

Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича

**МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА**  
**фізичний практикум**  
**Методичний посібник**

Чернівці  
2022

УДК 535(075.8)  
К 93

Рекомендовано навчально-методичною радою навчально-наукового Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, протокол №3 від 5 січня 2022 р.

Молекулярна фізика: Фізичний практикум: Методичний посібник для студентів денної форми навчання / Укл.: Курек І. Г., Курек Є. І., Струк Я. М., Федорцова І.В. – Чернівці: 2022. – 80 с.

Методичні вказівки призначені для студентів першого курсу, які навчаються за спеціальностями “Фізика та астрономія”, “Середня освіта (фізика)” та “Прикладна фізика” і продовжують експериментальне вивчення загального курсу фізики в лабораторії молекулярної фізики

## Лабораторна робота N 1

### Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом підняття рідини в капілярах

**Прилади і матеріали.** Набір капілярних трубок діаметром  $0,2 \div 1$  мм, скляна посудина для досліджуваних рідин, вимірювальний мікроскоп, висок, досліджувана рідина.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Висота  $h$  підняття рідини в циліндричній капілярній трубці радіуса  $r$ , яку вміщено у широку посудину, для випадку повного змочування визначається за формулою Жюрена

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r}$$

де  $\alpha$  і  $\rho$  - відповідно коефіцієнт поверхневого натягу і густина рідини,  $g$  - прискорення вільного падіння. У роботі для визначення коефіцієнта поверхневого натягу використовують одночасно два капіляри радіусами  $r_1$  і  $r_2$ . У цьому випадку

$$\alpha = \frac{\rho g h_1 r_1}{2} = \frac{\rho g h_2 r_2}{2}. \quad (1)$$

Оскільки  $\Delta h = h_1 - h_2$ , то з (1)

$$\Delta h = \frac{2\alpha}{\rho g} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

і

$$\alpha = \rho g \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (2)$$

Схему установки зображено на рис.1, де 6 – посудина з досліджуваною рідиною, 5 – капіляри, закріплені на штативі 4, 3 – вимірювальний мікроскоп на рухомій підставці 2, 1 – мікрогвинт, 7 – висок. На рис.2 метод вимірювання різниці рівнів у капілярах  $\Delta h$  ілюструється за допомогою окулярної шкали вимірювального

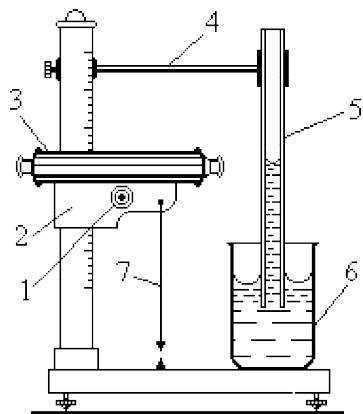


Рис. 1

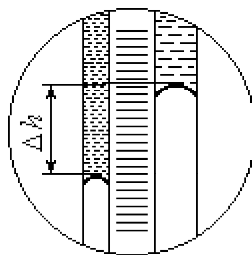


Рис. 2

мікроскопа.

### Хід роботи

1. Якщо радіуси капілярів невідомі, їх треба виміряти вимірювальним мікроскопом або методом заповнення рідиною з наступним зважуванням.
2. Капіляри старанно промийте розчином двохромислового калію в сірчаній кислоті, а потім дистильованою водою.
3. Закріпіть на штативі занурені у досліджувану рідину на 1-2 см промиті капіляри радіусів  $r_1$  і  $r_2$ .
4. За допомогою вимірювального мікроскопа виміряйте різницю рівнів рідини в капілярах  $\Delta h$ .
5. Повторіть дослід 3-5 разів при різному зануренні капілярів у досліджувану рідину.
6. Обчисліть похибки при вимірюванні  $\Delta h$ .
7. За формулою (2) обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу  $\alpha$ .
8. Похибки непрямих вимірювань  $\alpha$  обчисліть за формулою (2).

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. У чому полягають капілярні явища? Що є причиною підняття змочуючих рідин у капілярах? Виведіть формулу Жюрена. Яке практичне значення капілярних явищ?
3. Виведіть формулу для додаткового тиску Лапласа.
4. Поясніть явища змочування та незмочування.
5. Чим зумовлений поверхневий натяг рідин? Який фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [2, с.336-339], [3, с.428], [5, с.429-430].
3. [3, с.426-429], [4, с.238-240], [5, с.426-428], [8, с.313-318].
4. [2, с.321-326], [3, с.423-426].
5. [1, с.262-264], [2, с.321-326].

## Лабораторна робота N 2 Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом горизонтального капіляра

**Прилади і матеріали.** Капіляр, U-подібний водяний манометр, вимірювальний мікроскоп, фільтрувальний папір, досліджувана рідина, сполучені посудини.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Капіляром називається посудина таких розмірів, що вплив її стінок поширюється на всю поверхню рідини. Залежно від того, змочує чи не змочує рідина стінки капіляра, її рівень у капілярі буде вищим чи нижчим від рівня рідини в посудині. Це пояснюється тим, що в капілярі поверхня рідини не плоска, а викривлена. Викривлення поверхні рідини призводить до виникнення додаткового тиску  $\Delta P$ , який напрямлений до центра кривизни поверхні рідини (меніска) в капілярі і залежить від радіуса меніска та від коефіцієнта поверхневого натягу

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус меніска. Піднімання або опускання рідини в капілярі відбувається доти, доки додатковий тиск не буде зрівноважений гідростатичним тиском стовпчика рідини

$$\Delta P = \rho gh, \quad (2)$$

де  $\rho$  - густина рідини,  $h$  – висота її підняття чи опускання. Із (1) і (2) одержуємо:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g r h . \quad (3)$$

Якщо в горизонтально розміщений капіляр ввести краплю досліджуваної рідини, то на торцях стовпчика рідини обидві поверхні будуть увігнуті. Підвищивши тиск з одного боку, можна підвести стовпчик до кінця капіляра і тим самим зробити поверхню одного меніска плоскою. Різницю тисків з обох боків стовпчика рідини визначають U-подібним манометром. Тоді коефіцієнт поверхневого натягу

$$\sigma = \frac{1}{4} \rho g d h , \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр капіляра,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $h$  – різниця висот рівнів рідини у колінах манометра,  $\rho$  - густина рідини у манометрі.

Зміна тиску здійснюється шляхом піднімання або опускання посудини А з водою (рис.3), яка з'єднана з іншою посудиною В, що також наповнена водою. Верхня частина посудини В з'єднана з капіляром L та манометром М. Для визначення  $h$ , при якій меніск у капілярі стає плоским, за допомогою мікроскопа С спостерігають за кінцем капіляра L. У цьому випадку меніск стає рівномірно освітлений. Вимірювання зводяться до відліку різниці рівнів рідини

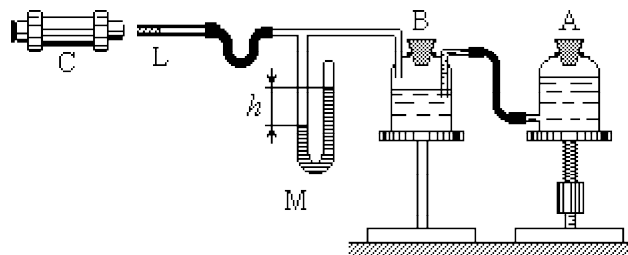


Рис.3

в манометрі М, коли переміщенням посудини А домагаються рівномірного освітлення меніска в капілярі.

### Хід роботи

1. За допомогою мікроскопа виміряйте діаметр капіляра. (При довжині тубуса 130, ціна поділки шкали мікроскопа становить **0,041 мм**).
2. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
3. Посудину А розмістіть трохи вище від крайнього нижнього положення.
4. Змочіть паличку досліджуваною рідиною і введіть краплю в капіляр. Опускаючи посудину А в крайнє нижнє положення, відведіть краплю від краю капіляра.



5. Добре висушіть торець капіляра фільтрувальним папером. (Поверхню води в мікроскоп не видно, оскільки різкість наведена на край капіляра).
6. Поступово піднімайте посудину А. Крапля переміститься на край капіляра. В мікроскопі буде видно дзеркальну поверхню води на якій видно спотворене зображення джерела світла.



Посудину А піднімайте доти, доки зображення не зникне. Це означає, що меніск став плоским.



7. Виміряйте різницю рівнів рідини у манометрі  $h$ . Вимірювання проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки.
8. За формулою (4) обчисліть  $\sigma$ .
9. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань, вважаючи  $\sigma$  функцією двох аргументів  $\sigma = \sigma(d, h)$ .

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть явища змочування та незмочування. Що таке крайовий кут?
3. Дайте визначення капіляра. Що є причиною піднімання чи опускання рідини в капілярах?
4. Що таке поверхнева енергія рідини? У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу?
5. Виведіть формулу для додаткового тиску Лапласа.

### **Рекомендована література**

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [2, с.329-333], [3, с.423-426], [5, с.418-420].
3. [2, с.336-339], [3, с.428], [5, с.428-430].
4. [1, с.262], [2, с.321-326], [5, с.408-410].
5. [4, с.238-240], [5, с.426-428], [8, с.313-318].

## **Лабораторна робота N 3**

### **Визначення залежності коефіцієнта поверхневого натягу рідини від температури та від поверхнево–активних речовин методом відриву кільця**

**Прилади і матеріали.** Технічні терези з різноважками, штангенциркуль, металеве кільце, штатив з посудиною для досліджуваної рідини, електрична плитка, термометр, досліджувані рідини.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Енергетичний стан молекул у поверхневому шарі й усередині об'єму рідини різний. Надлишок енергії молекул поверхневого шару рідини у порівнянні з молекулами внутрішніх шарів називають поверхневою або вільною енергією. Зазначені властивості поверхневого шару зумовлюють його особливий стан, подібний до стану натягнутої



плівки, яка прагне зробити свою поверхню якомога меншою. Це “прагнення” рідини скоротити свою поверхню називають *поверхневим натягом*. Сили поверхневого натягу напрямлені по дотичній до поверхні і діють нормально до будь-якої лінії, проведеної на цій поверхні.

Для кількісної характеристики сили поверхневого натягу рідини вводиться коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$ . Він чисельно дорівнює силі  $F$ , яка діє на одиницю довжини довільної лінії  $L$ , що уявно проведена на поверхні рідини

$$\sigma = \frac{F}{L}. \quad (1)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу різний для різних рідин і залежить від температури. Розчинення в рідині поверхнево-активних речовин (жирних кислот, їх солей, спиртів, ефірів тощо) змінює коефіцієнт поверхневого натягу. Ці речовини адсорбуються на поверхні рідини і зменшують поверхневу енергію. Підвищена концентрація поверхнево-активних речовин у поверхневому шарі пояснюється тим, що перенесення молекул цих речовин на поверхню потребує менших затрат енергії, ніж перенесення молекул рідини.

Суть методу полягає в тому, що вимірюється сила, яку необхідно прикласти, щоб відірвати тонке металеве кільце від поверхні рідини. Експериментальне устаткування складається з технічних терезів А, у яких до одного коромисла, крім шальки, горизонтально підвішене тонке металеве кільце (рис.4). Під кільцем на штативі розміщується посудина з досліджуваною рідиною. Якщо підвести посудину під кільце так, щоб воно нижньою основою торкалося до рідини, то воно ніби прилипне. Для відриву кільця від поверхні треба прикласти силу  $F$ . Розрив поверхні

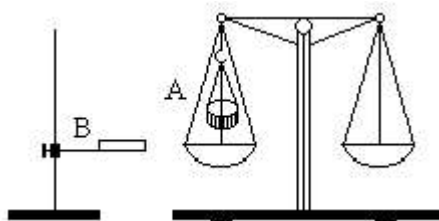


Рис.4

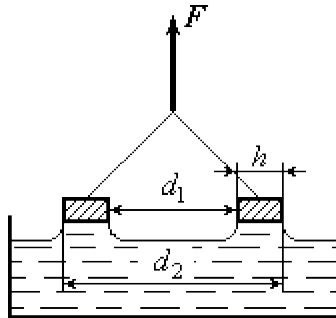


Рис. 5

відбувається по двох колах, діаметри яких  $d_1$  і  $d_2$ , відповідають внутрішньому і зовнішньому периметрам кільця відповідно (рис.5). Загальна довжина лінії розриву

$$L = \pi d_1 + \pi d_2. \quad (2)$$

Якщо позначити товщину кільця через  $h$ , одержимо

$$d_1 = d_2 - 2h. \quad (3)$$

Підставивши (3) у (2), знаходимо

$$L = 2\pi(d_2 - h). \quad (4)$$

На основі (4) та (1) одержуємо робочу формулу для обчислення  $\alpha$

$$\sigma = \frac{F}{2\pi(d_2 - h)}. \quad (5)$$

### Хід роботи

1. За допомогою штангенциркуля виміряйте зовнішній діаметр  $d_2$  та товщину  $h$  кільця. Вимірювання кожної величини проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
2. Підвісьте кільце на ліве коромисло та зрівноважте терези.
3. Помістіть під кільце посудину з рідиною так, щоб кільце торкнулося рідини своєю нижньою основою.
4. Праву шальку терезів **обережно** навантажуйте різноважками доти, поки кільце не відірветься від поверхні рідини. Вага різноважків дорівнює силі поверхневого натягу  $F$ . **Зауваження:** Різноважки треба класти на шальки терезів при закритому аретирі. Дослід проведіть не менше трьох разів і обчисліть похибки прямих вимірювань сили  $F$ .
5. За формулою (5) знайдіть  $\sigma$  і обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.

### **Вправа 1. Визначення залежності $\alpha$ від температури**

1. На електроплитці нагрійте рідину до  $70-80^{\circ}\text{C}$ .
2. Занурте у посудину з рідиною термометр, підведіть рідину до кільця і через кожні  $5 - 10$  градусів визначайте величину  $\sigma$ . Для цього виконайте пп. 3 – 5 ходу роботи.
3. Результати подайте у вигляді графіка, відкладаючи по осі абсцис температуру  $t$ , а по осі ординат – виміряні значення  $\sigma(t)$ .

### **Вправа 2. Вивчення впливу поверхнево–активних речовин на поверхневий натяг**

1. Почергово піднесіть до кільця посудини з розчинами етилового спирту різних концентрацій  $n$ .
2. Виконайте пп. 3–6 ходу роботи. Побудуйте графік залежності  $\sigma(n)$ .

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть явища змочування та незмочування. Що таке крайовий кут?
3. Дайте визначення капіляра. Що є причиною піднімання чи опускання рідини в капілярах?
4. Що таке поверхнева енергія рідини? У чому полягає фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу?
5. Виведіть формулу для додаткового тиску Лапласа.
6. Поясніть залежність  $\sigma = \sigma(t)$ .
7. Поясніть залежність  $\sigma = \sigma(n)$ .

### **Рекомендована література**

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [2, с.329-333], [3, с.423-426], [5, с.418-420].
3. [2, с.336-339], [3, с.428], [5, с.428-430].
4. [1, с.262], [2, с.321-326], [5, с.408-410].
5. [4, с.238-240], [5, с.426-428], [8, с.313-318].
6. [5, с.413-415].
7. [2, с.328], [3, с.420], [5, с.421-422].

## Лабораторна робота № 4 Визначення сталої Больцмана

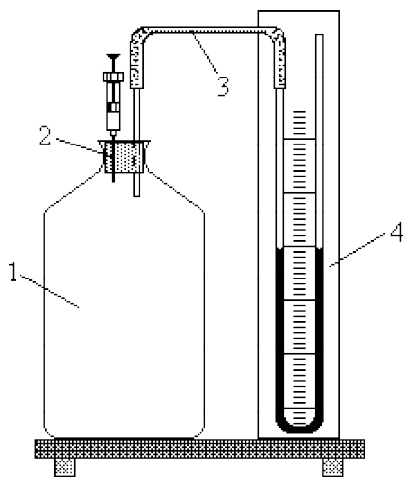


Рис. 6

### Прилади і матеріали.

Скляний балон місткістю 11,4 л, медичний шприц 1 - 2 см<sup>3</sup>, термометр, U-подібний водяний манометр, ефір.

