку тиск падає дуже швидко, тому зняття показань варто робити якнайчастіше. Коли залишковий тиск досягне 1-2 мм рт.ст., увімкнути термопарний манометр відповідно до опису. Проміжки часу між вимірюваннями тиску обирають так, щоб фіксувати приблизно однакові зміни тиску. Тому при швидкій зміні тиску показання манометра знімають частіше, при малих змінах проміжки часу між відліками збільшують. Відкачку робити до граничної межі спроможності створювати більш високий ступінь вакууму форвакуумним насосом, доти тиск не перестане змінюватися. Отримані результати оформити у виді Таблиці.



Мал.2. Схема установки

4. Побудувати графік залежності тиску в установці від часу відкачки, відклавши по осі ординат десятковий логарифм тиску, а по осі абсцис - час.

5. Визначити швидкість відкачки (або швидкість дії) насоса. Швидкість дії насоса це об'єм газу, що відкачується насосом в одиницю часу (він вимірюється при тому тиску, при якому газ надходить до насосу). Оскільки процес відкачки майже ізотермічний, можна записати:

$$PV = const, \quad d(PV) = 0. \quad (1)$$

Далі слід вважати, що швидкість відкачування $C = dV / dt$ не залежить від тиску і що трубопровід, що з'єднує вакуумний балон з насосом, не впливає на швидкість відкачування газу. Тому:

$$CPdt = -VdP, \quad -Cdt / V = dP / P. \quad (2)$$

Інтегрування (2) за допомогою методу розподілу змінних дає наступні вирази для залежності тиску в форвакуумному балоні від часу відкачування, та швидкості відкачування:

$$P = P_0 \exp(-Ct / V), \quad C = \ln(P_0 / P)V / t, \quad (3)$$

де P_0 - початковий тиск.

3.2. Вимикання установки і вимірювання натікання газу до вакуумного балону

1. При вимиканні установки необхідно перетиснути вакуумний шланг за допомогою затискувача 2, виключити форвакуумний насос і відкрити затискувач 1, щоб тиск усмоктувального патрубка

форвакуумного насоса зрівнялося з атмосферним. Зафіксувати залежність зміни тиску у вакуумному об'ємі від часу.

2. Побудувати графік зміни тиску в залежності від часу.

3. Відкрити затискувач 2, напустити атмосферне повітря у вакуумний балон, після чого закрити затискувачі 2 і 1, повернувши установку до початкового стану.

Контрольні питання

1. Які існують способи одержання форвакууму?
2. Опишіть основні елементи вакуумної установки.
3. Опишіть принцип дії різних вакуумметрів.
4. Які типи вакуумметрів використовуються для виміру низьких тисків? Які межі вимірюваних цими приладами тисків?
5. Які властивості газу і як змінюються при зниженні його тиску?
6. Яким процесом моделюється створення форвакууму в установці?
7. Як залежать коефіцієнти переносу газу від його тиску?

Лабораторна робота №9

Визначення питомої теплоти пароутворення води

1. Вступ

Питома теплота пароутворення λ може бути визначена за кількістю теплоти Q_1 , що виділяється при конденсації пари маси m :

$$\lambda = Q_1 / m \quad (1)$$

У даній роботі визначення величини Q_1 побудовано на застосуванні рівняння теплового балансу до процесу конденсації пари, яка утворюється з киплячої води, при пропусканні її через калориметр із холодною водою. При цьому:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (2)$$

де Q_2 - кількість тепла, виділена m грамами конденсату (H_2O) при його охолодженні від температури кипіння T до температури рівноваги θ , Q_3 та Q_4 - відповідно кількості тепла, які отримуються холодною водою в калориметрі та самим калориметром разом з обладнанням, що розміщено в ньому. Якщо M - маса води у калориметрі, C - питома теплоємність води, T_0 - початкова температура води в калориметрі, q - водяний еквівалент калориметра, то формула (2) приймає вигляд:

$$\lambda m + mC(T - \theta) = MC(\theta - T_0) + q(\theta - T_0). \quad (3)$$

З рівняння (3) можна знайти питому теплоту пароутворення:

$$\lambda = [(MC + q)(\theta - T_0) - mC(T - \theta)] / m. \quad (4)$$

Водяний еквівалент калориметра q , визначається методом електричного нагрівання води в калориметрі. При проходженні струму I через нагрівач при різниці потенціалів U за час τ виділяється певна кількість тепла, що йде на нагрівання води з масою M у калориметрі та самого калориметра, від початкової температури t_1 до кінцевої t_2 . Для цієї кількості тепла можна записати рівняння теплового балансу:

$$UI\tau = (MC + q)(t_2 - t_1). \quad (5)$$

У такий спосіб обчислюється водяний еквівалент калориметра, що характеризує втрати тепла, які мають місце у калориметрі при обраному способі нагрівання води, яку розташовано в цьому калориметрі:

$$q = IU\tau / (t_2 - t_1) - MC. \quad (6)$$

Опис установки

Використається калориметр із органічного скла, до якого можна поставити склянку води місткістю 700 дм^3 . Кришка - плексиглазовий диск, товщиною 6 мм із трьома отворами, закритими гумовими пробками. Через першу пробку до калориметра вводиться термометр. Другий отвір призначено для вводу до води, що міститься в калориметрі вихідної трубки дефлегматора. Товста гумова трубка з'єднує дефлегматор з кип'ятильником, а сам дефлегматор має ще спеціальну трубку, яку забезпечено затискувачем Гофмана, що служить для зливу зайвої води, яка конденсується на стінках дефлегматора. Третій отвір у калориметрі розташовано по центру кришки, він призначений для уведення в склянку з водою, що розташовано в центрі калориметра гвинта для перемішування води. Нагрівач води закріплено на внутрішній кришці калориметра, він складається з двох товстих мідних дротів, до яких припаяно спіраль зі сплаву хрому й нікелю, яку для стійкості конструкції намотано на пластмасове кільце. Електрична схема складаються з джерела живлення, яке забезпечує подачу сталої напруги до нагрівача, вольтметра та амперметра, що контролюють величини напруги, що падає на нагрівачеві, та струму, що протікає через нагрівач, відповідно.

