

**Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський національний університет  
імені Олеся Гончара**

---

**Кафедра експериментальної фізики**

Рябцев С.І., Башев В.Ф., Кушнерьов О. І.

**ПРАКТИКУМ  
З ДИСЦИПЛІНИ “МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА”**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 104 «Фізика та астрономія», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 014 – Середня освіта (спеціалізація 014.08 – Середня освіта (Фізика та астрономія))

**Дніпро  
2024**

УДК 539.19(076)  
П69

*Затверджено рішенням вченої ради  
факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем  
протокол 60, дата 20.02.2024 р.,*

**П69** Практикум з дисципліни “Молекулярна фізика” для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 104 «Фізика та астрономія», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 014 – Середня освіта (спеціалізація 014.08 – Середня освіта (Фізика та астрономія)) / уклад.: С.І. Рябцев, В.Ф. Башев, О. І. Кушнерьов. Дніпро : Ліра, 2024. 44 с.

Практикум містить мету, завдання основних лабораторних робіт з дисципліни «Молекулярна фізика», питання для самостійного опрацювання.

**Навчально-методичне видання. Практикум дисципліни “Молекулярна фізика”**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 104 «Фізика та астрономія», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», », 014 – Середня освіта (спеціалізація 014.08 – Середня освіта (Фізика та астрономія))

**Мета дисципліни:** Вивчення основних принципів та законів молекулярної фізики як сукупності узагальнених спостережень, практичного досвіду та фізичної теорії у математичній формі, формування навичок експериментального дослідження фізичних явищ та розв'язання задач з молекулярної фізики

**Завдання дисципліни:** навчити студента використовувати теоретичні знання для вирішення практичних задач; здатності використовувати основні теоретичні положення Фізики; розв'язувати складні спеціалізовані задачі, що передбачає застосування певних теорій і методів; здатності до абстрактного мислення, аналізу та синтезу, здатності застосовувати знання фізики у практичних і наукових ситуаціях, здатності приймати обґрунтовані рішення; опанувати науковий зміст лекції, основні види лекцій; різновиди семінарський і практичних занять, вимоги до їх проведення;; особливості проведення лабораторних занять, консультацій, індивідуальних занять.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен

**знати:** методику проведення сучасного фізичного експерименту; оволодіти здатністю самостійно вивчати нові питання фізики та методики навчання фізики за різноманітними інформаційними джерелами; теоретичні та практичні знаннями застосування основ загальної та теоретичної фізики, навичками пошуку, оброблення та аналізу інформації із різних джерел.

**вміти:** володіти розумінням математичних методів фізики; здатністю аналізувати фізичні явища з погляду фундаментальних фізичних теорій; застосувати теоретичні та практичні знання основ загальної та теоретичної фізики, навичками пошуку, оброблення та аналізу інформації із різних джерел; базовими навичками самостійного навчання; вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та/або електронних літературних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та запам'ятовувати її.

## Передмова

Дане навчально-методичне видання, практикум до лабораторних робіт складено відповідно до діючої програми дисципліни “Молекулярна фізика” для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 104 «Фізика та астрономія», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», 014 – Середня освіта (спеціалізація 014.08 – Середня освіта (Фізика та астрономія)).

Практикум до лабораторних робіт містить рекомендації та опис лабораторних робіт з основ “Молекулярної фізики”, які виконуються здобувачами індивідуально. Опис кожної роботи містить теоретичні відомості з відповідного розділу “Молекулярної фізики”, індивідуальні завдання та рекомендації щодо їх виконання, питання для контролю опанування здобувачами теоретичних знань.

Видання розраховане на здобувачів фізичних та природничих спеціальностей ДНУ, які вивчають курс “Молекулярна фізика.”

### Лабораторна робота №1

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ КУЛЬКИ, ЯКА ПАДАЄ

**Прилади та приладдя:** трубка з рідиною, кульки, мікрометр, секундомер.

#### Теоретичні відомості

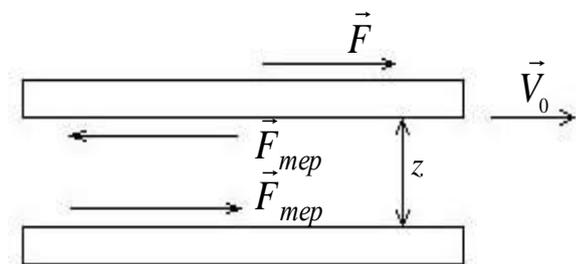


Рис. 1. Визначення коефіцієнта в'язкості речовини за методом Ньютона

Властивість рідини (газу) чинити опір переміщенню її шарів один відносно іншого називається в'язкістю. Якщо у рідину помістити дві паралельні пластинки і прикласти до верхньої постійну силу  $F$ , то вона буде рухатися з постійною швидкістю  $V_0$ . Оскільки пластинка не отримує прискорення, то дія сили  $F$  урівноважується іншою силою, рівною за величиною та протилежною за напрямком. Цю силу називають силою внутрішнього тертя, або в'язкістю  $F_{\text{тер}}$  (рис. 2.5). Такі сили діють між будь-якими шарами рідини або газу якщо вони рухаються один відносно іншого. При цьому з боку більш швидкого шару на більш повільний діє прискорююча сила  $a$  з боку

повільного на швидкий – сповільнююча. Як показав Ньютон, ця сила пропорційна градієнту швидкості  $dV/dz$  та площі контакту суміжних шарів  $S$ .

$$F = \eta S \frac{dV}{dz}, \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя або в'язкість рідини(газу).

В'язкість рідин зумовлена рухливістю окремих молекул або атомів на відміну від газів, для яких внутрішнє тертя є результат перенесення імпульсу хаотичним рухом молекул.

В'язкість рідин залежить від температури, зменшуючись з її підвищенням (але для газів навпаки збільшуючись). Це цілком природно, оскільки при цьому полегшується взаєм-

не переміщення молекул. Для різних рідин коефіцієнт в'язкості з підвищенням температури змінюється по-різному. Для мало в'язких рідин зменшення коефіцієнта в'язкості невелике, а для більш в'язких воно досить значне. Наприклад, при зміні температури на величину  $\Delta t=10^\circ\text{C}$  (від 20 до 30 C) коефіцієнт в'язкості води зменшується на 20%, а гліцерину – у 2,4 рази. Для опису температурної залежності коефіцієнта  $\eta$  рідин широко застосовується формула Френкеля:

$$\eta = A \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right), \quad (2)$$

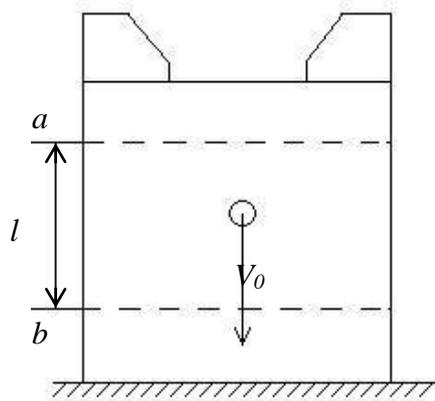
де  $A$  – сталий коефіцієнт;  $\Delta W$  – енергія активації (енергія, потрібна для подолання міжмолекулярних зв'язків).

### Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом кульки, яка падає

Для вимірювання коефіцієнта в'язкості рідин існує досить багато методів. Розглянемо метод кульки, яка падає, в основі якого лежить закон Стокса, та метод, що ґрунтується на законі Пуазейля. Основною частиною установки є циліндрична посудина, заповнена досліджуваною рідиною (рис. 2.10). У разі вільного падіння тіла всередині нерухомої рідини на нього, крім сили земного тяжіння  $P$  та виштовхувальної сили  $F_{\text{арх}}$ , діє сила опору рідини  $F$ , яку для тіл сферичної форми визначаємо за формулою Стокса:

$$F = 6\pi r \eta V, \quad (3)$$

де  $r$  – радіус кульки, а  $V$  – швидкість її руху.



Рівнодійна цих сил на початку падіння надає кульці прискорення, яке потім дорівнює нулю. Тому в подальшому кулька рухається рівномірно зі швидкістю  $V_0$ , тож виконується рівняння

$$\frac{4}{3} \pi r^2 g (\rho_k - \rho_p) = 6\pi r \eta V, \quad (4)$$

де  $\rho_k, \rho_p$  – густина кульки і рідини, відповідно.

Звідси

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_k - \rho_p)}{18V_0}, \quad (5)$$

Рис. 2. Визначення коефіцієнта в'язкості за методом кульки, яка падає

де  $d$  – діаметр кульки. Швидкість  $V_0$  можна визначити, вимірявши час  $\tau$  проходження кулькою шляху  $l$  між рисками  $a$  і  $b$  (рис. 2.10). Тоді

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_k - \rho_p)\tau}{18l}. \quad (6)$$

Формула правдива за умови падіння кульки в необмеженому середовищі. Якщо у разі падіння кульки вздовж осі циліндричної посудини радіусом  $R$  врахуємо вплив її стінок, то отримаємо формулу

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_k - \rho_p)\tau}{18l(1 + 1,2 \frac{d}{R})}. \quad (7)$$

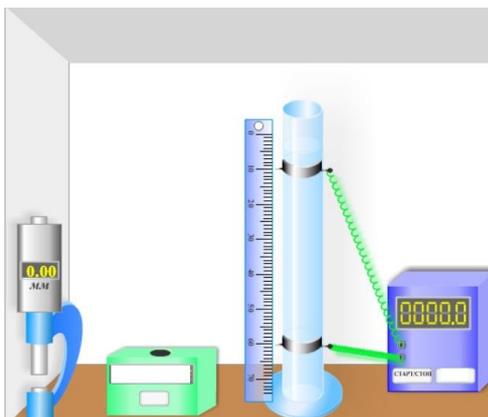


Рис.1.3. Емуляція визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса.

### Порядок виконання експерименту

1. Роботу можна виконати у режимі емуляції використовуючи співвідношення (6) або у режимі реального часу використовуючи співвідношення (7)
2. Користуючись мікрометром, тричі виміряти три рази (вздовж різних напрямків) діаметри п'яти кульок.
3. Виміряти секундоміром час падіння кульки між рисками а і b на циліндрі. Для того, щоб кульки падали уздовж осі посудини їх слід, кидати через воронку. Під час пуску та зупинки секундоміра необхідно спостерігати спочатку з рівнем риски а, відтак – b.
4. Результати вимірювань занести до таблиці.

### Контрольні запитання

1. Що таке в'язкість?
2. Що таке градієнт швидкості у рівнянні Ньютона ?
3. Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості у рівнянні Ньютона.
4. Формула Ньютона для в'язкості.

### Лабораторна робота №2

#### ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ КЛЕМАНА І ДЕЗОРМА

**Прилади та приладдя:** балон, водний манометр, насос.

#### Теоретичні відомості

Як відомо теплоємність визначається відношенням кількості теплоти  $\Delta Q$ , наданої тілу до підвищення температури  $\Delta T$ , яке при цьому відбувається:  $C = \lim(\Delta Q / \Delta T)$  при  $\Delta T \rightarrow 0$ . Залежно від маси тіла теплоємність поділяють на питому і молярну: теплоємність, віднесена до 1 кг маси, називають питомою; віднесеною до одного моля молярною;

$$C = \Delta Q / m \Delta T ; \quad C^m = c \cdot \mu.$$

Питома теплоємність вимірюється в Дж/(кгК), молярна – Дж/(мольК). Теплоємність залежить від природи речовини; температурного положення інтервалу підвищення температури; способу нагрівання. Теплоємність при сталому тиску завжди більша за теплоємність при сталому об'ємі. Це пояснюється тим, що при нагріванні газу при постійному тиску потрібна ще додаткова робота його розширення. Зокрема, для моля ідеального газу речовини між теплоємностями дорівнює універсальній газовій сталій:

$$C_p - C_v = R \quad (\text{закон Майєра}).$$

Провести безпосередній вимір теплоємностей  $C_p$  і  $C_v$  важко, тому що теплоємність газів незначна в порівнянні з теплоємністю посудини (балону). Клеман і Дезорм у 1819 році запропонували метод визначення відношення теплоємностей:  $\gamma = C_p/C_v$ .

Шляхом швидкого розширення газу, яке протікає адіабатично, тобто без теплообміну з навколишнім середовищем.

З першого закону термодинаміки можна одержати таке співвідношення для адіабатичного процесу:

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

Його називають рівнянням Пауссона. Температура при адіабатичному процесі також змінюється:

$$P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{Const}; \quad TV^{\gamma-1} = \text{Const}. \quad (2)$$

Приведемо опис методу Клемана і Дезорма. Спочатку повітря в балоні знаходиться при атмосферному тиску. За допомогою насоса через кран  $K_2$  (рисунок) нагнітаємо в балон деяку масу повітря, від тиск збільшується. Коли це нагнітання виконати досить швидко, температура газу в балоні підвищується. Через повний час температура газу встановиться і буде дорівнювати температурі зовнішнього повітря.

Це буде видно з того, що рівні рідини в колінах манометра більше не будуть змінюватись. Нехай різниця рівнів рідини в манометрі при цьому буде  $h_1$ . Позначимо через  $T_0$  абсолютну температуру оточуючого повітря, через  $P_1$  - тиск газу в посудині.

Тоді  $P_1 = P_a + h_1$ , де  $P_a$  - атмосферний тиск. Таким чином параметри газу в балоні при цьому будуть  $P_1, T_0$ .