### Теоретичні відомості та опис приладів.

Виходячи з молекулярно-кінетичного тлумачення поняття температури, її необхідно вимірювати в одиницях енергії. Проте це дуже незручно на практиці, оскільки необхідно оперувати досить малими

числами: зміні температури на 1 K відповідає приріст енергії  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж. Множник  $k$ , який виражає співвідношення між одиницями енергії (джоулем) та температури (кельвіном), називають сталою Больцмана.

Прилад для визначення сталої Больцмана складається з товстостінного балона 1, що з'єднується через вивідну гумову трубку 3 з рідинним манометром 4 (рис.6). У корку балона закріплено медичну голку 2 для введення через неї шприцом рідини, що легко випаровується (ефір). Після введення ефіру у балон та його випаровування у балоні створиться надлишковий тиск, що відповідає парціальному тиску газоподібного ефіру. Величину цього тиску  $\Delta P$  вимірюють манометром.

В основу визначення сталої Больцмана покладено рівняння

стану ідеального газу  $\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{RT}{V}$ , з якого можна отримати:

$$\Delta P = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{RT}{V} = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{kN_A T}{V} = kN_0 T, \quad (1)$$

де  $\frac{\Delta m}{\mu}$  - кількість молів уведеного в балон ефіру,  $V$  - робочий об'єм балона,  $T$  - температура газової суміші у балоні,  $N_A$  - стала

Авогадро,  $N_0 = \frac{\Delta m N_A}{\mu V}$  - кількість молекул ефіру в одиниці об'єму балона (для ефіру  $\mu = 76 \text{ г/моль}$ ). Парціальний тиск пари ефіру в балоні зрівноважується різницею рівнів рідини  $\Delta h$  у манометрі

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (2)$$

де  $\rho$  - густина манометричної рідини (задається наперед при відповідній температурі досліду).

З іншого боку  $\Delta m = \rho_e V_e$ , де  $\rho_e = 714 \text{ кг/м}^3$  - густина ефіру,  $V_e$  - об'єм уведеного в балон ефіру. Отже, для  $N_0$  маємо

$$N_0 = \frac{\rho_e V_e N_A}{\mu V}. \quad (3)$$

Підставивши (2) і (3) в (1), одержимо:

$$k = \frac{\Delta P}{N_0 T} = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e V_e N_A T} \Delta h = B \frac{\Delta h}{V_e T}, \quad (4)$$

де  $B = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e N_A}$  - сталий в умовах досліду коефіцієнт.

### Хід роботи

1. Наповніть медичний шприц з голкою ефіром до об'єму  $V_e$ . Зніміть з шприца голку і вставте його у голку 2 балона. При цьому рівні рідини у колінах манометра повинні бути однаковими.
2. Натискаючи на поршень шприца, введіть у балон ефір і для збереження герметизації залишіть шприц у голці 2.
3. Після випаровування ефіру зафіксуйте стабільну різницю рівнів рідини у колінах манометра  $\Delta h$  при відповідній температурі.

5. За формулою (4) обчисліть  $k$  та порівняйте отримане значення з табличним.
6. Обчисліть похибки прямих та опосередкованих вимірювань.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Виведіть основне рівняння молекулярно - кінетичної теорії газу.
3. Запишіть закони у яких фігурує стала Больцмана.
4. Який фізичний зміст універсальної газової сталої?
5. Чому температура є енергетичним параметром стану газу?
6. Що таке внутрішня енергія ідеального газу? Як вона залежить від параметрів стану?

### **Рекомендована література**

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.87], [2, с.19-24], [4, с.27-29].
4. [2, с.105].
5. [1, с.95-102], [2, с.24-32], [3, с.14-18].
6. [1, с.121-122], [2, с.95], [3, с.54-58], [5, с.104-110].

## **Лабораторна робота N 5**

### **Вимірювання вологості повітря**

### **психрометричним методом і визначення**

### **сталі психрометра**

**Прилади і матеріали.** Аспіраційний психрометр, дистильована вода, барометр.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Вологість повітря зумовлена наявністю у ньому водяної пари, маса якої може змінюватись як за абсолютною величиною, так і за станом насичення, що характеризується відповідно абсолютною і відносною вологістю.

**Абсолютна вологість** повітря  $m$  кількісно дорівнює масі водяної пари в грамах, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря при даній температурі, тобто її густині. Коли температури невисокі і пара ненасичена (у цьому разі до пари можна застосувати рівняння Клапейрона – Менделєєва), парціальний тиск водяної пари у повітрі пропорційний її густині. Тому абсолютну вологість визначають також як парціальний тиск водяної пари і виражають її в одиницях тиску.

**Відносною вологістю**  $\varphi$  називається відношення абсолютної вологості до максимальної. **Максимальна вологість** – це маса або парціальний тиск водяної пари, яка насичує повітря при даній температурі. Це відношення виражають у відсотках.

$$\varphi = \frac{P_C}{P_H}. \quad (1)$$

Метод психрометра є найпоширенішим методом вимірювання вологості. Суть його полягає у тому, що коли взяти два однакових нормальних термометри, кулька одного з яких неперервно змочується водою через батист, занурений у посудину з водою, то покази обох термометрів (“сухого” і “мокрого”) будуть різні. Внаслідок випаровування води з батисту “мокрый” термометр показуватиме нижчу температуру, ніж “сухий”. Чим менша вологість повітря, тим інтенсивніше іде випаровування води з батисту і тим менші покази “мокрого” термометра. Значення показів “сухого”  $t_C$  і “мокрого”  $t_M$  термометрів дають можливість визначити вологість повітря.

Психрометричну формулу можна вивести з рівняння теплового балансу для кульки “мокрого” термометра. Кількість теплоти  $Q_1$ , передана від повітря у стаціонарному стані (покази “мокрого” термометра уже встановились) і при відсутності тепловитрат, дорівнює кількості теплоти  $Q_2$ , яка потрібна для випаровування води з поверхні батисту площею  $S$ , тобто

$$\alpha(t_C - t_M)S = g_m \lambda S, \quad (2)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт теплообміну;  $\lambda$  - питома теплота випаровування;

$g_m = \frac{dm}{d\tau}$  - швидкість випаровування з одиниці площі поверхні.

Рівняння (2) віднесено до одиниці часу. З (2) матимемо

$$t_M = t_C - \frac{g_m \lambda}{\alpha}.$$

Швидкість випаровування можна визначити за законом Дальтона. Для випаровування води з вільної поверхні

$$g_m = \alpha_m \Delta P \frac{760}{H}, \quad (3)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт випаровування;  $H$  – атмосферний тиск;  $\Delta P$  - різниця парціальних тисків водяної пари біля поверхні води та у навколишньому повітрі. Для заданого випадку  $\Delta P = P_M - P_C$ , де  $P_M$  – тиск насиченої водяної пари при температурі  $t_M$ ,  $P_C$  – тиск пари у навколишньому повітрі при температурі  $t_C$ . З (2) і (3) маємо рівняння психрометра

$$P_C = P_M - AH(t_C - t_M), \quad (4)$$

де  $A = \frac{\alpha}{\alpha_m 760 \lambda}$  - стала психрометра. З (4) можна отримати

$$A = \frac{P_C - P_M}{(t_M - t_C)H}. \quad (5)$$

Величина  $A$  сильно залежить від швидкості руху повітря при малих швидкостях, а при великих швидкостях змінюється мало. Тому використовують психрометр з примусовим рухом повітря (рис.7). Це так званий аспіраційний психрометр. Кулька правого термометра обгорнута батистом. Лівий термометр – сухий. По двох трубках 1, у які вміщено термометри 2, повітря зі швидкістю 3 – 5 м/с продувається вентилятором 3. Батист змочують дистильованою водою. За показами термометрів визначають температури  $t_C$  і  $t_M$ , коли вони встановляться при роботі вентилятора на повну потужність. Знаючи  $t_C$  і  $t_M$  і користуючись таблицями, визначають  $\varphi$  та  $m$ .



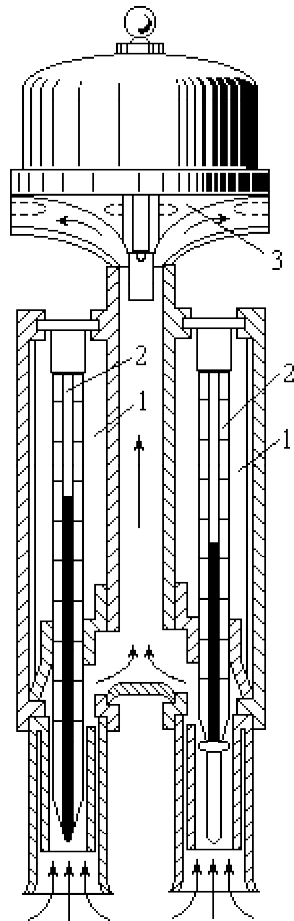


Рис. 7

### Хід роботи

1. Змочіть батист “мокрого” термометра, звернувши увагу на те, щоб вода не потрапила на сухий термометр і на внутрішню поверхню трубки.
2. Увімкніть вентилятор і стежте за показами термометрів. Коли покази встановляться (через 5 – 6 хв), запишіть значення  $t_C$  і  $t_M$ .
3. За різницею показів  $t_C - t_M$  і за температурою “сухого” термометра з таблиці 12 визначте відносну вологість  $\varphi$ .
4. З таблиці 11 визначте парціальний тиск насиченої пари  $P_H$  при температурі “сухого” термометра.
5. Користуючись формулою (1), визначте абсолютну вологість  $P_C$ .
6. За таблицею 11 визначте парціальний тиск насиченої пари при температурі “мокрого” термометра  $P_M$ ; з допомогою барометра визначте атмосферний тиск  $H$  і за формулою (5) обчисліть сталу психрометра.
7. Перевірте отримане значення  $A$ . Для цього підставте його у формулу (4) і знайдіть абсолютну вологість  $P_C$ . Порівняйте це значення з отриманим із формули (1).

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть явища випаровування та конденсації.
3. Яку пару називають насиченою? Що таке перенасичена пара? Де вона використовується?
4. Поясніть явище кипіння рідини. Що таке перегріта рідина? Де вона використовується?

5. Яка розмірність сталої психрометра?
6. Які існують методи вимірювання вологості?
7. Дайте визначення абсолютної та відносної вологості. У яких одиницях вони вимірюються?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.271-278], [2, с.344-347], [5, с.442-462].
3. [1, с.271, 278], [3, с.472-474].
4. [1, с.271-278], [2, с.344-347, 356-361], [3, с.465-467, 472-476].
- 5, 6. [9, с.278-284], [10, с.220-224]
7. Інструкція до лабораторної роботи.

## Лабораторна робота N 6 Визначення критичної температури

**Прилади і матеріали.** Прилад Авенаріуса, електрична піч, термометр.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Аналізуючи ізотерми реального газу (рис.8), можна зробити висновок, що з підвищенням температури довжини горизонтальних ділянок ізотерм – ізобар, які відповідають станам рівноваги між рідиною та її насиченою парою, зменшуються. При певній температурі  $T_{кр}$  і тиску  $P_{кр}$  ці ділянки, вироджуються в точку К, яку називають *критичною*. Ця точка відповідає стану речовини в якому зникає різниця між рідиною та її насиченою парою. Такий стан називається *критичним станом*, а температура, що йому відповідає – *критичною температурою*. Відповідно тиск і питомий об'єм речовини у критичному стані

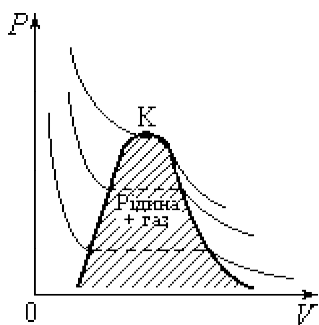


Рис.8.

називаються *критичним тиском* і *критичним об'ємом*.

Зобразимо рівновагу рідини і пари на діаграмі  $TV$  (рис.9). Станом одночасного рівноважного співіснування рідини і газу

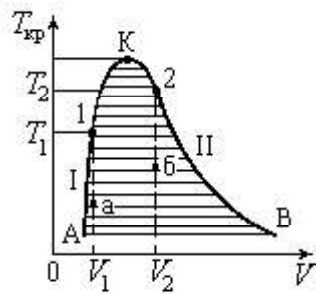


Рис.9

відповідає заштрихована область, а області I і II відповідають рідкому та газоподібному станам. Перевести рідину з двофазного стану "а" в однорідний можна не змінюючи її маси у герметичній ампулі. Для цього досить повільно підвищувати температуру в ампулі доти, доки поверхня розділу рідини і пари (меніск), повільно піднімаючись, не досягне верхньої межі ампули. Тоді стан речовини в ампулі буде однорідним – кипляча рідина з питомим об'ємом  $V_1$  і

температурою  $T_1$  (стан 1).

Якщо при певній температурі кількість рідини і пари в ампулі відповідає стану "б", то при нагріванні меніск зміститься вниз і при дотику до дна ампули речовина стає однорідною – насиченою парою з питомим об'ємом  $V_2$  і температурою  $T_2$  (стан 2).

Спостерігаючи переходи рідини у пару і пари у рідину в прозорій ампулі, можна визначити межі заштрихованої області (рис.9). Точка максимуму кривої АКВ є критичною точкою речовини (точка К).

В околі критичної точки – дуже розвинуті флуктуації густини (у різних точках об'єму густина речовини різна). Унаслідок цього речовина має каламутне білувато-сіре забарвлення через значне розсіювання світла в неоднорідному середовищі (критична опалесценція, назва від подібності розсіювання світла мінералом опалом).

З усіх величин, що характеризують критичну точку, найпростіше визначається критична температура. Для практичних потреб досить знати її з точністю  $\pm(0,1 \div 0,2) K$ . При цьому достатньо підтримувати речовину у квазірівноважних умовах, що

дає змогу спостерігати зникнення (появу) меніска у запаяній скляній ампулі. Цей метод запропонований М. П.Авенаріусом є найпростішим та найнадійнішим.

Прилад Авенаріуса (рис.10) являє собою металеву коробку 1 з двома отворами, через які проводиться спостереження. У цю

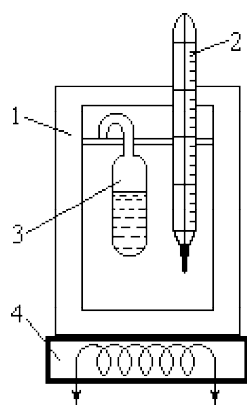


Рис. 10

коробку також поміщено термометр 2. Якщо з допомогою плитки 4 нагрівати ампулу 3 з ефіром, то зі збільшенням температури кривизна меніска зменшуватиметься і при критичній температурі він взагалі зникає. При цьому речовина в ампулі стає білувато-сірою. Спостерігати зникнення меніска в ампулі не вдається, якщо ефіру або мало, або багато. У першому випадку меніск, опускаючись, зникне раніше, ніж буде досягнута критична температура, оскільки весь ефір встигає випаруватись (стан 2 рис.9). У другому випадку ефір, розширюючись, заповнить ампулу раніше, ніж буде досягнута критична температура (стан 1 рис.9).

### Хід роботи

1. Помістіть прилад Авенаріуса на електроплитку та увімкніть її в мережу.
2. Спостерігаючи через скляне віконце за рідиною в ампулі, зафіксуйте за термометром температуру зникнення меніска і вимкніть електроплитку.
4. Зафіксуйте температуру появи меніска і критичної опалесценції.
5. Дослід проведіть 3 – 5 разів. За критичну температуру візьміть середнє арифметичне температур моментів зникнення та появи меніска.
6. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
7. Знаючи критичний тиск ефіру  $P_{кр} = 35 \text{ атм}$  та критичну температуру, за формулою

$$V_{кр} = \frac{3RT_{кр}}{8P_{кр}}$$

обчисліть критичний об'єм ефіру,  $R = 0,082 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

8. Обчисліть сталі Ван-дер-Ваальса для ефіру:

$$b = \frac{V_{кр}}{3}; \quad a = 27b^2 P_{кр} .$$

9. Перевірте рівняння Ван-дер-Ваальса для критичного стану

$$\left( P_{кр} + \frac{a}{V_{кр}^2} \right) (V_{кр} - b) = RT_{кр} .$$

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Що таке критичний стан речовини, критична температура?
3. Запишіть та поясніть рівняння Ван-дер-Ваальса. Який фізичний зміст поправок  $a$  і  $b$  у цьому рівнянні?
4. Як пов'язані критичні параметри речовини зі сталими Ван-дер-Ваальса? Що таке метастабільні стани?
5. Поясніть ізотерми Ван-дер-Ваальса.
6. Виведіть зведене рівняння Ван-дер-Ваальса. Сформулюйте закон відповідних станів.
7. Що таке критична опалесценція?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.228], [2, с.229], [3, с.383-384],[4, с.207-210].
3. [1,с.237-240,246-248],[2,с.221-225],[3,с.374-378],[4,с.203-204].
4. [1, с.243-244], [2, с.229], [3, с.384].
5. [1, с.240-243], [2, с.225-229], [3, с.383, 389].
6. [1, с.244], [2, с.236], [3, с.385].
7. [1, с.232], [4, с.210], [5, с.495-497].