Хід роботи

1. Збирається електрична схема для визначення водяного еквівалента калориметра.
2. Зважується на технічних терезах і визначається маса M_1 склянки, що розташовується в середині калориметра.
3. До склянки калориметра заливається вода у кількості, що

забезпечує занурення нагрівача та термометра на достатню глибину у цю воду. На терезах визначається маса склянки з водою M_2 . Різниця мас M_2 та M_1 дозволяє знайти масу води:

$$M = M_2 - M_1. \quad (7)$$

4. Склянку з водою ставлять до калориметра, закривають обидві кришки, вставляють термометр, отвір для трубки дефлегматора закривають ватою або віхтиком. Калориметр приводиться до робочого стану: перевіряють електромережу нагрівача, здатність гвинта електричної мішалки вільно обертатися біля дна склянки з водою. Визначають початкову температуру t_1 води. Одночасно вмикається ключ подачі напруги нагрівача, секундомір та подається напруга на електричну мішалку води. Перемішування води триває протягом усього процесу нагрівання та припиняється тільки після того, як установиться кінцева температура t_2 .

5. У процесі нагрівання кілька разів контролюють незмінність показань амперметра й вольтметра. Коли температура води в калориметрі перевищить кімнатну температуру на таку кількість градусів, наскільки початкова температура була нижче кімнатної, тоді вимикається електричний ланцюг нагрівача й одночасно із цим зупиняється секундомір. Визначається час роботи нагрівача τ . За формулою (6) обчислюється водяний еквівалент q калориметра.

6. Включається нагрівач електроплитки, на якій стоїть каструля з водою, що має власну кришку, до якої підходить товста гумова трубка дефлегматора. Термометр з калориметра знімають, кришки калориметра також знімають, а теплу воду із склянки виливають.

7. Калориметр знову заповнюється свіжою водою близько 500 г і зважується на технічних терезах. Визначається маса калориметра з водою M_2 . Тоді за формулою (7) визначає масу нової води M . Калориметр приводять до робочого стану.

9. Коли із товстої трубки, з'єднаної з каструлею починається інтенсивне виділення пари, визначається початкова температура води в калориметрі, з дефлегматора зливають зайву воду, що конденсувалася на його стінках. Іншу трубку дефлегматора вставляють в калориметр, у той же час приводиться в дію мішалка.

10. Коли температура води в калориметрі перевищить кімнатну настільки, наскільки початкова була нижче її, швидко витягають трубку дефлегматора з калориметру. Дія мішалки припиняється після того, коли буде досягнуто максимальну температуру θ , що вимірюється термометром.

11. Повторним зважуванням калориметра визначається його маса M_3 й обчислюється маса пари, що сконденсувалася, $m = M_3 - M_2$.

Лабораторним барометром вимірюється атмосферний тиск, по таблицях визначається відповідна температура кипіння води.

12. За формулою (4) визначається питома теплота пароутворення води при температурі кипіння.

Завдання

1. Визначити питому теплоту пароутворення води.
2. Порахувати значення абсолютної похибки визначення питомої теплоти пароутворення води відповідно до формули (4).
3. Визначити водяний еквівалент калориметра.

Контрольні питання

1. Що таке питома теплота пароутворення?
2. Для чого необхідне визначення водяного еквівалента калориметра? Чому дорівнював би мідний еквівалент калориметра?
3. Де можна використати таку чудову властивість води як велика питома теплота пароутворення?
4. До якого роду фазових перетворень належить процес пароутворення? Які ще цікаві властивості води ви знаєте?
5. До якого роду фазових перетворень належить процес конденсації води?
6. Що таке калориметр, яка його будова, основні елементи?
7. Який процес називається теплообміном, назвіть його приклади з даної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Вища школа, 1993.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т. 2. Київ., 1999.
3. Сивухін Д.В. Загальний курс фізики. т .2. Молекулярна фізика. М.,1989.
4. Дутчак Я. Й. Молекулярна фізика. Видавництво Львівського університету, 1973.
5. Детлаф А.А., Яворський Б.М. Курс фізики. М., 1989.

6. Савел'єв І.В. Курс загальної фізики. т. 2. М., 1973.
7. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Механіка та молекулярна фізика. М., 1969.
8. Телеснін Р.В. Молекулярна фізика. М: Вища школа, 1973.
9. Радченко І.В. Молекулярна фізика. М: Наука, 1965.
10. Матвеев А.Н. Молекулярна фізика. М: Вища школа, 1981.
11. Фізичний практикум. Під редакцією В.І. Іверонової, М., 1967.

Поліграфічний комплекс Харківського
обласного об'єднання Всеукраїнського товариства
“Просвіта” імені Тараса Шевченка
61057, м. Харків, вул. Римарська, буд. 18-А