Якщо швидко відкрити кран  $K_1$ , повітря в посудині буде розширюватись адіабатично, поки його тиск не зрівняється з атмосферним. Температура повітря при цьому знизиться до  $T_1$ . Параметри газу в другому стані будуть  $P_1$  і  $T_2$ . Якщо після цього кран  $K_1$  знову закрити, тиск у посудині почне поступово збільшуватись. Зростання тиску припиниться коли температура повітря в посудині стане рівною зовнішній температурі  $T_0$ . Позначимо тиск у посудині через  $P_2$ , а різницю рівнів, яка установилась в балоні, - через  $h_2$ . Це буде третій стан з параметрами  $P_2, T_0$

При цьому  $P_2 = P_a + h_2$

Для адіабатичного переходу газу з вихідного в проміжний стан з параметрами  $P_0$  і  $T_2$ .

Скористаємося рівнянням Пауссона в формі (2):

$$(P_a + h_1)^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_a^{1-\gamma} T_2^\gamma \quad (3)$$

або

$$\left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_1}\right)^\gamma = \left(1 + \frac{h_1}{P_a}\right)^{\gamma-1}$$

Величини  $\frac{h_1}{P_0}$  і  $\frac{T_1 - T_2}{T_2}$  малі в порівнянні з одиницею. Тому, розкладаючи ліву і праву частини виразу в ряд Тейлора і відкидаючи члени другого порядку малості, одержимо

$$1 + (\gamma - 1) \frac{h_1}{P_a} = 1 + \gamma \frac{T_1 - T_2}{T_2},$$

звідки

$$P_a \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1. \quad (4)$$

Але ліва частина цього виразу рівна  $h_2$ . Дійсно, для ізохоричного переходу с проміжного стану в кінцевий можна записати

$$\frac{P_a}{T_2} = \frac{P_a + h_2}{T_1},$$

Звідси випливає, що

$$h_2 = P_a \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Таким чином одержуємо рівняння

$$h_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1 \quad (5)$$

З якого легко знайти  $\gamma$  – відношення теплоємностей:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (6)$$

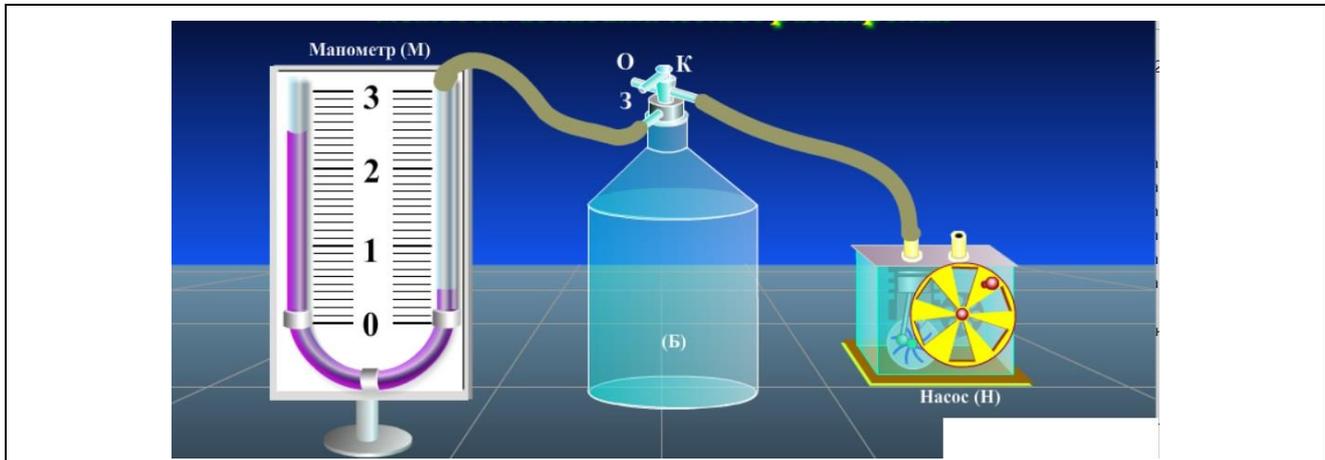


Рис.1. Емуляція визначення відношення теплоємностей газів методом Клемана і Дезорма

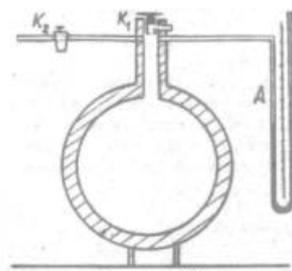


Рис.2. Визначення відношення теплоємностей газів методом Клемана і Дезорма у режимі реального часу

### Порядок роботи

1. Роботу можна виконати у режимі емуляції або у режимі реального часу
2. Відкрити кран  $K_2$  (малюнок) і при закритому крані  $K_1$  нагнітати в балон повітря так, щоб водяний манометр показав різницю між тиском в балоні  $P_1$  і атмосферним тиском  $P_a = 250-300$  мм р.ст.
3. Через 2-3 хвилини після досягнення в балоні кімнатної температури  $T_1$  установиться стабільна різниця рівнів води в манометрі. Зафіксувати цю різницю –  $h_1$ .
4. Швидко відкрити (на 0.5 с) і закрити кран  $K_1$ . При цьому газ адіабатично розширюється, а температура його змінюється.
5. Через кілька хвилин, потрібних для теплообміну системи з навколишнім середовищем і підвищення температури до  $T_0$ , визначити  $h_2$  - різницю між досягненим тиском у балоні і атмосферним тиском.
6. Дослід повторити 7-8 разів .
7. За формулою (6) розрахувати відношення  $\gamma = C_p/C_v$ .
8. Результати дослідів занести в таблицю і привести розрахунок помилки дослідів за фо-

рмулою  $\Delta\gamma = t_{\alpha,n} \cdot \Delta\gamma_{\text{вун}}$ , де  $\Delta\gamma_{\text{вун}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta\gamma_i^2 / [n(n-1)]}$

n/p	$h_1$	$h_2$	$\gamma$	$\alpha$	$t_{\alpha,n}$	$\Delta\gamma$	$\gamma_{\text{ист}}$
-----	-------	-------	----------	----------	----------------	----------------	-----------------------

### Контрольні запитання

1. Як змінюється внутрішня енергія газу при його адіабатичному розширенні?
2. Як зв'язані молярні теплоємності  $C_p$  і  $C_v$  з універсальною газовою сталою?
3. Одержати рівняння Пауссона.
4. Зробити розрахунок  $\gamma = C_p/C_v$  для ідеальних газів з одно-, двох і трьохатомними молекулами.