## Лабораторна робота № 7

### Визначення теплоємності металів методом охолодження

**Прилади і матеріали.** Устаткування для визначення питомої теплоємності металів методом охолодження, термопара з мілівольтметром або електронним потенціометром, секундомір, досліджувані метали (мідь - еталонний зразок, залізо, алюміній та ін.), міліметровий папір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Кількість теплоти  $\Delta Q$ , що її віддає метал масою  $m$  при охолодженні на  $\Delta T$  градусів, визначається за формулою

$$\Delta Q = cm\Delta T, \quad (1)$$

де  $c$  - середня теплоємність металу в інтервалі температур  $\Delta T$ . Якщо охолодження відбувається протягом  $\Delta \tau$  секунд, то (1) можна записати так:

$$\Delta Q = cm \frac{dT}{d\tau} \Delta \tau, \quad (1a)$$

де  $\frac{dT}{d\tau}$  - швидкість охолодження металу.

Величину  $\Delta Q$  можна також обчислити на основі закону охолодження Ньютона

$$\Delta Q = \alpha(T_{II} - T_C)S\Delta \tau, \quad (2)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $Bm/(m^2 \cdot K)$ ;  $S$  - площа поверхні зразка;  $T_{II}$  і  $T_C$  - температури поверхні охолоджуваного зразка і навколишнього середовища (повітря) відповідно.

Прирівнюючи (1a) і (2), дістанемо

$$cm \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T_{II} - T_C)S. \quad (3)$$

У формулах (1) і (2) прийнято, що  $\frac{dT}{d\tau}$ ,  $\alpha$ ,  $T_{II}$  і  $T_C$  не залежать від

координат точок зразків металів.

Записавши (3) для двох зразків однакої форми та розмірів (еталонного та досліджуваного) і вважаючи, що  $T_{m1}=T_{m2}$ ,  $\alpha_1=\alpha_2$  (перше наближення) і температура  $T_C$  в обох випадках залишається однакою

$$c_1 m_1 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1 = \alpha (T_{m1} - T_C),$$

$$c_2 m_2 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2 = \alpha (T_2 - T_C),$$

поділимо перший вираз на другий і одержимо

$$c_1 = c_2 \frac{m_2 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2}{m_1 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1}, \quad (4)$$

де  $\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_1$  і  $\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_2$  - швидкості охолодження зразків металу при однаковій температурі. Їх визначають експериментально.

Отже питому теплоємність досліджуваного матеріалу  $c_1$  можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка, питома теплоємність якого відома при різних температурах.

С х е м а у с т а т к у в а н н я з о б р а ж е н а н а р и с . 11. Е л е к т р о п і ч А з м о н т о в а н а н а д в о х с п р я м о в у ю ч и х с т е р ж н я х ( н а р и с у н к у н е з о б р а ж е н і ), п о я к и х в о н а м о ж е

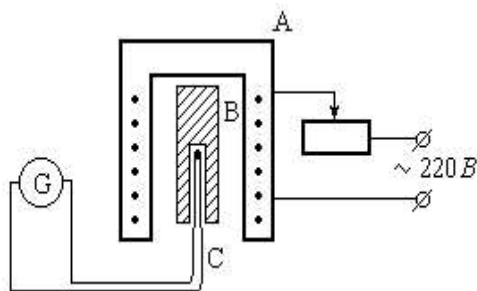


Рис. 11

переміщатись уверх і вниз. Зразок В являє собою циліндр завдовжки 50 мм і діаметром 15 мм, що має в одному кінці циліндричний отвір, у який введено спай хромель-копелевої або хромель-алюмелевої термопари С. Кінці термопари приєднано до мілівольметра G. При проведенні дослідів зразок поміщають у центральну частину робочого об'єму печі. Розміщення зразків під час нагрівання їх у печі залишається незмінним.

### Хід роботи

1. Помістіть еталонний зразок у піч та увімкніть її в електричну мережу. Нагрійте зразок до 500-600 °С. Після чого піч швидко підніміть і закріпіть гвинтами.
2. Зніміть кінетику охолодження. Для цього через кожні 10 с фіксуйте покази мілівольметра. Результати занесіть у таблицю.

№	$\tau, c$	$\varepsilon_{Cu}, mV$	$T_{Cu}, ^\circ C$	$\varepsilon_{Fe}, mV$	$T_{Fe}, ^\circ C$

Зразок охолодіть до 100 °С.

3. Переведіть мілівольти у градуси і побудуйте залежність  $T=f(\tau)$ .
4. Помістіть досліджуваний зразок у піч і повторіть для нього пп.1-3.
5. Графічним методом переведіть залежності  $T=f(\tau)$  у залежності

$\frac{dT}{d\tau} = \varphi(T)$ , для чого графіки залежностей  $T=f(\tau)$  розбийте на однакові близькі одна до одної ділянки вертикальними лініями, перпендикулярними осі абсцис. Різницею значень ординат кривих у точках їх перетину з вертикальними лініями визначатиметься різниця температур  $(T_1-T_2)$ ,  $(T_2-T_3)$  і т. д. для інтервалів часу  $\Delta\tau_1$ ,  $\Delta\tau_2, \dots$ , на які розбито вертикальними лініями вісь абсцис  $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau_3 = \dots = \Delta\tau$ . Відношення

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta \tau_1}; \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2 = \frac{T_2 - T_3}{\Delta \tau_1}; \dots$$

характеризують швидкість охолодження в даній точці кривої і,



отже, швидкість охолодження при даній температурі. Побудуйте

графік залежності  $\frac{dT}{d\tau} = \varphi(T)$ .

6. За формулою (4) визначте питому теплоємність  $c_1$  зразка при температурах, для яких з таблиці 14 відомі значення  $c_2$  еталонного зразка. При виконанні пп.5-6 заповніть таблиці.

$\Delta\tau$	$\Delta T = T_1 - T_2$	$T = \frac{\Delta T}{2} + T_2$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta\tau}\right)_{Cu}$	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta\tau}\right)_{Fe}$

$T$	
$c_2$	
$c_1$	

7. Побудуйте залежність  $c_1 = f(T)$ .

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Сформулюйте закон Ньютона для охолодження тіл.
3. Який фізичний зміст коефіцієнта теплообміну?
4. Які основні положення класичної теорії теплоємності твердих тіл? Укажіть границі застосування класичної теорії теплоємності.
5. Які основні положення квантової теорії теплоємності Ейнштейна? Які її недоліки?
6. Сформулюйте основні положення теорія теплоємності Дебая. Що таке температура Дебая?

### Рекомендована література

- 1-3. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.  
 4-6. [1, с. 321-334], [2, с. 460-465], [3, с. 224-232], [4, с. 80-93], [5, с.327-339].

## Лабораторна робота N 8

### Визначення відношення теплоємностей газу $C_p/C_v$ методом Клемана–Дезорма

**Прилади і матеріали.** Прилад для визначення відношення  $C_p/C_v$  методом адіабатного розширення, ручний нагнітальний насос.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Відношення питомих або молярних теплоємностей газу  $\gamma=C_p/C_v$  відіграє важливу роль при описі адіабатних процесів. Метод Клемана – Дезорма ґрунтується на адіабатному розширенні газів (у даному випадку повітря).

Основою приладу (рис.12) є великий скляний товстостінний балон А, сполучений гумовими трубками з U-подібним манометром В і через кран  $K_2$  з насосом С. Кран  $K_1$  сполучає балон з навколишнім повітрям.

У балон А, який наповнений повітрям при атмосферному тиску  $P_0$ , нагнітаємо повітря до деякого нового тиску. Тоді маса повітря в балоні, що займала певний об'єм, стиснеться до тиску  $P_1$  і займатиме об'єм  $V_1$ . Одночасно при цьому стиснена маса повітря нагріється. Припинивши накачування, зачекаємо кілька хвилин, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною  $T_1$  (перший стан повітря). Остаточну різницю рівнів рідини, що встановилась у манометрі, позначимо  $h_1$ .

Тоді  $P_1=P_0+\rho gh_1$  ( $\rho$  - густина манометричної рідини).

Відкриваємо на короткий час кран  $K_1$ . При цьому чути характерне шипіння, яке супроводжує витікання повітря через отвір у крані. Як тільки воно припиниться, швидко закриваємо кран  $K_1$ . Тиск

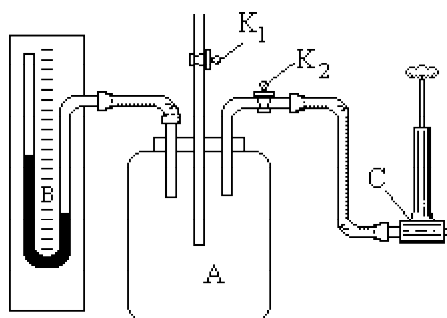


Рис. 12

у балоні зрівнявся з атмосферним ( $P_2=P_0$ ). Повітря в балоні швидко розширюється до об'єму  $V_2$  (при цьому, зважаючи на короткий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона і навколишнім повітрям не відбувається). Температура повітря в балоні зменшується до  $T_2$  (другий стан повітря). Чекаємо, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною  $T_1$ . Об'єм  $V_2$  залишається незмінним, тиск при нагріванні повітря збільшиться до  $P_3$ . Різниця рівнів рідини в манометрі при цьому буде  $h_2$ , тоді  $P_3=P_0+\rho gh_2$  (третій стан повітря).

Перехід повітря з першого стану до другого – адіабатний. Отже, за рівнянням Пуассона

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma. \quad (1)$$

Температура повітря у першому та третьому станах однакова, тому за законом Бойля – Маріотта маємо

$$P_1V_1 = P_3V_2. \quad (2)$$

Прологарифмувавши (1) і (2) та розв'язавши їх відносно  $\gamma$ , маємо

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg P_1 - \lg P_3}. \quad (3)$$

Розкладемо  $\lg P_1$  і  $\lg P_3$  в ряд Тейлора і обмежимося двома першими членами розкладу. Тоді одержимо

$$\begin{aligned} \lg P_1 &= \lg(P_0 + \rho gh_1) = \lg P_0 + \frac{\rho gh_1}{P_0} + \dots, \\ \lg P_3 &= \lg(P_0 + \rho gh_2) = \lg P_0 + \frac{\rho gh_2}{P_0} + \dots \end{aligned}$$

Підставивши ці результати в (3) і врахувавши, що  $P_2=P_0$ , остаточно отримаємо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (4)$$

Всі розглядувані процеси в балоні віднесені до сталої маси повітря, яке було в балоні до початку дослідів.

### Хід роботи

1. Відкривши кран  $K_2$  (кран  $K_1$  закритий), насосом накачайте у балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини. Зафіксуйте різницю рівнів  $h_1$ , що остаточно встановилася у манометрі після охолодження нагрітого при стискуванні повітря до температури навколишнього середовища.
2. Відкрийте кран  $K_1$  і закрийте його у той момент, коли припиниться характерне шипіння (тиск у посудині дорівнюватиме атмосферному). Через 2 – 3 хв зафіксуйте різницю рівнів  $h_2$ .
3. За формулою (4) обчисліть  $\gamma$  для повітря і порівняйте з теоретичним для двоатомного газу.
4. Дослід повторіть не менше 10 разів при різних показах манометра.
5. Отримані результати занесіть у таблицю, обчисліть середнє значення  $\gamma$  і похибки вимірювань.

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Дайте визначення теплоємності ідеального газу. Виведіть рівняння Майєра. Чому  $C_p > C_v$ ?
3. Дайте визначення адіабатного процесу. Як його здійснити? Виведіть рівняння Пуассона.
4. Дайте визначення ідеального газу. Сформулюйте газові закони. Наведіть відповідні графіки.
5. Чому дорівнюють теплоємності ідеального газу при ізотермічному та адіабатному процесах?
6. В координатах  $PV$  накресліть діаграми термодинамічних процесів, які відбуваються під час експерименту.

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.132-140], [2, с.103-114], [3, с.67-76].
3. [1, с.142], [2, с.118-121], [3, с.75], [4, с.102-105].
4. [2, с.18, 35-39], [3, с.35-37], [5, с.42], [4, с.29-32].
5. [3, с.78].

**Лабораторна робота N 9**  
**Визначення відношення питомих**  
**теплоємностей газу  $C_p/C_v$  за швидкістю**  
**поширення звуку в газі**

**Прилади і матеріали.** Звуковий генератор ГЗ-18, телефон, електронний осцилограф, підсилювач низької частоти.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** При поширенні звукової хвилі у газоподібному середовищі стиск і розрідження окремих його частин змінюють одне одного настільки швидко, що теплообмін між ними не встигає відбуватися. Такі процеси є адіабатними і описуються рівнянням Пуассона

$$PV^\gamma = const, (\gamma=C_p/C_v). \quad (1)$$

Швидкість поширення звукової хвилі у газах залежить від показника адіабати  $\gamma$ . Ця залежність визначається за формулою

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}$$

з якої

$$\gamma = \frac{v^2 \mu}{RT}, \quad (2)$$

де  $\mu=29$  г/моль – молярна маса повітря,  $T$  – абсолютна температура,  $R$  – універсальна газова стала.

Швидкість поширення звуку в повітрі можна також визначити за його частотою  $\nu$  та довжиною хвилі  $\lambda$

$$v = \lambda \nu. \quad (3)$$

Для визначення  $\lambda$  використовується метод стоячої хвилі. Якщо взяти заповнену повітрям трубу діаметром  $d < \lambda/2$ , закрити з одного кінця і у якій поширюється звукова хвиля, то при накладанні падаючої і відбитої від закритого кінця труби хвиль утвориться стояча хвиля з таким розподілом зміщень:

$$\varepsilon = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t, \quad (4)$$

де  $A$  – амплітуда падаючої хвилі,  $x$  – координата точки середовища, до якої за час  $t$  дійшли коливання. Амплітуда стоячої

хвилі визначається виразом  $2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ . Цей вираз доводить,

що вона залежить від координати  $x$  точок середовища. Точки середовища, у яких амплітуда коливань часток найбільша, називають пучностями. Положення пучностей, як видно з (4), визначається умовою

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \pi n, \text{ де } n \in \mathbb{Z},$$

або в іншому вигляді

$$x = \pm \frac{\lambda}{2} n. \quad (5)$$

Із (5) випливає, що відстань між двома сусідніми пучностями дорівнює половині довжини хвилі

$$L = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Отже,

$$\lambda = 2L. \quad (7)$$

Підставляючи (7) у (3), одержуємо

$$v = 2Lv \quad (8)$$

і робоча формула для знаходження  $\gamma$  набуває вигляду

$$\gamma = \frac{4L^2 v^2 \mu}{RT}. \quad (9)$$

Устаткування (рис.13) складається з кварцевої труби  $T$ , джерелом звуку у якій є телефон  $F$ , що живиться від звукового генератора  $ЗГ$ . Звукові коливання сприймаються мікрофоном  $M$ , перетворюються у електромагнітний сигнал і після підсилення

підсилювачем низької частоти ПНЧ подаються на блок вертикально відхиляючих пластин осцилографа ЕО. При вимкненому блоці розгортки на екрані осцилографа спостерігається вертикальна лінія.