### Лабораторна робота №3

#### ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ $C_p/C_v$ ГАЗІВ ЗА ШВИДКІСТЮ ЗВУКУ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ

Прилади та приладдя: звуковий генератор, електронний осцилограф, телефон, труба змінної довжини, теплоізольована труба сталої довжини з нагрівачем, термopара з потенціометром, , посуд із стислим вуглекислим газом., посуд із стислим вуглекислим газом.

#### Теоретичні відомості

Метою роботи є визначення відношення  $\gamma=C_p/C_v$  для повітря і вуглекислого газу шляхом вивчення умов утворення стоячої хвилі, а також дослідження залежності швидкості звуку від температури.

Поширення хвиль у газах проходить адіабатично, тобто процеси стиснення і розрідження окремих прошарків настільки швидкоплинні, що теплообмін між ними не встигає відбуватись. Внаслідок цього швидкість поширення хвиль залежить від показника адиабати  $\gamma=C_p/C_v$  яка визначається за формулами

$$V = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}, \quad V = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (1)$$

де  $P$  – тиск;  $\rho$  – густина газу;  $C_p$  і  $C_v$  – теплоємність газу при сталому тиску і об'ємі відповідно;  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $\mu$  - молярна маса газу;

Залежність швидкості звуку від температури можна записати і другою формулою. Відомо, що  $\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \alpha t)}$ , де  $\rho_0$  – густина газу при  $t=0$  C;  $\alpha$  – коефіцієнт розширення газу;

( $\alpha=0.004$ ). Тоді згідно з (1)

$$V_t = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho_0} (1 + \alpha t)} = V_0 \sqrt{1 + 0.004t} \quad (2)$$

$V_0$  – швидкість звуку при  $t=0^\circ\text{C}$ ;

Якщо швидкість звукових хвиль і температура газу відома, то з (1) можна знайти значення відношення теплоємностей:

$$\gamma = \mu V^2 / RT, \quad (3)$$

причому швидкість звуку зв'язана з частотою  $\nu$  і довжиною хвилі  $\lambda$  співвідношенням  $V = \lambda \nu$ .

Хвиля, яка поширюється вздовж труби, багатократно відбивається від торцевих стінок, і внаслідок взаємодії всіх відбитих хвиль виникають дуже складні коливання.

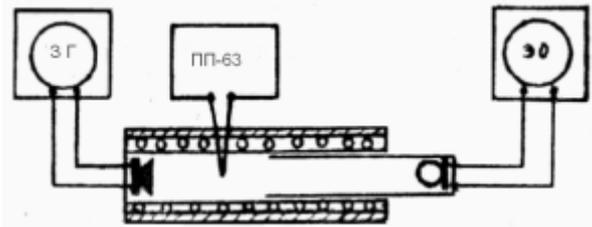
Картина спрощується, якщо довжина труби дорівнює цілому числу половини довжини хвилі, тобто  $L = n\lambda/2$ .

Тоді відбиті хвилі збігаються (в окремих місцях трубки) по фазі з падаючими хвилями, посилюють одна одну, амплітуда коливання зростає, наступає резонанс. При ідеально пружних стінах труби виникає стояча хвиля, яка переносить енергію – стінкам відповідають вузли стоячої хвилі. В дійсності втрати енергії при відбитті мають місце, вони компенсуються за рахунок добавок енергії (наприклад, від телефону). Амплітуди падаючої і відбитої хвиль не

бувають однаковими, а тому у вузлах мають місце не нульові коливання. Тому, установивши мікрофон, навіть біля відбиваючої стінки труби, тобто у вузлі, можна, змірюючи наведений сигнал чітко зафіксувати появу резонансу при зміні довжини труби або частоті коливання.

### Опис приладу

Схема приладу наведена на рисунку. Звукові коливання в трубі генеруються телефоном Т і фіксуються мікрофоном М. Мембрана телефону приводиться в рух змінним струмом звукової частоти, джерелом якої є генератор (ЗГ). Електричні коливання від мікрофона спостерігаються на екрані осцилографа.



**Схема приладу для знаходження швидкості звуку в газах.**

На нерухомій трубі розміщений нагрівач, підключений до регульованого джерела напруги.

Вимірювання температури виконується за допомогою термопар, підключеної до потенціометру ПП-63 (див. окремий опис цього пристрою). Температура знаходиться за формулою  $t = t_{\text{ноч}} + \alpha_t \cdot E$  (мВ) де  $\square$  – стала, яка вказана на установці;  $E$  – показання потенціометра (ЕРС термопар в мілівольтах).

Для знаходження швидкості руху у вуглекислому газі нерухома труба за допомогою спеціального пристрою з'єднується з балоном із стисли  $\text{CO}_2$  (методика роботи з стислим газом приведена окремій інструкції). Перед початком роботи необхідно ознайомитися з правилами експлуатації приладів. Роботу розпочинають після прогріву генератора і осцилографа (3-5 хв.).

### Обчислення швидкості звуку

Знаходження умов при яких виникає резонанс (на осцилографі при цьому спостерігається максимальна амплітуда), проводиться двома способами.

1. При незмінній частоті звукового генератора  $\nu$ , а значить і довжині хвилі, резонанс можна отримати, змінюючи довжину труби  $L$ . Якщо довжину труби поступово збільшувати, то спостерігається ряд послідовних резонансів, для яких виконуються умови

$$l_1 = 1 \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad l_2 = 2 \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad \dots, \quad l_k = k \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad \dots, \quad l_n = n \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

Записавши  $\lambda$  через  $l_n$  і підставивши у співвідношення  $V = \lambda \nu$ , отримаємо

$$V = 2\nu \frac{l_n}{n}, \quad (5)$$

Якщо установка не дозволяє (для даної частоти) установити довжину труби, що відповідає першому ( $n=1$ ) і декільком наступним ( $2, 3, \dots, k-1$ ) резонансам, а  $k$ -й і наступні за ним резонанси фіксуються чітко, то для розрахунку швидкості звукової хвилі слід використовувати формулу

$$V = 2\nu \frac{l_n - l_k}{n - k},$$

2. При постійній довжині труби  $L$  змінюють частоту звукового генератора, а значить, і довжину звукової хвилі. Для послідовних резонансів маємо

$$L = n \frac{\lambda}{2} = \frac{V n}{2 \nu} \quad (6)$$

$$\text{Звідси } V = 2L \frac{v_n}{n} \quad \text{або} \quad V = 2L \frac{v_n - v_k}{m}, \quad (7)$$

де  $v_k$  - початкова резонансна частота;  $n = k + m$ .

### Порядок роботи

**Підготовка до замірів.** Зібрати установку і увімкнути в електромережу електронний осцилограф і звуковий генератор. Після їх прогрівання увімкнути тумблер «Промінь» на електронному осцилографі і повернути ручку «Яскравість». На екрані повинна з'явитися лінія. Тумблер «Вид роботи» генератора поставити на положення «Зовнішнє навантаження», множник частот поставити на положення «x10». На екрані осцилографа будуть спостерігатися електричні коливання звукової частоти.

**Визначення швидкості звуку в повітрі.** Згідно з написаним вище, швидкість звуку визначають: 1) при фіксованій частоті звукового генератора; 2) при постійній довжині труби.

1. При фіксованій довжині труби встановити частоту в інтервалі 1000-2000 Гц. При фіксованій частоті повільно змінити довжину труби і послідовно відмічати відстані по шкалі, що відповідає резонансу. Заміри повторити для 3-4 різних частот. Отримані значення занести в таблицю і побудувати графік залежності довжини труби (ордината) від номера резонансів (абсциса). З графіка знайти  $(l_n - l_k) / m$ , підставити в формулу (6) і знайти  $V$ .

2. При фіксованій довжині труби повільно збільшувати частоту генератора від 500 до 2500 Гц і відмічати всі резонансні частоти (в точках різного зростання амплітуди коливання). Переконавшись в збіганні результатів, проводячи заміри при зменшенні частот. Отримані результати занести в таблицю і побудувати графік: вісь абсцис – номер резонансу, вісь ординати – відповідні частоти.

Із графіка знайти  $(v_n - v_k) / m$  підставити в формулу (8) і знайти  $V$ .

Порівняти обидва способи визначення  $V$  і знайти середнє значення.

3. Знайти  $\gamma$  згідно з формулою (3) і оцінити похибку отриманого значення.

4. Для знаходження залежності швидкості звуку від температури вмикають нагрівач. Після кожного збільшення напруга на 5-10 В чекають приблизно 10-15 хв. для встановлення теплової рівноваги. Потім знаходять швидкість звуку другим способом (фіксування довжини труби). Нагрівання проводять до 80-100°C (3-4 mV). Після закінчення замірів і розрахунків будують графік залежності швидкості звуку від температури, порівнюють результати з теоретичною залежністю.

5. Для знаходження швидкості звуку і відношення теплоємностей у вуглекислому газі труби з'єднують з балоном з стислим вуглекислим газом, який виштовхує повітря. Всі заміри виконуються одним з вищезгаданих способів (як правило, другим).

I – й спосіб

II – й спосіб

№ п/п	$v$	$L$	$V$	$\Delta V$	$v$	$L$	$V$	$\Delta V$	$\gamma$
1									
2									

### Контрольні запитання

1. Виведіть формулу для знаходження швидкості звуку в газі.
2. Порівняйте теоретичні значення  $\gamma = C_p / C_v$  для повітря і вуглекислого газу.
3. Чи залежить  $\gamma$  від температури у вибраному температурному інтервалі?

### Лабораторна робота №4

#### ВИВЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ (НАГРІВАННЯ)

Прилади та приладдя: два однакових калориметри з рідиною, нагрівальною спіраллю, мішалкою та термометрами.

У даній роботі визначається теплоємність досліджуваної рідини за допомогою порівняння швидкості охолодження цієї рідини та води, теплоємність якої  $C_0$  відома.

Установка складається з двох однакових калориметрів (рис.1), в одному з них – досліджувана рідина, в другому вода. Обидві рідини нагріваються за допомогою спіралей з однаковим електричним опором (Н- нагрівник).

У стакані з рідиною знаходиться також мішалка **М** та термометр **Т**. Між внутрішньою і зовнішньою калориметричними посудинами заливається вода, температура якої визначається термометром **Т<sub>с</sub>**.

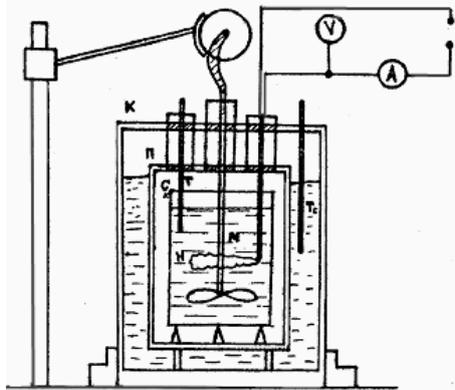


Рис.1. Схема калориметра.

Потік тепла від стакану  $C_k$  до внутрішньої калориметричної посудини **П** визначається різницею температур рідини та залитою водою простору між калориметричними посудинами, які вимірюються термометрами **Т** та **Т<sub>с</sub>**.

### Теоретичні відомості

Коли тіло, нагріте до температури  $t$ , знаходиться в середовищі з більш низькою температурою  $t_c$ , то теплопередача, названа в цьому випадку тепловіддачею, відбувається шляхом теплопровідності через тонкий неперемішуваний шар рідини чи газу на поверхні тіла за допомогою конвективного переносу в об'ємі рідини чи газу. Згідно з формулою Ньютона для тепловіддачі кількість теплоти  $dQ$ , яка віддається тілом з площею поверхні  $S$  за час  $dt$ , пропорційна різниці температур  $t - t_c$ ,  $dQ = \alpha S(t - t_c)dt$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі. Зниження температури тіла за час  $dt$ , що пов'язане з утратою теплоти  $dQ$ , залежить від його теплоємності  $dQ = -mcdt$ , де  $m$  – маса тіла,  $C$  – питома теплоємність.

Порівнюючи праві частини в формулах для  $dQ$  та розділяючи змінні, одержимо

$$mc \frac{dt}{t - t_c} = \alpha S dt \Rightarrow mc \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t - t_c} = \alpha S t \quad (2)$$

При цьому допускаємо, що температура середовища постійна.

Тепловий еквівалент калориметричної системи (кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання її на 1 градус) дорівнює сумі теплових еквівалентів калориметра з мішалкою, нагрівника, зануреної частини термометра та теплоємності рідини  $mc$ . Позначимо його  $W + mc$ .

Запишемо рівняння (2) для обох використаних у лабораторній роботі калориметричних систем:

$$(W_p + m_p C_p) \ln \frac{t_1 - t_c}{t_2 - t_c} = (\alpha S)_p \cdot \tau_1$$

$$(W_b + m_b C_b) \ln \frac{t_1 - t_c}{t_2 - t_c} = (\alpha S)_b \tau_2$$

Індекс «*p*» відноситься до калориметричної системи з досліджуваною рідиною, а «*b*» - з водою.