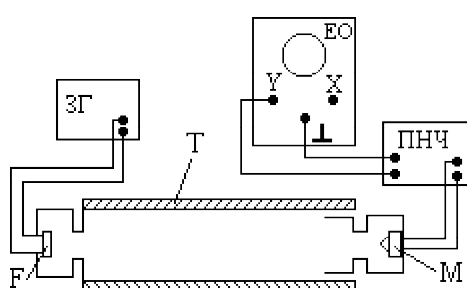


Рис. 13

### Хід роботи

1. Увімкніть ЗГ, осцилограф та ПНЧ і дайте їм можливість прогрітися протягом кількох хвилин.
2. При частоті  $2,5 \text{ кГц}$  отримайте чітке зображення вертикальної лінії на екрані осцилографа (при вимкненому блоці розгортки осцилографа).
3. Пересуваючи мікрофон уздовж осі труби, знайдіть таке його положення, при якому лінія на екрані осцилографа матиме максимальну довжину. Це означає, що положення мікрофона відповідає пучності зміщення.
4. Продовжуючи пересувати мікрофон уздовж труби, знайдіть положення сусідньої пучності. Відстань між цими пучностями  $L$  дорівнює половині довжини хвилі. Знайдіть положення, не менше чотирьох пучностей.
5. Обчисліть похибки прямих вимірювань  $L$ .
6. За формулою (9) обчисліть  $\gamma$ . Температуру  $T$  визначте за допомогою лабораторного термометра.
7. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.
8. Змініть частоту звукової хвилі. Виконайте пп. 3,4,6. Покажіть, що  $\gamma$  не залежить від частоти хвилі, що поширюється.

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Дайте визначення теплоємності ідеального газу. Виведіть рівняння Майєра.
3. Чому  $C_p > C_v$ ?

4. Дайте визначення адіабатного процесу. Як його здійснити? Виведіть рівняння Пуассона.
5. Дайте визначення ідеального газу. Сформулюйте газові закони. Наведіть відповідні графіки.
6. Чому дорівнюють теплоємності ідеального газу при ізотермічному та адіабатному процесах?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.132-140], [2, с.103-114], [3, с.67-76].
3. [2, с.103-114].
4. [1, с.142], [2, с.118-121], [3, с.75], [4, с.102-105].
5. [2, с.18, 35-39], [3, с.35-37], [4, с.29-32], [5, с.42].

## Лабораторна робота № 10 Визначення коефіцієнта тепловіддачі при конвекції

**Прилади і матеріали.** Устаткування, таблиця для переведення мілівольтів у градуси Цельсія.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Процес теплопередачі від одного тіла до іншого може здійснюватися шляхом *випромінювання*, *конвекції* та *теплопровідності*. При передачі тепла у рідкому або газоподібному середовищі основну роль відіграє конвекція, оскільки теплопровідність газів і рідин (за винятком рідких металів) мала.

Кількість тепла, що передається шляхом конвекції з одиниці поверхні тіла, що має температуру  $T_1$ , за одиницю часу у навколишнє середовище з температурою  $T_2$  можна виразити формулою

$$Q_K = \alpha_K(T_1 - T_2), \quad (1)$$

де  $\alpha_K$  – коефіцієнт тепловіддачі. Взагалі кажучи, він є складною функцією параметрів середовища (густини, в'язкості, теплоємності



та ін.), форми тіла і температури.

Кількість теплоти  $Q_L$ , яка випромінюється тілом з температурою  $T_1$  з одиниці поверхні за одиницю часу, визначається за формулою Больцмана

$$Q_L = A\sigma T_1^4. \quad (2)$$

Тут  $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)$  – стала випромінювання,  $A$  – коефіцієнт, що характеризує поглинаючу здатність тіла. Максимальну поглинаючу здатність має так зване абсолютно чорне тіло, яке поглинає всі падаючі на нього промені. Для нього  $A=1$ . Для всіх інших тіл  $A < 1$ . При теплообміні кожне тіло не тільки випромінює, але й поглинає енергію випромінену іншими тілами. При умові, що поверхня  $S_1$  тіла з температурою  $T_1$  значно менша від поверхні  $S_2$  тіла з температурою  $T_2$  (при  $T_1 > T_2, S_1 \ll S_2$ ), маємо

$$Q_L = A\sigma(T_1^4 - T_2^4), \quad (3)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що характеризує поглинаючу здатність тіла з температурою  $T_1$ .

Якщо врахувати можливість теплообміну як конвекцією, так і випромінюванням, то для повної кількості теплоти, що її втрачає тіло, отримуємо

$$Q = Q_K + Q_L = (\alpha_K + \alpha_L)(T_1 - T_2) = \alpha(T_1 - T_2), \quad (4)$$

де

$$\alpha_L = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

коефіцієнт тепловіддачі з допомогою випромінювання,  $\alpha = \alpha_K + \alpha_L$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі. Приведені вирази справедливі для стаціонарного процесу тепловіддачі, у якому температури  $T_1$  і  $T_2$  підтримуються сталими.

Метою даної роботи є експериментальне визначення коефіцієнтів  $\alpha_K$  і  $\alpha_L$  та встановлення залежності  $\alpha$  від різниці температур  $T_1 - T_2$ .

Устаткування (рис.14) складається з горизонтальної мідної трубки  $T$ , всередині якої по осі натягнута ніхромово дротина,

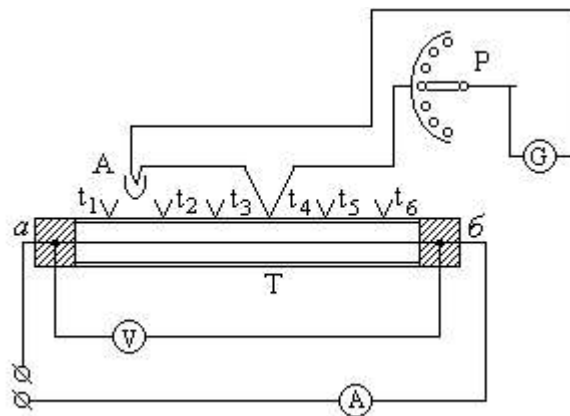


Рис. 14

закріплена у корках *a* і *б*. Дротина відіграє роль нагрівника – по ній проходить електричний струм. Мідна трубка нагрівається і віддає тепло навколишньому середовищу. Для вимірювання температури зовнішньої поверхні трубки на ній на однакових відстанях одна від одної закріплено 6 термопар (мідь – константан). Холодні спаї термопар поміщені у посудину *A* і знаходяться при кімнатній температурі. З допомогою перемикача *P* будь-яка термопара може бути замкнута на мілівольтметр *G*.

#### Хід роботи

1. Подайте струм  $1,2\text{ A}$  у коло нагрівника.
2. Перемикаючи мілівольтметр по черговому на всі термопари, слідкуйте за його показами. Через деякий час покази термопар перестають змінюватись. Це означає, що кількість теплоти, отримана від нагрівника, дорівнює кількості теплоти, яку віддає трубка у повітря, тобто процес є таким, що встановився.
3. Після того, як процес встановиться, зафіксуйте покази всіх термопар і знайдіть середнє значення термо-е.р.с. За таблицею для переведення мілівольтів у градуси Цельсія визначте різницю

температур поверхні трубки і навколишнього середовища  $\Delta T = T_1 - T_2$ . Далі за формулою

$$\alpha = \frac{UI}{\pi dl(T_1 - T_2)} \quad (6)$$

знайдіть коефіцієнт сумарної тепловіддачі. При цьому знехтуйте потоком тепла через торці трубки. У формулі (6):  $U$  – напруга у колі нагрівника (у вольтах),  $I$  – сила струму (у амперах),  $d$  – зовнішній діаметр трубки ( $d=0,012$  м),  $l$  – довжина трубки ( $l=1,22$  м).

4. За формулою (5) обчисліть коефіцієнт тепловіддачі при випромінюванні, враховуючи, що для міді  $A=0,70$ .  $T_2 = t_k + 273^\circ$ ,  $T_1 = t_k + 273^\circ + \Delta T$ , де  $t_k$  – кімнатна температура.

5. Знаючи  $\alpha$  та  $\alpha_L$  за формулою  $\alpha_K = \alpha - \alpha_L$  визначте коефіцієнт тепловіддачі при конвекції.

6. Повторіть експеримент при вищих температурах. Для цього подайте більший струм о коло нагрівника. Рекомендовані значення сили струму 1,6 та 2 А. Необхідно слідкувати за тим, щоб процес тепловіддачі при кожному вимірюванні був таким, що встановився.

7. Результати представте у вигляді графіків  $\alpha = f_1(T_1 - T_2)$  і  $\alpha_K = f_2(T_1 - T_2)$ .

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Які існують види теплопередачі? Поясніть явище теплопровідності у газах і у твердих тілах. У чому принципова відмінність між переносом тепла у газах і твердих тілах?
3. Виведіть формулу для коефіцієнта стаціонарної теплопровідності у газах.
4. Як залежить коефіцієнт теплопровідності газів від параметрів стану?
5. Що таке тепловий потік? У яких одиницях він вимірюється? Який тепловий потік називається стаціонарним?
6. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? В яких одиницях він вимірюється?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.363, 385], [2, с.160-165, 469-471], [4, с.152-165].
3. [2, с.165-167], [4, с.168-169], [5, с.138-141].
4. [2, с.167-168].
5. [2, с.161-162].
6. [2, с.162], [5, с.135-138].

## Лабораторна робота № 11

### Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини віскозиметром Оствальда - Пінкевича

**Прилади і матеріали.** Термостат, віскозиметр Оствальда – Пінкевича, секундомір, різні рідини (дистильована вода, розчини етилового спирту різних концентрацій), термометр.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Серед методів вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини широкого поширення набув метод витікання рідини через капіляри. Він ґрунтується на використанні рівняння Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8 \eta l}, \quad (1)$$

де  $V$  – об'єм рідини, що протекла за час  $t$  через капіляр радіуса  $r$  і довжиною  $l$ ;  $\Delta P$  – різниця тисків на кінцях капіляра;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості рідини. Рівняння (1) справджується для ламінарної течії рідини при значному часі протікання (100 с і більше). Відомо, що для кожного капіляра в залежності від його радіуса існує критична швидкість витікання  $v_{кр}$ , вище якої течія рідини переходить у турбулентну. За Рейнольдсом  $v_{кр} \leq \eta / \rho r$ , де  $\rho$  – густина рідини. Вимірявши у процесі досліду об'єм та інші величини, що входять у (1), можна визначити коефіцієнт в'язкості рідини  $\eta$ .

Метод Пуазейля значно спрощується, якщо вимірювати

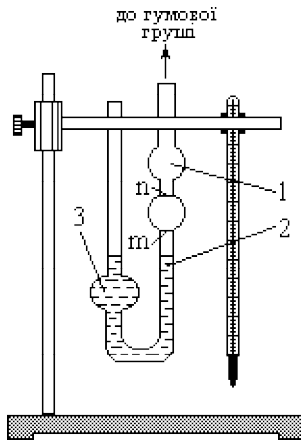


Рис. 15

коефіцієнт в'язкості рідини відносним способом. При цьому досить виміряти час протікання однакового об'єму різних рідин через той самий капіляр та узяти відношення відповідних рівностей за законом Пуазейля (1). Для двох різних рідин маємо

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\Delta P_2 t_2}{\Delta P_1 t_1}, \quad (2)$$

звідки, знаючи коефіцієнт в'язкості еталонної рідини, визначаємо коефіцієнт в'язкості досліджуваної рідини.

Віскозиметр Оствальда – Пінкевича являє собою U-подібну скляну трубку (рис. 15). Одне коліно має кулясте розширення 1, обмежене двома позначками n і m для відрахунку об'єму досліджуваної рідини і впааний капіляр 2. Друге коліно з розширенням 3 призначене для зливання рідини, що протікає через капіляр. Спочатку у це коліно вливають певний об'єм рідини (однаковий у дослідах з різними рідинами), а потім за допомогою гумової груші рідину засмоктують у розширення 1. Далі вимірюють час протікання рідини через капіляр.

Оскільки рідина витікає через капіляр унаслідок різниці рівнів у колінах віскозиметра (ця різниця однакова у дослідах з різними рідинами), то замість відношення тисків, під якими витікають рідини, можна взяти відношення їхніх густин:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\rho_2 g \Delta h}{\rho_1 g \Delta h} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (3)$$

З урахуванням (3), (2) перепишеться у вигляді

$$\frac{\eta_2}{\rho_2} = \frac{\eta_1 t_2}{\rho_1 t_1},$$

тобто

$$v_2 = v_1 \frac{t_2}{t_1}, \quad (4)$$

де

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (5)$$

коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини. Отже, капілярним віскозиметром безпосередньо вимірюють кінематичну в'язкість. Щоб забезпечити сталу температуру у дослідах, віскозиметр поміщають у термостат.

### **Вправа 1. Визначення залежності кінематичної в'язкості розчину етилового спирту від концентрації**

#### **Хід роботи**

1. Промийте віскозиметр дистильованою водою та помістіть його вертикально у термостат. Влийте у широке коліно віскозиметра певну кількість дистильованої води – еталонної рідини. Рідина повинно бути достатньо для того, щоб заповнити розширення над капіляром.
2. За допомогою гумової груші заповніть розширення над капіляром так, щоб рівень рідини у ньому був трохи вищий від верхньої позначки **n**. Затискачем перекрийте трубку від гумової груші.
3. Відпустіть затискач і у момент проходження меніском рідини верхньої позначки **n** увімкніть секундомір, а у момент проходження нижньої позначки **m** вимкніть його. Визначте час протікання еталонної рідини крізь капіляр.
4. Дослід повторіть 3 – 5 разів і обчисліть похибки прямих вимірювань.
5. Виконайте пп. 1 – 4 з досліджуваними рідинами – розчинами етилового спирту концентрації 5; 10; 15; 20%.
6. Термометром визначте температуру.
7. З таблиць 9 і 10 визначте коефіцієнт в'язкості еталонної рідини  $\eta_1$  та її густину  $\rho_1$  для даної температури і за формулою (5) обчисліть її кінематичну в'язкість  $\nu_1$ .

8. За формулою (4) визначте кінематичну в'язкість розчинів етилового спирту. Результат подайте у вигляді графіка  $\nu = \nu(n)$ .
9. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.

## **Вправа 2. Визначення залежності в'язкості рідини від температури**

### **Хід роботи**

1. Промийте віскозиметр дистильованою водою, влийте у широке коліно певну масу дистильованої води і помістіть віскозиметр вертикально у термостат. Виконайте пп. 2,3,6,7 з попередньої вправи.
2. Увімкніть термостат і доведіть температуру до  $85^{\circ}\text{C}$ .
3. Вимкніть термостат. Для температур 80, 70, 60, 50,  $40^{\circ}\text{C}$  виконайте пп. 2, 3 з попередньої вправи і за формулою (4) визначте кінематичну в'язкість дистильованої води при різних температурах.
4. Побудуйте графік залежності  $\nu = \nu(t)$ .

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть природу в'язкості рідин.
3. Що таке динамічна і кінематична в'язкість. У яких одиницях вимірюються коефіцієнти динамічної та кінематичної в'язкості? Який між ними зв'язок?
4. Поясніть температурну залежність коефіцієнта в'язкості  $\nu = \nu(t)$ .
5. Поясніть залежність в'язкості розчину етилового спирту від концентрації  $\nu = \nu(n)$ .

### **Рекомендована література**

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.387], [2, с.319-330], [5, с.378-384].
3. [1, с.387], [7, с.255-256], [8, с.148].
4. [1, с.387], [5, с.380-382].
5. [2, с.171-173], [5, с.384].

## Лабораторна робота № 12

### Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя та середньої довжини вільного пробігу молекул повітря

**Прилади і матеріали.** Устаткування для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя повітря, секундомір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Для газів, як і для рідин, коефіцієнт внутрішнього тертя для стаціонарної ламінарної течії визначається за формулою Пуазейля

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 V l}. \quad (1)$$

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів коефіцієнт  $\eta$  визначається за формулою

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle, \quad (2)$$

де  $\rho$  - густина газу при даній температурі;  $\langle v \rangle$  і  $\langle \lambda \rangle$  - середня арифметична швидкість і середня довжина вільного пробігу молекул відповідно.

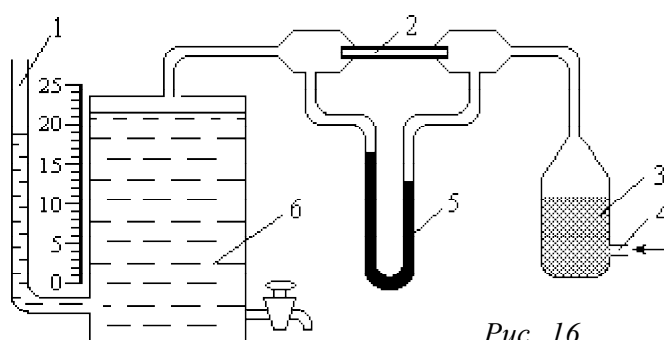


Рис. 16



Оскільки

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (3)$$

де  $R$  – універсальна газова стала;  $\mu=29$  г/моль – молярна маса повітря і

$$\rho = \frac{\mu P}{RT}, \quad (4)$$

де  $P$  – тиск газу, то

$$\langle \lambda \rangle = 1,88 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}. \quad (5)$$

Схему устаткування зображено на рис.16, де 2 – капіляр ( $l=16$  см,  $r=0,035$  см), 5 – водяний манометр, 3- висушувальний фільтр з  $CaCl_2$ , 6 – аспіратор, 1 – мірна посудина, 4 – трубка, через яку засмоктується повітря. Коли з аспілятора витікає вода, внаслідок зниження тиску через капіляр 2 засмоктується повітря, яке проходить попередньо через фільтр 3. Різниця тисків на кінцях капіляра, зумовлена внутрішнім тертям, вимірюється манометром 5. Об'єм повітря  $V$ , який за час  $\tau$  проходить через капіляр, вимірюється за допомогою мірної посудини по об'єму рідини, яка витекла з аспілятора.

### Хід роботи

1. Відкрийте кран аспілятора. Вимірювання починайте після встановлення стаціонарної течії повітря через капіляр, коли покази манометра  $\Delta P = \rho g \Delta h$  перестануть змінюватися.
2. Після встановлення показів манометра увімкніть секундомір і зафіксуйте час  $\tau$ , протягом якого у мірну посудину витече з аспілятора  $V=0,5$  л води. Цей об'єм дорівнює об'єму газу, що протік через капіляр за час  $\tau$ .
3. Дослід повторіть не менше трьох разів. Оцініть похибки прямих вимірювань  $V$ ,  $\tau$ ,  $\Delta h$ .

4. Визначте температуру  $T$  і тиск  $P$  за показами лабораторного термометра і барометра та за формулою (4) обчисліть  $\rho$ .
5. За формулами (1) і (5) обчисліть  $\eta$  і  $\lambda$ .
6. Похибки непрямих вимірювань обчисліть для  $\eta$  за формулою (1).
7. Після отримання величини коефіцієнта в'язкості переконайтеся, що він вимірювався при ламінарному протіканні повітря крізь капіляр. Для цього оцініть число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_{\Gamma} \rho d}{\eta}, \quad (6)$$

де  $d$  – діаметр капіляра,  $\rho$  - визначається за формулою (4), а швидкість протікання газу через капіляр  $v_{\Gamma}$  за формулою

$$v_{\Gamma} = \frac{V}{\pi r^2 \tau}. \quad (7)$$

Рух буде ламінарний, якщо  $\text{Re} < 2000$ .

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть природу сил в'язкості у газах.
3. Виведіть формулу (2).
4. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя газів від параметрів стану?
5. Як залежить середня довжина вільного пробігу молекул газу від тиску і температури?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [2, с.171-173], [5, с.141-143], [8, с.206].
3. [2, с.174-175], [4, с.169-172], [5, с.143-145], [8, с.207-208].
4. [2, с.167-168], [5, с.145-146], [8, с.208].
5. [2, с.138-139], [8, с.196-199].

## Лабораторна робота № 13

### Визначення коефіцієнта теплопровідності металів

**Прилади і матеріали.** Устаткування, таблиця для переведення мілівольтів у градуси Цельсія.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Розподіл температури  $T$  уздовж стержня, який нагрівається з одного кінця і вісь якого збігається з віссю  $Ox$ , можна отримати з диференційного рівняння виду

$$\frac{d^2T}{dx^2} = a^2(T - T_0), \quad (1)$$

причому

$$a^2 = \frac{\alpha P}{\lambda S}. \quad (2)$$

Тут  $T_0$  – температура навколишнього середовища,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $P$  – периметр поперечного перерізу стержня,  $S$  – площа поперечного перерізу стержня,  $\lambda$  – шуканий коефіцієнт теплопровідності. Розв’язок цього рівняння має вигляд

$$T - T_0 = Ae^{ax} + Be^{-ax}.$$

Вважаючи, що при  $x=0$  температура  $T=T_1$ , а сам стержень має нескінченну довжину, тобто при  $x \rightarrow \infty$   $T=T_0$ , одержимо:

$$T - T_0 = (T_1 - T_0) \cdot e^{-ax},$$

звідки

$$a = \frac{1}{x} \ln \frac{T_1 - T_0}{T - T_0}. \quad (3)$$

Кількість теплоти, яка проходить через поперечний переріз стержня залежить від відстані  $x$  цього перерізу до кінця стержня, що нагрівається. Ця залежність записується у вигляді диференційного рівняння:

$$\frac{dq}{dx} = \alpha P(T_1 - T_0) \cdot e^{-\alpha x}. \quad (4)$$

Інтегруючи його за  $x$  у межах від 0 до  $\infty$ , одержимо:

$$q = \frac{\alpha P}{a}(T_1 - T_0) \quad (5)$$

і, урахувавши (2), знаходимо, що

$$\lambda = \frac{q}{aS(T_1 - T_0)}. \quad (6)$$

На практиці неможливо мати стержень нескінченної довжини. Тому знайдемо величину похибки, якої ми припускаємося, вважаючи, що стержень має довжину  $l$  (у даній роботі  $l=113$  см). З рівняння (4), інтегруючи його від  $x=l$  до  $x=\infty$ , отримаємо

$$\Delta q = \frac{\alpha P}{a}(T - T_0)e^{-\alpha l}. \quad (7)$$

З урахуванням (5), цей вираз перепишеться у вигляді:

$$\Delta q = q \cdot e^{-\alpha l} \quad (8)$$

і визначатиме величину шуканої похибки.

У даній роботі визначається коефіцієнт теплопровідності латунного стержня один кінець якого нагрівається в електричній пічці (рис. 17). Кількість теплоти, яку віддає піч за одиницю часу, визначається за формулою  $Q=I_0U_0$ , де  $U_0$  та  $I_0$  – напруга та сила

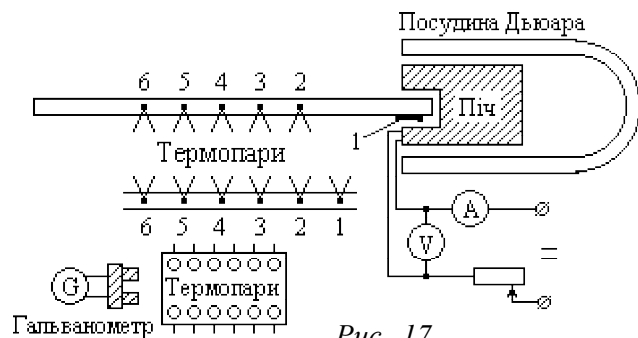


Рис. 17

струму у колі пічки відповідно. Температура кінця стержня у печі  $T_1$  визначається термопарою 1. Теплота  $Q$  витрачається на створення теплового потоку  $q$ , який зумовлює теплопровідність стержня, та на нагрівання середовища навколо пічки  $q_1$ , так що  $Q=q+q_1$ . Якщо видалити стержень з печі та, регулюючи її нагрівання, отримати у ній таку ж температуру  $T_1$ , яка була у ній із стержнем всередині, то, очевидно, кількість теплоти, яка віддається навколишньому середовищу буде  $q_1=I_1U_1$ , де  $I_1$  та  $U_1$  – сила струму і напруга у колі печі без стержня. Отже,

$$q = I_0U_0 - I_1U_1. \quad (9)$$

Для зменшення похибки при визначенні  $q$  необхідно, щоб  $q_1 \ll q$ , тому піч поміщають у посудину Дьюара. Температура стержня  $T$  вимірюється термопарами 2-6. Термопара 1 знаходиться у печі. Відстані від кінця стержня до кожної з термопар подано у таблиці

№	2	3	4	5	6
$x, \text{ см}$	15	23	32,2	41,3	50,7

Температура навколишнього середовища  $T_0$  дорівнює кімнатній температурі. Оскільки один кінець кожної термопари знаходиться при температурі  $T_0$ , то *покази термопар відповідають різниці температур  $T-T_0$ .*

### Хід роботи

1. Штангенциркулем виміряйте діаметр стержня і обчисліть похибки прямих вимірювань.
2. За формулою  $S=0,25\pi d^2$  обчисліть площу поперечного перерізу стержня і оцініть похибки опосередкованих вимірювань.
3. Встановіть кінець стержня так, щоб він щільно входив у отвір печі й увімкніть піч.

**Увага! На пічку не подавайте більше 30 V!**

Під'єднуючи по чергово термопари до мілівольметра, потрібно слідкувати за їх показами. Подальші вимірювання проводять після встановлення теплової рівноваги, тобто коли покази всіх термопар перестануть змінюватися

4. Запишіть покази шести термопар після встановлення теплової рівноваги та покази вольтметра й амперметра ( $U_0$  та  $I_0$ ).
5. Витягніть стержень з печі.
6. Зменшуючи силу струму у колі печі, потрібно домогтися попередніх показів термопар 1, що знаходиться у печі. Запишіть покази вольтметра та амперметра ( $U_1$  та  $I_1$ ).
7. За формулою (9) обчисліть  $q$ .
8. У прямокутній системі координат по осі абсцис відкласти відстані від термопар до кінця стержня  $x_i$ , а по осі ординат – величини  $\ln \frac{T_1 - T_0}{T_i - T_0}$ , де різниця  $T_i - T_0$  визначається за показами

$i$  - тої термопарі, яка знаходиться на відстані  $x_i$  від кінця стержня.

Побудуйте пряму, яка описується рівнянням

$$a \cdot x = \ln \frac{T_1 - T_0}{T - T_0}.$$

З цього графіка, усереднюючи його, знайдіть кутовий коефіцієнт  $a$  даної прямої.

9. За формулою (6), урахувавши (9), обчисліть шуканий коефіцієнт  $\lambda$ .
10. За формулою (8) обчисліть  $\Delta q$ .
11. Обчисліть похибки вимірювання величини  $\lambda$ , вважаючи її функцією двох параметрів  $q$  та  $S$ .

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Які існують види теплопередачі? Поясніть явище теплопровідності у газах і у твердих тілах. У чому принципова відмінність між перенесенням тепла у газах і твердих тілах?
3. Виведіть формулу для коефіцієнта стаціонарної теплопровідності у газах.
4. Як залежить коефіцієнт теплопровідності газів від параметрів стану?
5. Що таке тепловий потік? У яких одиницях він вимірюється? Який тепловий потік називається стаціонарним?

6. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? В яких одиницях він вимірюється?

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.363, 385], [2, с.160-165, 469-471], [4, с.152-165].
3. [2, с.165-167], [4, с.168-169], [5, с.138-141].
4. [2, с.167-168].
5. [2, с.161-162].
6. [2, с.162], [5, с.135-138].

## Лабораторна робота № 14

### Визначення питомої теплоти плавлення льоду

**Прилади і матеріали.** Калориметр, термометр, технічні терези з важками, чистий лід, фільтрувальний папір, електричний водонагрівач.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Щоб визначити питому теплоту плавлення льоду, певну його масу при  $0^{\circ}\text{C}$  вміщують у калориметр з водою. Внаслідок танення льоду температура води у калориметрі знижується. Щоб зменшити вплив теплообміну, масу води у калориметрі  $m_B$  і масу льоду  $m_L$  треба взяти у такому співвідношенні, щоб кімнатна температура  $t_K$  була середньою між початковою температурою води у калориметрі  $t_0$  і кінцевою температурою суміші  $\Theta$ . При цьому різниці температур  $t_0 - t_K$  і  $t_K - \Theta$  не повинні перевищувати  $3 - 5^{\circ}$ .

Процес плавлення льоду описується рівнянням теплового балансу

$$\lambda m_L + m_L c_B \Theta = (K + m_B c_B)(t_0 - \Theta), \quad (1)$$

де  $\lambda$  - питома теплота плавлення льоду;  $K$  - водяний еквівалент калориметра;  $c_B$  - питома теплоємність води. З (1) неважко знайти питому теплоту плавлення льоду

$$\lambda = \frac{(K + m_B c_B)(t_0 - \Theta) - m_D c_B \Theta}{m_D} \quad (2)$$

### Вправа 1. Визначення водяного еквівалента калориметра

Під водяним еквівалентом  $K$  будь-якого тіла розуміють кількість теплоти, необхідну для нагрівання його на  $1^\circ$ , яка чисельно дорівнює масі води, для нагрівання якої на  $1^\circ$  потрібна така ж кількість теплової енергії, як і для нагрівання тіла. При грубих вимірюваннях можна вважати, що рідина, калориметр і його допоміжні частини за час досліду не встигнуть віддати помітну кількість теплоти навколишньому середовищу.

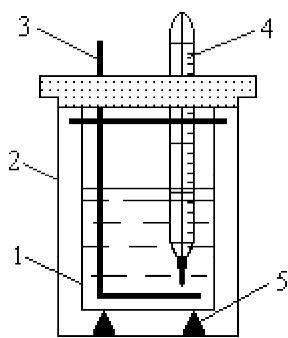


Рис. 18

Конструкція найпростішого калориметра наведена на рис.18. Посудина циліндричної форми 1 для запобігання контакту з навколишнім середовищем розміщена на теплоізоляційній підставці 5 у посудині 2 більших розмірів. Для вирівнювання температури рідини (води) по всьому об'єму користуються мішалкою 3. Термометром 4 вимірюють температуру рідини на початку і в кінці процесу теплообміну.

#### Хід роботи

1. Зважте на технічних терезах внутрішню частину калориметра разом з усіма її допоміжними частинами і знайти її масу  $m_K$ .
2. Наповніть внутрішню посудину до половини водою кімнатної температури і знову зважте. Нехай її маса з водою  $m_1$ . Знайдіть масу води, налітої у калориметр  $m = m_1 - m_K$ .
3. Помістіть внутрішню посудину калориметра у зовнішню, занурте у воду термометр та виміряйте її температуру  $t_1$ .
4. Електронагрівачем нагрійте в іншій посудині деяку кількість



води і термометром виміряйте її температуру  $t_2$ .

5. Влийте у калориметр таку кількість гарячої води, яка приблизно дорівнює половині кількості холодної води, яка уже міститься у калориметрі. Після цього перемішуйте воду у калориметрі до встановлення стану теплової рівноваги. Виміряйте кінцеву температуру суміші  $\Theta$ .

6. Зважте внутрішню посудину калориметра. Нехай тепер її маса  $m_2$ . Різниця  $m_2 - m_1 = m_3$  – це маса долитої у калориметр гарячої води. За формулою

$$K = \frac{m_3 c_B (t_2 - \Theta) - m c_B (\Theta - t_1)}{(\Theta - t_1)}$$

обчисліть водяний еквівалент калориметра. Питому теплоємність води  $c_B$  візьміть з таблиці 7.

## **Вправа 2. Визначення питомої теплоти плавлення льоду**

### **Хід роботи**

1. Визначте масу води у калориметрі  $m_B$  (п.2. вправа 1), термометром виміряйте її температуру  $t_0$ .
2. Шматочки льоду висушіть фільтрувальним папером і опустіть у калориметр. Температуру льоду перед цим доведіть до  $0^\circ\text{C}$ .
3. Помішуючи мішалкою воду в калориметрі, спостерігайте за зміною її температури. Найнижчу температуру води у калориметрі візьміть за  $\Theta$ .
4. Зважте калориметр. Масу взятого для дослідів льоду визначте як різницю мас води у калориметрі до  $m_B$  і після  $m_B'$  дослідів:  
 $m_L = m_B' - m_B$ .
5. За формулою (2) обчисліть  $\lambda$ .
6. Дослід повторіть тричі, кожний раз для різної маси льоду.
7. Виведіть формули для обчислення відносної та абсолютної похибок для  $\lambda$  і обчисліть ці похибки.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Що таке водяний еквівалент? Виведіть формулу для обчислення водяного еквівалента калориметра.
3. Поясніть процеси плавлення та кристалізації.
4. Що таке прихована теплота плавлення (кристалізації)?
5. Дайте визначення фазових переходів I та II роду. Наведіть приклади.
6. Виведіть рівняння Клапейрона – Клаузіуса та поясніть залежність температури фазового переходу від зовнішнього тиску.