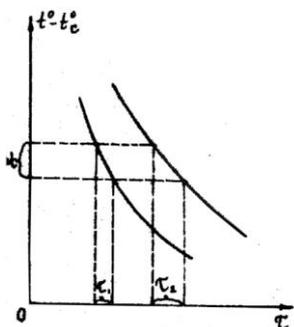
Якщо обидві рідини охолоджувати на одну і ту ж кількість градусів, то буде виконуватись приблизне рівняння загубленої теплоти. Якщо поділити ліві і праві частини рівнянь (3) і (4), одержимо

$$\frac{W_p + m_p C_p}{W_b + m_b C_b} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad \text{Звідси виходить}$$

$$C_x = C_b = \frac{(W_b + m_b C_b) \frac{\tau_1}{\tau_2} - W_p}{m_p}$$

### Порядок роботи

1. Підключити до джерела струму нагрівник калориметра з еталонною рідиною (водою), одночасно включити електродвигун, який обертає мішалку. Нагріти рідину до 50°C, після цього вимкнути джерело струму. У зв'язку з тепловою інерцією системи температура може піднятися трохи вище (якщо шкала термометра до 50°C, треба вимкнути раніше). У процесі охолодження через кожні дві хвилини відмічати показання термометрів  $T$  та  $T_c$  і записати різницю температур  $t-t_c$ .



2. Названі процеси нагрівання, охолодження та заміру температури провести також з досліджуваною рідиною.

3. На міліметровому папері побудувати графіки залежності  $t-t_c$  від часу для двох рідин (рис.2).

4. Вибрати на графіку довільний інтервал температур  $\Delta t = t_1 - t_2$ , провести пунктирні горизонтальні до перетину з кривими. З точок перетину опустити пунктирні вертикалі на вісь абсцис і знайти інтервали часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$  відповідно для досліджуваної рідини та для води.

Рис. 2 Залежності температури рідин від часу

Одержані значення підставити в формулу (6) і визначити  $C_x$ .

5. Указані обчислення  $C_x$  повторити для 3-5 довільно вибраних на графіку інтервалів температур  $\Delta t$ , потім визначити середнє значення  $C$ , обчислити абсолютну та відносну похибки. Результати занести до таблиці.

№ п/п	$W_\theta$	$W_p$	$m_\theta$	$m_p$	$C_\theta$	$\Delta t^\circ$	$\tau_1$	$\tau_2$	$C_x$	$\Delta C_x$	$C_{x\text{ср}}$
1											
2											

### Контрольні запитання

1. Що таке питома теплоємність? В яких одиницях вона вимірюється?
2. Яку теплоємність визначали в даній роботі ( $C_p$  чи  $C_v$ )?
3. Вивести формулу для визначення  $C_x$ .
4. Якими способами може здійснюватись теплообмін?

### Лабораторна робота № 5

#### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ОХОЛОДЖЕННЯ

Прилади та приладдя: зразки металів, електронагрівач, штатив з термопарами, потенціометр ПП-63.

#### Теоретичні відомості

Металевий зразок, температура якого вища за температуру оточуючого середовища  $T_0$ , охолоджується в цьому середовищі. Кількість теплоти  $q$ , яку зразок втрачає за інтервал часу  $\Delta t$ , може бути виражене як

$$q = -\int c_p \frac{dT}{dt} \Delta t dV \quad (1)$$

де  $C$  - теплоємність металу;  $\rho$  - його густина;  $V$  - об'єм зразка.

Ця теплота виділяється через поверхню зразка  $S$  і може бути виражена за допомогою формули Ньютона:

$$Q = \int L(T - T_0) \Delta t dS \quad (2)$$

$L$  - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні зразка.

Прирівнюючи вирази (1) і (2) одержимо:

$$-\int c\rho \frac{dT}{dt} dV = \int L(T - T_0) dS \quad (3)$$

Враховуючи, що величини  $c, \rho, dT/dx$  не залежать від координат точок об'єму, а величини  $L, T, T_0$  не залежать від координат точок поверхні, то одержимо:

$$c\rho \frac{dT}{dt} V = L(T - T_0) S \quad (4)$$

Перепишемо вираз (4) у вигляді:

$$\frac{d(T - T_0)}{T - T_0} = -\frac{dS}{mc} dt \quad (5)$$

де  $m = \rho V$  – маса зразка. Знак «мінус» показує, що із збільшенням часу температура  $T$  зразка зменшується. Інтегрування рівняння (5) дає формулу:  $\ln(T - T_0) = -(LS/c \cdot m)t + \ln(T_m - T_0)$

$$\ln(T - T_0) = -(LS/c \cdot m)t + \ln(T_m - T_0), \quad (6)$$

де  $T_m$  – температура тіла в початковий момент часу. При інтегруванні виразу (5) було зроблено припущення, що  $LS/c \cdot m$  не залежить від температури.

Рівняння (6) виражає лінійну залежність  $\ln(T - T_0)$  від часу а величина  $LS/c \cdot m$  – це тангенс кута нахилу цієї прямої до вісі часу.

Якщо експериментально криві охолодження  $T(t)$  двох зразків з різних металів, але однакової форми й розмірів, і побудувати для них графіки залежності  $\ln(T - T_0)$  від  $t$ , то можна визначити відповідні тангенси, тобто величини  $tgL = LS/c \cdot m$ .

Відношення цих тангенсів є:

$$K = \frac{tgL_1}{tgL_2} = \frac{c_2 m_2}{c_1 m_1} \quad (7)$$

В припущенні що коефіцієнти тепловіддачі однакові для обох зразків в однакових інтервалах температур. Якщо теплоємність  $c_2$  одного зі зразків відома, з (7) можна визначити теплоємність другого зразка:

$$c_1 = \frac{c_2 m_2}{K m_1} \quad (8)$$

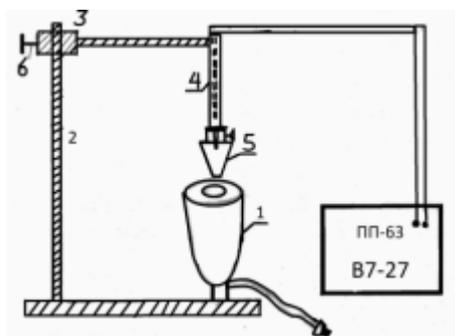


Схема установки (малюнок) містить електронагрівач 1 закріплений на штативі 2, ковзаючи муфту 3 та термопару 4 із закріпленим на кінці керамічної соломки 5 зразком.

### Порядок роботи

Виникаючи при нагріванні зразка і спая термопару е.р.с (електрорушійна сила) виміряти за допомогою електронного вольтметра В7-27.

Гвинтом 6 послабити кріплення муфти і опустити зразок в електронагрівач. Після нагрівання до  $T=600$  К зразок підняти, повернути держак зразка на  $180^\circ$  С і закріпити гвинтом 6. Нагрітий зразок охолодити у середовищі (повітря з температурою  $T_0$ ) до температури нижче  $100^\circ$  С. Через кожні 20-30с робити запис різниці потенціалів за показниками вольтметра. За допомогою таблиці визначити відповідні температури зразка.