### **Рекомендована література**

- 1, 2. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 3 – 5. [1, с.334-343], [2, с.436-449], [3, с.476-478], [4, с.284-291, 298-301, 314-315], [5, с.506-508, 516-521].
6. [1, с.234-235], [2, с.439], [4, с.293-295], [8, с.364-368].

## **Лабораторна робота № 15**

### **Визначення питомої теплоти і температури плавлення твердих кристалічних тіл методом зняття кривої охолодження**

**Прилади і матеріали.** Електрична піч, тигель з термопарою, мілівольтметр, досліджуваний матеріал, міліметровий папір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** При нагріванні кристала збільшується амплітуда коливань атомів у вузлах кристалічної ґратки, а отже, їх кінетична енергія. Це призводить до послаблення міжструктурних зв'язків і, врешті–решт, до руйнування кристалічної ґратки, внаслідок чого тіло стає рідким. Плавлення – це рівноважний фазовий перехід твердого кристалічного тіла у рідкий стан, який супроводжується поглинанням тепла. Температура плавлення – це температура рівноважного фазового переходу твердого тіла у рідкий стан при сталому тиску. Питома теплота плавлення  $\lambda$  - це кількість теплоти,

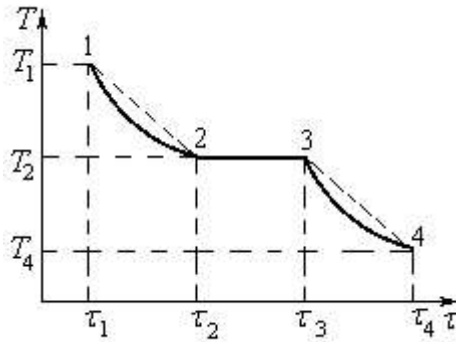


Рис. 19

яка потрібна для того, щоб розплавити одиницю маси кристалічної речовини, узяті при температурі плавлення. Одним з поширених методів визначення температури плавлення  $T_{пл}$  є метод зняття кривої плавлення  $T=f(\tau)$  при незмінних зовнішніх умовах. Оскільки  $T_{пл}$  сильно залежить від чистоти речовини, то для її визначення частіше користуються кінетикою кристалізації (йдеться про зняття кривої охолодження (рис.19). Ділянка 1-2 відповідає охолодженню тіла до початку кристалізації, 2-3 - кристалізації, а ділянка 3-4 - охолодженню твердого тіла. Температура  $T_2=T_{пл}$ .

Для визначення питомої теплоти плавлення (кристалізації) реальна крива кристалізації замінюється ідеалізованою (штрихові лінії на рис.19). Криву охолодження одержують з допомогою устаткування, схема якого зображена на рис.20.

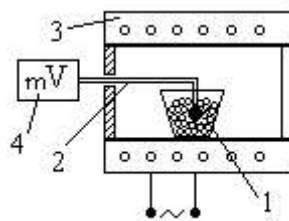


Рис. 20

Тигель з досліджуваною речовиною (оловом) 1 і термопарою 2 поміщено в електричну піч 3. Сигнал від термопари подається на мілівольтметр 4.

Кількість теплоти, що в середньому віддається тиглем та оловом, що кристалізується, (ділянка 1-2)

$$q_1 = \frac{Q_1}{\tau_2 - \tau_1} = (mc + m_1c_1) \frac{T_1 - T_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

де  $m$  і  $c$  - маса і питома теплоємність рідкого олова ( $c=2,66 \cdot 10^2$  Джс/(кг·К);  $m_1$  і  $c_1$  - маса і питома теплоємність тигля ( $c_1$  береться з таблиць).

Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу при кристалізації олова (ділянка 2-3)

$$q_2 = \frac{Q_2}{\tau_3 - \tau_2} = \frac{\lambda m}{\tau_3 - \tau_2}. \quad (2)$$

Кількість теплоти, що виділяється при охолодженні твердого олова (ділянка 3-4)

$$q_1 = \frac{Q_3}{\tau_4 - \tau_3} = (mc' + m_1c_1) \frac{T_2 - T_4}{\tau_4 - \tau_3}, \quad (3)$$

де  $c'=2,46 \cdot 10^2$  Джс/(кг·К) - питома теплоємність твердого олова. Величину  $q_2$  можна визначити як середнє арифметичне значень  $q_1$  і  $q_3$

$$q_2 = \frac{q_1 + q_3}{2} \quad (4)$$

за умови, що  $\tau_3 - \tau_2 = \tau_2 - \tau_1 = \tau_4 - \tau_3$ .

Підставивши (1) і (3) у (4) і, врахувавши (2), дістанемо:

$$\lambda = \frac{1}{2m} [(mc + m_1c_1)(T_1 - T_2) + (mc' + m_1c_1)(T_2 - T_4)]. \quad (5)$$

Процес кристалізації супроводжується зростанням впорядкованості системи, тобто зменшенням її ентропії

$$\Delta S = \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}. \quad (6)$$

З іншого боку, за формулою Больцмана

$$\Delta S = k \ln \frac{W_2}{W_1}, \quad (7)$$

де  $W_1$  та  $W_2$  - термодинамічні ймовірності твердого та рідкого

олова відповідно,  $k$  – стала Больцмана. Прирівнюючи (6) і (7), можна оцінити, у скільки разів зменшилось число мікростанів у даній масі олова при його кристалізації.

### Хід роботи

1. За допомогою терезів визначте маси олова  $m$  та тигля  $m_1$ .
2. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
3. Помістіть тигель з оловом і термопарою у піч та увімкніть її у мережу.
4. Після досягнення температури  $300^\circ\text{C}$  вимкніть піч і, записуючи покази мілівольтметра через кожні 10 с, зніміть залежність  $\varepsilon=f(\tau)$ , де  $\varepsilon(mV)$  - термо - е.р.с., що її фіксує потенціометр.
5. З допомогою таблиці 13 (див. додаток) переведіть мілівольти у градуси Цельсія і побудуйте графік залежності  $T=f(\tau)$ .
6. Для знаходження точок 1 і 4 (див. рис.19) відкладіть від точок  $\tau_2$  і  $\tau_3$ , що відповідають початку і закінченню кристалізації, вліво і вправо відрізки, що дорівнюють  $\tau_3 - \tau_2$ . Визначте з графіка температури  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_4$ , які відповідають точкам 1,2(3) і 4. За формулою (5) обчисліть  $\lambda$ .
7. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.
8. За формулою (6) знайдіть зміну ентропії олова при кристалізації.
9. Користуючись виразами (6) і (7), оцініть, у скільки разів термодинамічна ймовірність рідкого олова за температури плавлення більша за термодинамічну ймовірність твердого олова за тієї ж температури.

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть процеси кристалізації та плавлення.
3. Що таке прихована теплота плавлення (кристалізації)?
4. Дайте визначення фазових переходів I та II роду. Наведіть приклади.
5. Виведіть рівняння Клапейрона – Клаузіуса. Поясніть залежність температури фазового переходу від зовнішнього тиску.
6. Що таке ентропія системи? Як вона зв'язана з термодинамічною ймовірністю?

7. Поясніть фізичний зміст ентропії, як міри неупорядкованості системи?
8. Як змінюється ентропія при фазових переходах I та II роду? Чому?

#### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2,3,4. [1, с.334-343], [2, с.436-449], [3, с.449-453, 476-478], [4, с.284-291, 314-315], [5, с.506-508], [8, с.364-368].
5. [1, с.234-235], [4, с.293-295].
- 6,7. [2, с.290-297], [4, с.139-151], [5, с.183-191].
8. [4, с.293].

### Лабораторна робота № 16

#### Визначення швидкості випаровування рідини та зміни її ентропії при випаровуванні

**Прилади і матеріали.** Торсійні терези, секундомір, штангенциркуль, термометр, циліндрична посудина з етиловим спиртом, піпетка, різноважки.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** *Випаровуванням називається перехід речовини з рідкого стану у газоподібний з вільної поверхні рідини.* Покидаючи поверхню рідини, молекули повинні подолати сили молекулярного притягання і виконати роботу проти зовнішнього тиску. Це здатні зробити лише ті молекули, які мають достатню кінетичну енергію. Тому перехід молекул у пару супроводжується охолодженням рідини. Щоб випаровування відбувалось без зміни температури, до рідини треба підводити тепло. Кількість теплоти, яка необхідна для ізотермічного випаровування одиниці маси речовини, називається питомою теплою пароутворення. Для етилового спирту вона становить  $r=855 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Процес випаровування можна характеризувати швидкістю випаровування. Вона чисельно дорівнює масі рідини, що випарувалася з одиниці площі вільної поверхні за одиницю часу

$$U = \frac{4m}{\pi D^2 t}, \quad (1)$$

де  $m$  - маса рідини, яка перейшла у пару за час  $t$ ,  $D$  - діаметр циліндричної посудини з досліджуваною рідиною.

Перехід речовини з однієї фази в іншу (плавлення, кристалізація, випаровування, конденсація) називається фазовим переходом. Фазові переходи бувають першого і другого роду. При фазових переходах першого роду термодинамічні функції такі, як вільна енергія, внутрішня енергія, ентальпія, ентропія, змінюються стрибкоподібно. Для фазових переходів I роду (у даному випадку випаровування) зміну ентропії можна обчислити за формулою

$$\Delta S = \frac{r \cdot m}{T}, \quad (2)$$

де  $\Delta S$  – зміна ентропії,  $T$  – абсолютна температура переходу,  $r$  – питома теплота випаровування,  $m$  – загальна маса рідини, що випарувалася.

Швидкість випаровування етилового спирту настільки значна, що з допомогою торсійних терезів можна прослідкувати за зменшенням маси рідини з часом та виміряти масу рідини, що випарувалася за час  $t$ .

### Хід роботи

1. За допомогою штангенциркуля виміряйте внутрішній діаметр посудини та обчисліть похибки прямих вимірювань.
2. Легенько поверніть ліву ручку терезів і переконайтеся, що шкала вільно рухається. Визначте ціну поділки шкали.
3. За допомогою піпетки помістіть у посудину 2-3 краплі спирту.
4. Приведіть терези у робочий стан. Для цього потрібно перемикач, розміщений справа, поставити у положення "0". (Якщо перемикач знаходиться у положенні "Z" – терези вимкнені).
5. Повільно повертаючи ліву ручку, добийтеся, щоб, чорна рухома стрілка розмістилася навпроти червоної риски. У цей момент увімкніть секундомір і зчитайте покази  $M_1$  на основній шкалі.

6. Дуже повільно повертаючи ліву ручку терезів, старайтеся втримати рухому стрілку навпроти червоної риски. Через кожні 60 с тричі зчитайте з основної шкали покази  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ .
7. Визначте масу спирту, що випаровувалася за кожну хвилину  $m_i = M_{n+1} - M_n$ . Обчисліть похибки прямих вимірювань.
8. За формулою (1) визначте швидкість випаровування.
9. Обчисліть похибки непрямих вимірювань величини  $U=U(m,D,t)$ , узявши при цьому для часу  $t$  систематичну абсолютну похибку.
10. За допомогою лабораторного термометра визначте температуру  $T$  і обчисліть зміну ентропії за формулою (2).
11. Обчисліть кількість молекул, що випарувалася би при даній швидкості випаровування з  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$

$$N = \frac{U}{\mu} N_A,$$

де  $\mu$  - молярна маса спирту ( $C_2H_5OH$ ),  $N_A$  – число Авогадро.

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Виведіть нерівність Клаузіуса. Дайте визначення ентропії.
3. У чому полягає фізичний зміст ентропії? Дайте пояснення того, що ентропія є мірою знецінення теплової енергії.
4. Виведіть формули для зміни ентропії у різних процесах. Розглянути ізопроееси в газах, адіабатний процес, політропний процес, нагрівання та охолодження речовини, фазові переходи I та II роду.
5. Що таке термодинамічна ймовірність макростану? Як вона зв'язана з ентропією? Запишіть формулу Больцмана. Чому ентропію можна характеризувати як міру неупорядкованості системи?
6. Поясніть статистичний характер II начала термодинаміки. Сформулюйте третє начало термодинаміки.



### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
2. [1, с.173-175], [2, с.271-275], [3, с.119-121, 126-128], [4, с.127-130], [5, с.176-177].
3. [3, с.149-151], [4, с.127-129].
4. [3, с.128-129], [4, с.293], [5, с.177-179].
5. [2, с.290-297], [4, с.139-145], [5, с.183-191].
6. [1, с.177], [4, с.142-145].
7. [2, с.301], [3, с.316-318], [8, с.291-298].

### Лабораторна робота № 17 Ознайомлення зі статистичними закономірностями на механічних моделях

**Прилади і матеріали.** Устаткування, сипучий матеріал, міліметровий папір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Молекулярно – кінетична теорія розглядає тіла як такі, що складаються з величезної кількості молекул у яких неперервно і хаотично змінюються швидкості, імпульси, енергія, електричні та магнітні моменти, тощо. Вивчення макроскопічних систем, що складаються з багатьох часток методами класичної механіки призводить до непереборних труднощів розрахунку. Тому до таких систем застосовують статистичний метод досліджень, який дозволяє зробити висновок про стан та поведінку макроскопічних об'єктів.

Велика сукупність випадкових подій та величин підпорядковується так званим *статистичним законам*. Ці закони дають можливість визначати ймовірність, з якою відбувається та чи інша подія у серії випадкових однотипних подій, середні значення у серії вимірюваних величин, найімовірніші відхилення від середнього значення та ін. Усі ці характеристики визначаються законом розподілу випадкових величин – залежністю ймовірності появи даної величини від значення самої величини.

Найпоширенішим у природі законом розподілу є *нормальний*

**закон розподілу** (закон Гаусса). Цей закон має місце у тому випадку, коли випадкова величина залежить від великої кількості факторів, які можуть з однаковою ймовірністю призводити до появи додатних та від'ємних відхилень від деякого середнього значення. Прикладом такого розподілу може бути розподіл випадкових похибок при вимірюванні фізичних величин.

Кількість вимірювань  $\Delta N$  у яких відхилення від середнього значення вимірюваної величини знаходиться у межах від  $x$  до  $x+\Delta x$  пропорційне інтервалу  $\Delta x$  та повному числу вимірювань  $N$ . Функція

$$y = \frac{\Delta N}{N\Delta x} = f(x) \quad (1)$$

називається **законом розподілу** або **густиною ймовірності величини  $x$** . Одержимо закон нормального розподілу.

Нехай у кожне вимірювання входить  $n$  елементарних похибок однакової величин  $\delta$ , кожна з яких з однаковою ймовірністю  $1/2$  може мати знак або "+", або "-". Ймовірність того, що усі  $n$  елементарних похибок увійдуть у вимірювання зі знаком "+" дорівнює  $y_0 = (1/2)^n$ , тобто дорівнює добутку ймовірностей кожної з  $n$  похибок. Результируюча похибка у цьому випадку дорівнює  $x_0 = n\delta$ . Ймовірність такої події, коли  $m$  елементарних похибок з  $n$  мають від'ємний знак, а решта  $(n-m)$  – додатний, дорівнює

$$y_m = C_n^m \left(\frac{1}{2}\right)^m \left(\frac{1}{2}\right)^{n-m} = C_n^m \left(\frac{1}{2}\right)^n, \quad \text{де} \quad C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} -$$

кількість всеможливих комбінацій з  $n$  похибок за кількістю від'ємних похибок  $m$ . Сума додатних похибок буде  $(n-m)\delta$ , а від'ємних  $-m\delta$ . Величина відповідної результируючої похибки  $x_m = (n-m)\delta - m\delta = (n-2m)\delta$ . Залежність густини ймовірності у появи похибки від величини похибки  $x$  являє собою ступінчасту криву. При зменшенні елементарних похибок  $\delta$  і при збільшенні їх кількості  $n$  так, щоб величина  $n\delta$  наближалась до скінченної границі, ступінчаста крива наближається до плавної.