Таблиця 1

е.р.с., mV	
$T - T_0$	
$\ln (T - T_0)$	

Таблиця 2

T, K	272	333	393	453	513	573	623
$c \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	0,091	0,094	0,0975	0,1008	0,1038	0,107	0,109

Одержані криві розбити на прямолінійні відрізки. Для кожного з таких відрізків визначити  $\text{tg}L$  знайти значення теплоємності заліза і алюмінію при різних температурах за формулою (8), вважаючи теплоємність міді відомою. При цьому слід мати на увазі, що у формулі (8) значення теплоємностей  $c_1$  і  $c_2$  відповідають однаковим температурам. Температура залежності теплоємності міді наведена в таблиці (2).

### Контрольні запитання

1. За якими механізмами може відбуватися теплообмін?
2. Який зміст величини  $T$  у формулах (6) і (7) ?
3. Яка будова металу?

### Лабораторна робота №6

#### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДИНИ ПОДВІЙНИМ КАЛОРИМЕТРОМ

Прилади та приладдя: два однакові калориметри з рідиною, нагрівальною спіраллю, мішалкою та термометром.

У цій роботі теплоємність досліджуваної рідини вимірюється методом порівняння з відомою теплоємністю води. Прилад складається з двох однакових калориметрів (описані в лабораторній роботі №3), але в цій роботі простір між зовнішнім і внутрішнім калориметричними судами водою не заповнюється. В одному з калориметрів внутрішній стакан заповнюється досліджуваною рідиною (трансформаторним маслом), в іншому водою. У кожному калориметрі занурена нагрівальна спіраль. Опір спіралей в обох калориметрах однаковий. Тому при послідовному з'єднанні спіралей згідно з законом Джоуля-Ленца в них виділяється однакова кількість теплоти. Для вирівнювання температури в усьому об'ємі рідини у кожному калориметрі є мішалка, яка обертається за допомогою електродвигуна.

Якби не було втрат тепла калориметром в зовнішнє середовище, то кількість тепла, одержана першим та другим калориметром від нагрівачів за однаковий проміжок часу, визначалася б за формулою:

$$Q_1 = (m_1 c_x + w_1) / (T_{k1} + T_{n1}) \quad (1)$$

$$Q_2 = (m_2 c_w + w_2) / (T_{k2} + T_{n2}) \quad (2)$$

Тут  $m_1$  – маса досліджуваної рідини в першому калориметрі;  $m_2$  – маса води у другому калориметрі;  $w_1$  і  $w_2$  – теплові еквіваленти першого та другого калориметрів ( $W$  – це сумарна теплоємність внутрішнього стакана, мішалки, зануреної частини термометра та нагрівача;  $C_x$  – питома теплоємність досліджуваної рідини;  $C_w$  – питома теплоємність води;  $C_w=4187$  Дж/(кг·К);  $T_{n1}$  і  $T_{n2}$  – початкові температури першого калориметра (досліджувана рідина) і другого калориметра (вода);  $T_{k1}$  і  $T_{k2}$  – кінцеві температури першого та другого калориметрів.

Із умови рівноваги  $Q_1=Q_2$ , з цього випливає що:

$$C_x = \frac{(C_w m_2 + w_2)(T_{k2} - T_{n2}) - w_1(T_{k1} - T_{n1})}{m_1(T_{k1} - T_{n1})} \quad (3)$$

(без урахування поправки на теплообмін).

Через те що деяка кількість тепла буде проходити крізь оболонку калориметра, треба врахувати поправку до зміни температур на теплообмін (див. додаток до лабораторної роботи №21). У цьому випадку формула (3) має вигляд:



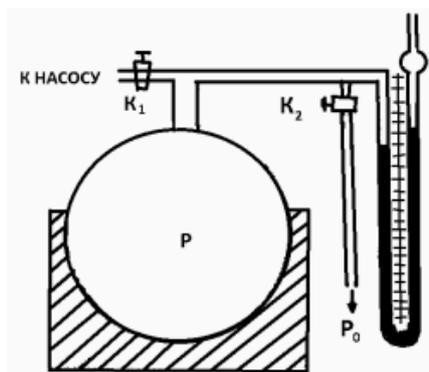
### Контрольні запитання

1. Які основні елементи конструкції калориметра?
2. Чому спіралі калориметрів з'єднують послідовно?
3. Яка з двох поправок  $\theta_1$  або  $\theta_2$  є більшою?

### Лабораторна робота №7

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ, СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ ТА ЕФЕКТИВНОГО (ГАЗОКІНЕТИЧНОГО) ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛ МЕТОДОМ ПРОТІКАННЯ ЧЕРЕЗ КАПІЛЯР

Прилади та приладдя: установка, секундомір, насос.



Прилад для визначення внутрішнього тертя повітря

У цій роботі значення довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул обчислюється з використанням значення коефіцієнта внутрішнього тертя, який знаходиться з експерименту. Установка для знаходження коефіцієнта в'язкості методом протікання через капіляр складається з балона з рідинним манометром і капіляром, системи трубок і кранів за допомогою яких, за допомогою яких балон спочатку з'єднується з насосом для попереднього нагнітання в нього повітря, а потім з капіляром, через який нагнітається повітря (малюнок).

#### Теоретичні відомості

Розглянемо ламінарний рух газу (повітря) крізь капіляр довжиною  $l$ , перерізом  $S$  під дією різниці тисків  $P-P_0$  ( $P_0$  – атмосферний тиск,  $P$  – змінний тиск у балоні об'ємом  $V$  з яким з'єднується верхній кінець капіляра).

Знайдемо середню густину газу в капілярі  $\rho_{ср}$  відповідно до рівняння Менделєєва-

Клапейрона  $\rho_{ср} = \frac{\mu P_{ср}}{RT}$ , де  $\mu$ -молярна маса,  $T$ -абсолютна температура;  $P_{ср} = \frac{P+P_0}{2}$ .

При протіканні газу через капіляр розподіл швидкості газу по перерізу капіляра виражається формулою:

$$U(r) = \frac{P+P_0}{4\eta l} (r_0^2 - r^2) \quad (1)$$

де  $r_0$ - внутрішній радіус капіляра;  $r$ -відстань від осі капіляра до розглядуваного кільця в його поперечнім перерізі;  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Виразимо витік газу з балону за час  $dt$  через зниження тиску в ньому:

$$dm = -Vd\rho = -V \frac{\mu dP}{RT} \quad (2)$$

де  $d\rho$  – приріст густини ( $d\rho < 0$ ), а також через середню (по перерізу капіляра) швидкість протікання газу

$$U_{cp} = \frac{(P-P_0)r_0^2}{8\eta l} \cdot \frac{\mu P_{cp}(P-P_0)\pi r_0^4}{RTl8\eta} dt \quad dm = \rho_{сep} U_{сep} S dt = \quad (3)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (2) і (3), підставимо вираз для  $P_{cp}$  та проведемо розподіл змінних. З цього випливає:

$$\frac{2dP}{(P+P_0)(P-P_0)} = -\frac{\pi r_0^4 dt}{8\eta l V} \quad (4)$$

Перетворимо ліву частину рівняння (4):

$$\frac{2dP}{(P+P_0)(P-P_0)} = \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{dP}{P-P_0} - \frac{dP}{P+P_0} \right)$$