Знайдемо аналітичний вираз цього розподілу при  $\delta \rightarrow 0$ . Дотична до кривої визначається границею відношення  $\Delta y / \Delta x$  при  $\delta \rightarrow 0$ :

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{m+1} - y_m}{x_{m+1} - x_m} = -\frac{y_m}{2\delta} \cdot \frac{n-2m-1}{m+1} \approx -\frac{y_m}{2\delta} \cdot \frac{n-2m}{m},$$

тому що  $m \gg 1$ . Оскільки  $x_m = (n-2m)\delta$ , то  $2m = n - x_m/\delta$  і

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{y_m x_m}{\delta^2 n - \delta x_m}.$$

При  $\delta \rightarrow 0$   $n\delta^2$  прямує до постійної границі, яку позначимо  $1/(2h^2)$ . Тоді

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\delta \rightarrow 0} -\frac{y_m x_m}{\delta^2 n - \delta x_m} = -2h^2 xy.$$

Розв'язуючи дане диференціальне рівняння, одержимо

$$y = A e^{-h^2 x^2}.$$

Нормуючи цей вираз на одиницю і враховуючи, що

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-h^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{h}, \text{ знаходимо } A = \frac{h}{\sqrt{\pi}}.$$

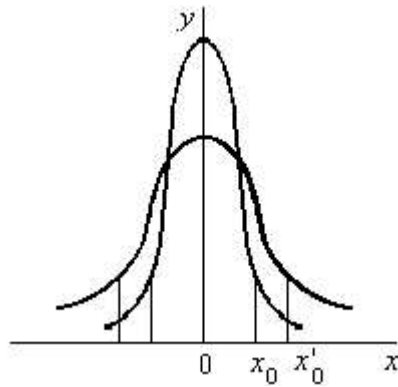


Рис. 21

Остаточно для закону нормального розподілу отримуємо вираз

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}, \quad (2)$$

де  $x$  – відхилення вимірюваної величини від її середнього значення, а  $y$  – густина ймовірності появи похибки величиною  $x$  (див. рис. 21). Величина  $h$  – називається мірою точності. Вона визначається зі

співвідношення

$$y(x_0) = y\left(\frac{1}{h}\right) = \frac{1}{e} y_{\max}. \quad (3)$$

Чим більша міра точності  $h$ , тим менше  $x_0$ , тобто чим менше відхилення результатів вимірювання від середнього значення тим більша точність вимірювань.

До інших характеристик розподілу належать: середня арифметична похибка  $\langle x \rangle$  та середня квадратична похибка  $\sigma$ , які зв'язані з мірою точності співвідношеннями

$$\langle x \rangle = \frac{1}{\sqrt{\pi h}}; \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{2h}}. \quad (4)$$

Нормальний закон розподілу вивчається за допомогою механічної моделі, яка відтворює картину випадкових відхилень частинок від середнього положення унаслідок накладання великої кількості рівноймовірних елементарних похибок (рис. 22).

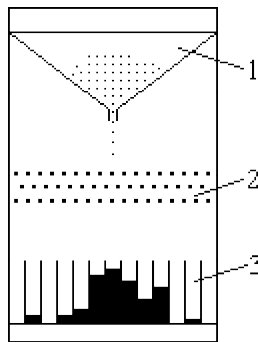


Рис. 22

Сипучий матеріал (пшоно, яке модулює кількість вимірювань) з воронки 1 сиплеться на ряд сіток 2, які відхиляють частинки від вертикального напрямку і модулюють кількість факторів, що впливають на величину похибки. Розсіяне зерно збирається у касеті 3 з вузькими комірками і дає уявлення про характер розподілу випадкових відхилень від вертикалі. Прямокутна воронка має внизу вузьку щілину шириною 2–3 мм. З воронки падає вузький потік зерен. Сітки зроблені зі сталевих струн, натягнутих на рамки паралельно щілині воронки на відстані 7 мм одна від одної. Сітки розміщені на держаку одна під одної так, що струни кожної наступної знаходяться під серединою проміжка попередньої. При зіткненні зерна зі струною відбувається елементарне відхилення вправо або вліво з однаковою ймовірністю. Таким чином відтворюється закон нормального розподілу випадкових відхилень від вертикалі у площині перпендикулярній щілині воронки і струнам

(одномірний розподіл). Касета 3 має прозорі стінки, що дозволяє виміряти висоту рівня зерна у кожній комірці

### Хід роботи

1. Вставте у держак три сітки так, щоб центральна струна верхньої сітки знаходилась під центром воронки. У такий спосіб модулюється мала кількість факторів, які впливають на величину випадкових похибок.
2. Акуратно сипте зерно у воронку доти, доки центральні комірці ящика 3 не заповняться до верху.
3. Лінійкою виміряйте рівень зерна у кожній комірці в міліметрах. Очевидно, що рівень зерна  $y_i$  в  $i$  – тій комірці пропорційний кількості зерен, які потрапили до комірки. Величина відхилення  $x_i$  – є відстань  $i$  – тої комірки від середньої, яка знаходиться безпосередньо під щілиною, а інтервал між комірками  $\Delta x$  приймається за одиницю.
4. Результати вимірювань нанести на графік розподілу зерен по комірках  $y_i = f(x_i)$ .
5. Вставте у держак 6 сіток так, щоб їх струни були зсунуті на півперіоду. У такий спосіб модулюється велика кількість факторів, які впливають на величину випадкових похибок. Висипте у воронку **тільки те зерно**, яке було в касеті після виконання попереднього досліду. Виконайте пп. 2-4.
6. За результатами вимірювань і обчислень заповніть таблицю

$x_i$	$x_i^2$	$y_i$	$yx_i^2$

7. Для серії експериментальних даних, зведених у таблицю, обчисліть міру точності за формулою

$$h = \sqrt{\frac{\sum_i y_i}{2 \sum_i (y_i x_i^2)}} .$$

8. З даною мірою точності за формулою (2) побудуйте теоретичну криву та нанесіть її на той самий графік, що побудований при виконанні пп. 4 і 5. Значення функції  $y$  за формулою (2) розрахуйте для значень  $x = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 5; \pm 10$ . Переконайтеся, що експериментальні криві якісно збігаються з теоретичною, тобто нормальний розподіл має місце, якщо кількість дослідів велика (зерна багато).

9. Через 6 сіток просипте 20 - 30 зернин. Так модулюється мала кількість дослідів при великій кількості факторів, що впливають на величину випадкових похибок.

10. Порахуйте кількість зерен у кожній комірці касети та побудуйте графік, відкладаючи по осі абсцис номер комірки, а по осі ординат – кількість зерен у даній комірці. Переконайтеся, що при малій кількості вимірювань (зерна мало) розподіл Гаусса не виконується.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Виведіть закон нормального розподілу і дайте йому характеристику.
3. Запишіть розподіл Максвелла і дайте йому характеристику.
4. Виведіть формули для найімовірнішої, середньої арифметичної та середньої квадратичної швидкостей.
5. Виведіть та поясніть розподіл Больцмана.
6. Який зміст має функція розподілу.
7. Як визначається середнє значення фізичної величини у випадку, коли вона змінюється неперервно і для неї відома функція розподілу?
8. У чому полягає статистичний метод досліджень?

### **Рекомендована література**

- 1,2. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
3. [4, с.38-44].
- 4,7. [1, с.69-70], [4, с.44-46].
5. [3, с.274-280].
6. [1, с.21-29], [2, с.60-63].
9. [1, с.11-19].

## Лабораторна робота № 18

### Градування термопар

**Прилади і матеріали.** Хромель–алюмелева термопара, електрична піч, тиглі, олово, свинець, дистильована вода, парафін, мілівольтметр, міліметровий папір.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Термоелектричний метод вимірювання температури базується на відкритому у 1821 р. Зеебеком явищі термоелектрики (ефект Зеебека). Якщо два провідники А і В, виготовлені з різних металів, спаяти так, щоб утворився замкнений контур, а місця спайки помістити у середовища з різними температурами  $T_1$  і  $T_2$ , то у контурі виникне електричний струм. Два провідники, які є термоелектродами, утворюють термопару. Один зі спаїв, поміщений у середовище з вимірюваною температурою, називається робочим (гарячим) кінцем термопар, другий, який перебуває при постійній відомій температурі, називається вільним (холодним). Зазвичай, вимірюється не значення струму, а різниця потенціалів, тобто термоелектрорушійна сила  $\varepsilon$  (термоерс) між розімкненими холодними кінцями провідників, або у розриві між частинами одного з термоелектродів.

**Термопара**, складена з однієї пари провідників, називається простою і *служить для вимірювання різниці температур* між гарячим і холодним спаями. Схема під'єднання простої термопар до вимірювального пристрою приведена на рис. 23.

Диференційну термопару можна представити у вигляді двох однакових термопар, що з'єднані між собою однорідними провідниками (рис. 24). При нагріванні робочих спаїв диференційної термопарі струми, які виникають у термопарах, що її складають, будуть напрямлені назустріч один одному. Ці струми, як і термоерс, будуть залежати головним чином від матеріалу провідників і різниці температур робочих спаїв  $T_1$  і  $T_2$  та холодного  $T_0$ , тобто від  $T_1 - T_0$  і  $T_2 - T_0$ . Якщо холодні спаї термопар будуть утримуватись при сталій температурі, а робочі матимуть однакову температуру  $T_1 = T_2$ , то електрорушійні сили  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  також будуть

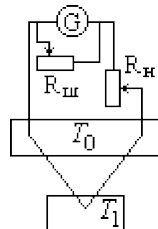


Рис. 23

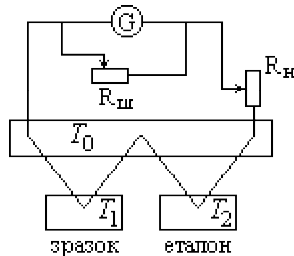


Рис. 24

однакові й у колі термопарі струму не буде, оскільки струми у складових термопарах взаємно компенсуються.

Якщо ж температура спаю  $T_1$  буде більшою за температуру спаю  $T_2$ , то й  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ . Тоді у колі термопарі виникне різниця термоерс і гальванометр, увімкнений у коло термопарі, покаже відхилення від нульового положення. Якщо ж  $T_2 > T_1$ , то й  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  і стрілка гальванометра відхилиться в інший бік.

Недоліком диференційної термопарі є те, що для запису одночасно температури і різниці температур необхідно застосовувати просту термопару разом з диференційною.

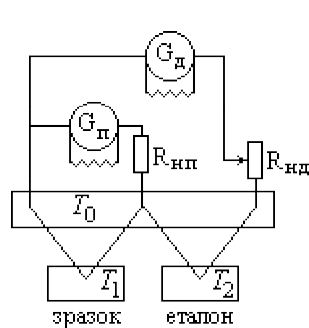


Рис. 25

Комбінована термопара (рис. 25) відрізняється від диференційної тим, що у ній одна з простих термопар, які складають диференційну, використовується для одночасного вимірювання температури зразка. Для цього у місця спаювання однойменних провідників припаюють мідний провідник з допомогою якого в коло першої термопарі під'єднують другий гальванометр.

**Експериментальне визначення залежності термоерс, що виникає у термопарі, від різниці температур на її кінцях, називається градуюванням термопарі.** Градуювання термопарі проводять шляхом порівняння її показів з еталонними термопарами або за реперними точками. Як реперне точки використовують температури



плавлення або кипіння чистих речовин, які є постійними при заданих умовах (зазвичай, нормальних). У даній роботі як реперні точки використовують температури кипіння води ( $100^{\circ}\text{C}$ ), плавлення олова ( $231,9^{\circ}\text{C}$ ) та свинцю ( $327,3^{\circ}\text{C}$ ). Для градування термопарі треба знати, яка термоерс відповідає заданим реперним точкам. У її визначенні і полягає мета даної роботи.

### Хід роботи

1. Помістіть в електричну піч тиглі з дистильованою водою, оловом і свинцем та увімкніть піч в електричну мережу.
2. Коли вода закипить, занурте в неї робочий спай термопарі і з допомогою мілівольтметра виміряйте термоерс, що виникає у термопарі -  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ .
3. Спеціальним пінцетом **обережно** вийміть тигель з оловом із печі. Помістіть гарячий спай термопарі у тигель і переконайтеся, що мілівольтметр показує не менше  $10 \text{ mV}$ . Це означає, що олово нагрілось вище температури плавлення.
4. Зніміть кінетику охолодження. Для цього через кожні  $10 \text{ c}$  записуйте покази мілівольтметра, поки вони не стануть такими, що дорівнюють  $5 \text{ mV}$ .
5. За отриманими даними побудуйте криву охолодження (залежність термоерс від часу).
6. Проробіть пп. 3 – 5 для свинцю у межах від  $15$  до  $9 \text{ mV}$ . За положенням горизонтальних ділянок на кривих охолодження олова та свинцю визначте значення термоерс, що відповідають різниці між температурами кристалізації (плавлення) цих металів та кімнатною температурою ( $t_{\text{пл}} - t_{\text{к}}$ ).
7. Знаючи температури кристалізації олова, свинцю, температуру кипіння води та термоерс, що їм відповідають, побудуйте графік залежності термоерс від різниці температур на її кінцях ( $\varepsilon = f(\Delta T)$ ). Кімнатну температуру виміряйте лабораторним термометром.
8. Нагрійте у печі тигель з аморфною речовиною (парафін) і зніміть для неї кінетику охолодження, здійснюючи вимірювання кожні  $20 \text{ c}$ , поки парафін повністю не затвердне. Побудуйте криву охолодження парафіну.

### Контрольні запитання та завдання

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Поясніть процеси кристалізації та плавлення.
3. Що таке прихована теплота плавлення (кристалізації)?
4. Дайте визначення фазових переходів I та II роду. Наведіть приклади.
5. Виведіть рівняння Клапейрона – Клаузіуса. Поясніть залежність температури фазового переходу від зовнішнього тиску.
6. Поясніть криву охолодження парафіну.

### Рекомендована література

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2,3,4. [1, с.334-343], [2, с.436-449], [3, с.449-453, 476-478], [4, с.284, 314-315], [5, с.506-508], [8, с.364-368].
5. [1, с.234-235].
6. [4, с.312-313].

### Лабораторна робота № 19 Визначення модуля Юнга

**Прилади і матеріали.** Устаткування з набором вантажів, сталевий стержень, стремено для підвішування вантажів, масштабна лінійка, штангенциркуль, вимірювальний мікроскоп.

**Теоретичні відомості та опис приладів.** Визначити модуль Юнга можна методом прогину стержня, який обома кінцями опирається на тверді опори і навантажений посередині вантажем певної ваги. Дія цієї сили викликає деформацію прогину (рис. 26). У цьому випадку величина деформації характеризується так

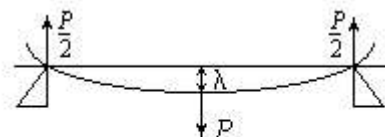


Рис. 26

званою стрілою прогину  $\lambda$ , тобто тою відстанню, на яку опускається точка прикладання сили, що діє на стержень. Знаючи стрілу прогину  $\lambda$ ,

модуль Юнга можна знайти за формулою:

$$E = \frac{Pl^3}{4\lambda ab^3}, \quad (1)$$

де  $P$  – сила, яка викликала деформацію (прогин);  $l$  – відстань між ребрами опорних призм на які спирається стержень;  $a$  – ширина поперечного перерізу стержня;  $b$  – його висота.

Застосування формули (1) можливе лише за умови, що стержень має прямокутний переріз і згинаюча сила діє паралельно тій стороні перерізу, яка входить у знаменник у третьому степені.

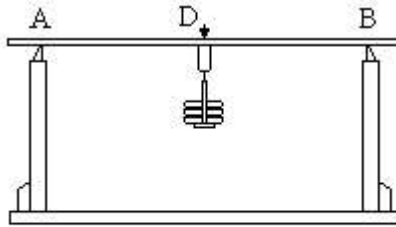


Рис. 27

Прилад для визначення модуля Юнга (рис. 27) складається з масивної платформи з двома стійками на кінцях та мікроскопа з окулярним мікрометром. На стійках закріплено сталеві призми А і В так, що їх ребра

паралельні між собою.

### Хід роботи

1. Виміряйте штангенциркулем ширину і висоту стержня не менше ніж у трьох місцях.
2. Масштабною лінійкою виміряйте відстань між ребрами опорних призм А і В (див. рис. 27;  $l=AB$ ).
3. Обчисліть похибки прямих вимірювань.
4. Розмістіть стержень на опорах так, щоб його середина D збігалася з серединою відстані між опорами.
5. Визначте ціну поділки шкали окулярного мікрометра. Для цього наведіть мікроскоп на міліметрову шкалу масштабної лінійки і порахуйте, скільки поділок шкали мікроскопа  $n$  вкладається у 1 мм цієї шкали. Ціна поділки шкали мікроскопа обчислюється за формулою  $K = 1/n$  мм.

6. Встановіть мікроскоп горизонтально з допомогою установочних гвинтів.
7. Сумістіть нульову поділку окулярної шкали мікроскопа з верхнім краєм стержня за допомогою кремальєри.
8. Навантажте стремено вантажем масою 1 кг.
9. Визначте, на скільки поділок  $m$  окулярної шкали прогнувся верхній край стержня. Обчисліть стрілу прогину при навантаженні за формулою

$$\lambda = m \cdot K .$$

10. Зніміть навантаження. Визначте, на скільки поділок  $m'$  окулярної шкали відрізняється положення верхнього краю стержня у порівнянні з встановленим нульовим положенням. Визначте стрілу прогину при розвантаженні за формулою

$$\lambda' = (m - m') \cdot K .$$

11. Визначте стрілу прогину при навантаженні стержня вантажем масою 1 кг як середнє арифметичне з  $\lambda$  і  $\lambda'$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda + \lambda'}{2} .$$

12. За формулою (1) обчисліть модуль Юнга.
13. Обчисліть похибки опосередкованих вимірювань.
14. Навантажте стержень вантажем масою 2 кг і повторіть пп. 9 – 12.
15. Навантажте стержень вантажем масою 3 кг і повторіть пп. 9 – 12.

Якщо величина стріли прогину така, що виходить за межі окулярної шкали, то для її визначення треба користуватися шкалою на стійці мікроскопа. У цьому випадку наводять горизонтальну лінію шкали мікроскопа на верхній край стержня і записують покази шкали на стійці мікроскопа (нульове положення). Навантажують стержень і за допомогою кремальєри знову суміщають горизонтальну лінію окулярної шкали з верхнім краєм стержня. Зчитують покази шкали на стійці (перше положення). Різниця показів у першому і нульовому положеннях буде стрілою прогину при навантаженні. Знімають навантаження. Наводять горизонтальну лінію шкали мікроскопа на верхній край стержня і

зчитують покази шкали (друге положення). Різниця показів у першому і другому положеннях буде стрілою прогину при розвантаженні.

Для обчислення модуля Юнга зручно порахувати величину

$$const = \frac{l^3}{4ab^3},$$

яка не залежить від величини навантаження. Тоді формула (1) набуде вигляду

$$E = const \cdot \frac{P}{\lambda}.$$

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Хід виконання роботи, похибки експерименту.
2. Які деформації називають пружними, пластичними? Поясніть їх механізми. Які існують типи деформацій?
3. Що таке механічна напруга?
4. Поясніть криву деформації розтягу. Запишіть закон Гука для деформації розтягу.
5. У чому полягає фізичний зміст модуля Юнга? У яких одиницях він вимірюється?
6. Що таке абсолютна і відносна деформація зсуву? Запишіть закон Гука для деформації зсуву. Який фізичний зміст модуля зсуву?
7. Що таке коефіцієнт Пуассона? Як він зв'язаний з модулем Юнга та модулем зсуву?

### **Рекомендована література**

1. Інструкція та звіт про лабораторну роботу.
- 2, 5. [2, с.416-422, 426-432], [4, с.273].
3. [4, с.270].
4. [2, с.425-429], [4, с.270-272], [5, с.345-349].
- 6, 7. [2, с.421-422], [4, с.272-273], [5, с.355-363].

## Додаток

Таблиця 1. Основні фізичні константи

Константа	Позначення	Числове значення
Швидкість світла	$c$	$3 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м <sup>2</sup> ·кг <sup>-2</sup>
Стала Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Стала Лошмідта	$L$	$2,69 \cdot 10^{25}$ м <sup>-3</sup>
Універсальна газова стала	$R$	8,314 Дж/(моль·К)
Стандартний об'єм газу	$V_m$	$22,42 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /моль
Елементарний заряд	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Питомий заряд електрона	$e/m_e$	$1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Стала Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Атомна одиниця маси	<i>a.o.m.</i>	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Електрична стала	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Стала Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Таблиця 2. Швидкість звуку в газах при ( $t=0^\circ\text{C}$ )

Середовище	$v$ , м/с
Азот	333,63
Водень	1286
Вуглекислий газ	260,3
Гелій	970
Кисень	314,84
Повітря (сухе)	331,46

Таблиця 3. Коефіцієнти Стьюдента

n	$\alpha$					
	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
25	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
30	0,85	1,31	1,70	2,05	2,46	2,75
35	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73
40	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
45	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69
50	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68
$\infty$	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67

Таблиця 4. Деякі теплофізичні коефіцієнти твердих тіл. Питома теплоємність  $C$  при  $18^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  при  $18^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ ; температура плавлення  $t_{\text{пл}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ; питома теплота плавлення  $r$ ,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Речовина	$C$	$\lambda$	$t_{\text{пл}}$	$r$
Алюміній	96	209	660,1	3,97
Залізо, чисте	465	58,5	1535	2,77
Олово	218	65	231,9	0,596
Свинець	130	34,7	327,3	0,230
Чавун	540	50	1200	–
Цинк	389	111	419,5	1,11
Фарфор	800	1,4	–	–
Шамот	840	0,04	–	–
Цегла	920	0,7	–	–

Таблиця 5. Густини речовин  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$

Гази за нормальних умов ( $T=273,15\text{ K}$ ,  $P=1,01\cdot 10^5\text{ Па}$ )

Азот	1,250	Кисень	1,429
Водень	0,089	Метан	0,717
Вуглекислий газ	1,977	Неон	0,900
Гелій	0,178	Повітря	1,293

**Рідини**

Бензол ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )	879	Скипидар ( $t=16^{\circ}\text{C}$ )	858
Вода ( $t=4^{\circ}\text{C}$ )	1000	Спирт етиловий ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )	789
Вода ( $t=100^{\circ}\text{C}$ )	958	Спирт метиловий ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )	792
Гас ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )	800	Толуол ( $t=18^{\circ}\text{C}$ )	870
Гліцерин ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )	1260	Ртуть ( $t=0^{\circ}\text{C}$ )	13596



**Тверді тіла при 293 К ( $\rho, 10^3$  кг/м<sup>3</sup>)**

Алюміній	2,69	Олово лите	7,23
Залізо	7,86	Сталь лита	7,7 - 8,0
Латунь	8,3 - 8,7	Свинець	11,22 - 11,44
Лід ( $t=0^\circ\text{C}$ )	0,91	Срібло	10,42 - 10,57
Мідь	8,88 - 8,96	Цинк	6,86 - 7,24
Нікель	8,4 - 9,2	Чавун	6,6 - 7,3

**Таблиця 6. Пружні властивості твердих тіл**

Модуль Юнга  $E$ ,  $10^{10}$ Па; модуль зсуву  $G$ ,  $10^{10}$ Па; коефіцієнт Пуассона  $\mu$ ; границя міцності  $\sigma_\mu$ ,  $10^8$ Па.

Матеріал	$E$	$G$	$\mu$	$\sigma_\mu$
Алюміній	6,1 - 7,4	2,2 - 2,6	0,33	0,98 - 3,90
Залізо	20 - 22	6,9 - 8,3	0,28	3,90 - 5,90
Сталь	20 - 22	7,8 - 8,1	0,28	4,9 - 15,7
Чавун	7,4 - 17,6	4,9	0,23 - 0,27	1,17 - 1,27
Латунь	7,8 - 9,8	2,6 - 3,6	0,3 - 0,4	0,98 - 4,90
Мідь	10 - 13	3,8 - 4,7	0,31 - 0,40	1,56 - 4,41
Свинець	1,5 - 1,7	0,54	0,44	0,0196

**Таблиця 7. В'язкість ( $\eta$ ) та теплопровідність ( $\chi$ ) газів.**  
(Температура 20 °С, тиск 101 кПа)

Речовина	$\eta$ , $10^{-7}$ кг/(м·с)	$\chi$ , $10^{-2}$ Вт/м
Азот	174	2,43
Аргон	222	1,62
Водень	88	16,84
Водяна пара	128	2,35
Повітря	181	2,41
Гелій	194	14,15
Кисень	200	2,44
Вуглекислий газ	144,8	1,45

Таблиця 8. Деякі фізичні характеристики рідин

Коефіцієнт поверхневого натягу на межі “рідина - повітря”  $\sigma$  при 20°C,  $10^{-3} \text{Н/м}$ ; коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  при 20°C,  $10^{-3} \text{Па}\cdot\text{с}$ ; коефіцієнт об’ємного розширення  $\beta$  при 20°C,  $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ; точка кипіння  $t_k$  при  $P=1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; питома теплота пароутворення при точках кипіння  $r$ ,  $10^5 \text{ Дж/кг}$ ; питома теплоємність  $C$  при 20°C,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Рідина	$\sigma$	$\eta$	$\beta$	$t_k$	$r$	$C$
Вода	72,6	1,005	21	100,0	22,6	4190
Гліцерин	66	1480	50	290	-	2390
Ртуть	500	1590	18	356,7	2,85	138
Спирт	22,0	1,2	110	78,3	8,57	2470

Таблиця 9. Температурна залежність в’язкості  $\eta$  та коефіцієнта поверхневого натягу  $\sigma$  для води

Тем-ра, °C	$\eta, 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	$\sigma, 10^{-3} \text{ Н/м}$
0	1,788	75,49
5	–	74,75
10	1,306	74,01
15	1,140	73,26
20	1,004	72,53
25	0,894	71,78
30	0,801	71,03
35	–	70,29
40	0,653	69,54
45	–	68,6
50	0,549	67,8
55	–	66,9
60	0,470	66,0
65	–	65,1
70	0,406	64,2
75	–	63,3
80	0,356	62,3

Таблиця 10. Густина води при різних температурах, г/см<sup>3</sup>

$t, ^\circ\text{C}$	Густина	$t, ^\circ\text{C}$	Густина	$t, ^\circ\text{C}$	Густина
0	0,99987	12	0,99952	24	0,99732
1	0,99993	13	0,99940	25	0,99707
2	0,99997	14	0,99927	26	0,99681
3	0,99999	15	0,99913	27	0,99654
4	1,00000	16	0,99897	28	0,99626
5	0,99999	17	0,99880	29	0,99597
6	0,99997	18	0,99862	30	0,99567
7	0,99993	19	0,99843	31	0,99537
8	0,99988	20	0,99823	32	0,99505
9	0,99981	21	0,99802	33	0,99472
10	0,99973	22	0,99780	34	0,99440
11	0,99963	23	0,99757	35	0,99406

Таблиця 11. Тиск і густина насиченої водяної пари при різних температурах (тиск  $P$  у гПа;  $m$  – маса пари у г в 1 м<sup>3</sup>)

$t, ^\circ\text{C}$	$P$	$m$	$t, ^\circ\text{C}$	$P$	$m$	$t, ^\circ\text{C}$	$P$	$m$
0	6,11	4,84	18	20,64	15,4	36	59,41	41,8
1	6,57	5,22	19	21,97	16,3	37	62,76	44,0
2	7,05	5,60	20	23,65	17,3	38	66,25	46,3
3	7,59	5,98	21	24,87	18,3	39	69,91	48,7
4	8,13	6,40	22	26,44	19,4	40	73,75	51,2
5	8,72	6,48	23	28,93	20,6	45	95,83	65,4
6	9,35	7,3	24	29,84	21,8	50	123,32	83,0
7	10,01	7,8	25	31,68	23,0	55	157,32	104,3
8	10,73	8,3	26	33,61	24,4	60	199,18	130
9	11,48	8,8	27	35,65	25,8	65	249,98	161
10	12,28	9,4	28	37,80	27,2	70	311,57	198
11	13,12	10,0	29	40,05	28,7	75	385,43	242
12	14,03	10,7	30	42,42	30,8	80	473,43	293
13	14,97	11,4	31	44,93	32,1	85	578,08	354
14	15,99	12,1	32	47,54	33,9	90	701,00	424
15	17,05	12,8	33	50,30	35,7	95	845,13	506
16	18,17	13,6	34	53,20	37,6	100	1013,25	598
17	19,37	14,5	35	56,24	39,6			

Таблиця 12. Психрометрична таблиця відносної вологості  $\phi$ , %

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого і мокрого термометрів																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
0	100	81	63	45	28	11															
2	100	84	68	51	35	20															
4	100	85	70	56	42	28	14														
6	100	86	73	60	47	35	23	10													
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7												
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4											
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11											
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17											9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22											15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26											20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30											24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34											28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37											31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40											34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42											37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44											39

Таблиця 13. Перевід температури,  $t^{\circ}\text{C}$ , в абсолютні мілівольти для хромель – алюмелевої термонари

$t^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Поправка в $mV$ на $1^{\circ}\text{C}$	
		мілівольти										
0	0,00	0,40	0,80	1,20	1,60	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68	0,0405	
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73	0,0405	
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80	0,0405	
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,29	14,72	15,14	15,56	15,98	0,0415	
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,91	19,37	19,79	20,22	0,0425	
500	20,65	21,05	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49	0,0430	
600	24,91	25,34	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73	0,0430	
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,83	31,24	31,66	32,08	32,49	32,91	0,0415	
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97	0,0415	
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93	0,0395	
1000	41,32	41,71	42,08	42,48	42,87	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78	0,0390	

Таблиця 14. Питома теплоємність міді при різних температурах,  $c$ , Дж/(кг·К)

$t, t^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600
$c$	381	393	409	422	434	448	457

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М:Высшая школа, 1981.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М:Наука, 1976.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т2. – Термодинамика и молекулярная физика. - М:Наука, 1975.
4. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. – М:Наука, 1973.
5. Радченко І.В. Молекулярна фізика. – Вид. Харківського держуніверситету, 1960.
6. Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика. – Вид. Львівського університету, 19 .
7. Савельев И.В. Курс общей физики. Т1. – - М:Наука, 1982.
8. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т1. – - М:ГизТТЛ, 1956.
9. Физический практикум. Механика и молекулярная физика./Под ред. В.И.Ивероновой. – М:Наука, 1967.
10. Загальна фізика. Лабораторний практикум./За заг. ред. І.Т.Горбачука. – К:Вища школа, 1996.
11. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. – М:Высшая школа, 1970.
12. Гапчин Б.М., Дутчак Я.Й., Френчко В.С. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум. – Львів:Світ, 1990.
13. Булкін П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. – М:Изд. МГУ, 1988.

## ЗМІСТ

Лабораторна робота N 1 .....	3
Лабораторна робота N 2 .....	5
Лабораторна робота N 3 .....	8
Лабораторна робота № 4 .....	12
Лабораторна робота N 5 .....	14
Лабораторна робота N 6 .....	18
Лабораторна робота № 7 .....	22
Лабораторна робота N 8 .....	26
Лабораторна робота N 9 .....	29
Лабораторна робота № 10 .....	32
Лабораторна робота № 11 .....	36
Лабораторна робота № 12 .....	40
Лабораторна робота № 13 .....	43
Лабораторна робота № 14 .....	47
Лабораторна робота № 15 .....	50
Лабораторна робота № 16 .....	54
Лабораторна робота № 17 .....	57
Лабораторна робота № 18 .....	63
Лабораторна робота № 19 .....	66
Додаток .....	70
Список використаних джерел .....	78

*Навчальне видання*

Молекулярна фізика: Фізичний практикум  
*Методичний посібник*  
для студентів денної форми навчання

Укладачі: *Курек Ігор Геннадійович*  
*Курек Єлена Ігорівна*  
*Струк Ярослав Михайлович*  
*Федорцова Ірина Василівна*