і проінтегруємо праву частину по часу від 0 до t, а ліву частину – по тиску від  $P_1$  до  $P_2$  відповідно до моментів часу 0 і t. Тоді будемо мати:

$$\frac{1}{P_0} \left( \ln \frac{P_2+P_0}{P_1+P_0} - \ln \frac{P_2-P_0}{P_1-P_0} \right) = \frac{1}{P_0} \ln \frac{(P_2+P_0)(P_1-P_0)}{(P_1+P_0)(P_2-P_0)} = \frac{\pi r_0^4}{8\eta l V} \quad (5)$$

Через те що в даній роботі  $P_1$  і  $P_2$  мало відрізняються від  $P_0$ , то  $\frac{P_2+P_0}{P_1+P_0} = I$ . Замінивши відношення  $\frac{P_1-P_0}{P_2-P_0}$  відношення різниці рівнів рідини в манометрі в моменти часу 0 і t:  $\frac{P_1-P_0}{P_2-P_0} = \frac{h_1}{h_2}$ , одержимо вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя

$$\eta = \frac{\pi r_0^4}{8lV} \cdot \frac{P_0 T}{\ln(h_1/h_2)} \quad (6)$$

Згідно з кінетичною теорією газів коефіцієнт внутрішнього тертя тісно пов'язаний з середньою довжиною вільного пробігу молекул співвідношенням:

$$\eta = 0,499 \rho \langle v \rangle \lambda, \quad (7)$$

де  $\rho = \frac{P\mu}{RT}$  – густина газу (у нашому випадку  $P=P_0$ );

$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$  – середня арифметична швидкість молекул газу.

З виразу (7) визначимо:

$$\lambda = \frac{\eta}{P_0} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}} \quad (8)$$

Середня довжина вільного пробігу зв'язана з ефективним діаметром молекул виразом:

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2} g d^2 P_0} \quad (9)$$

де  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана. Звідси:

$$d = \sqrt{\frac{RT}{\sqrt{2}\pi P_0 \lambda}} \quad (10)$$

### Порядок виконання роботи

1. Закрити кран  $K_2$  і відкрити кран  $K_1$ , створюючи різницю тисків у манометрі  $h=120$  – 150 мм, закрити кран  $K_1$ . Витримати повітря в балоні протягом 3-4 хвилин для встановлення сталої температури і відмітити значення висоти по манометру.

2. Відкрити кран  $K_2$  і включити секундомір. Після зміни висоти  $h$  на 50–60 мм записати значення  $h_2$  і відповідний момент часу.

3. Дослід повторити не менше 5 разів. За формулами відшукати коефіцієнт внутрішнього тертя, а за формулами (8) і (10) розрахувати  $\lambda$  і  $d$ .

4. Обчислити стандартну випадкову помилку визначення  $\eta$ , потім вивести формули і розрахувати відносні й абсолютні похибки визначення величин  $\lambda$  і  $d$ .

5. Записати значення знайдених величин, а також значення в інтервалі можливого відхилення їх дійсних значень від знайдених. Результат вимірів і розрахунків занести до таблиці.

№	$V$	$r_0$	$l$	$P_0$	$T$	$h_1$	$h_2$	$t$	$\eta$	$\Delta\eta$	$\lambda$		$\Delta T$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$d$	$\frac{\Delta d}{d}$
1																
2																
...																
5																

### Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт внутрішнього тертя (або коефіцієнт в'язкості) ?
2. Який механізм внутрішнього тертя в газах?
3. Дати визначення довжини вільного пробігу й ефективного (газокінетичного) діаметра молекул.
4. Вивести формулу для визначення коефіцієнта в'язкості.

### Лабораторна робота №8

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ МЕТОДОМ ЗАТУХАЮЧИХ КОЛИВАНЬ

Прилади та приладдя: пристрій для спостереження крутильних коливань, посуд з рідиною, секундомір, пікнометр.

В'язкістю (внутрішнім тертям) називається властивість рідини (газу) чинити опір переміщенню її шарів відносно один одного. Ця властивість кількісно характеризується коефіцієнтом в'язкості  $\eta$ . Основний закон в'язкого руху описується формулою Ньютона:

$$F = \eta S (dV/dx) \quad (1)$$

де  $F$  – сила взаємодії двох шарів рідини;  $S$  – площа їх контакту;  $dV/dx$  – градієнт швидкості в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху.

У цій роботі для визначення коефіцієнта в'язкості рідини слід взяти характеристики затухаючого коливального руху. Коливальна система складається з металевого диску  $R$  (малюнок), підвішеного на тонкому дроті, верхній кінець якого прикріплений до крутильної головки  $N$  (за її допомогою корегується нульове положення).

Диск  $R$  розміщений у посудині, яка наповнюється рідиною (досліджуваної чи еталоном), її в'язкість відома. Для спостережень крутильних коливань використовується оптична система яка складається з освітлювача  $C$ , дзеркала  $M$  закріплене, на дроті, шкали  $\Pi$ , на якій

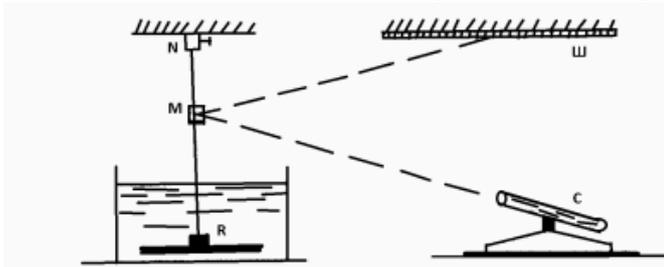


Схема пристрою для вивчення крутильних коливань

відбивається світловий зайчик.

### Теоретичні відомості

Якщо викликати крутильні коливання диска  $R$ , то вони будуть з часом затухати, тому що діє сила в'язкого тертя, яка пропорційна швидкості руху диска. Амплітуда коливальних рухів буде зменшуватися з часом по експоненціальній залежності:

$$A_t = A_0 e^{-\beta t} \quad (2)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт затухання;

Відношення амплітуд двох послідовних коливань (які відстають за часом на період  $T$ ) називається декрементом затухання  $A_n/A_{n+1} = \exp(\beta T)$ , а його натуральний логарифм - логарифмічним коефіцієнтом затухання:

$$\lambda = \ln(A_n/A_{n+1}) = \beta T. \quad (3)$$

Визначимо логарифмічний декремент затухання коливань диска у рідині через  $\lambda_p$ , а у повітрі – через  $\lambda_0$ , період коливань диска у рідині –  $T_p$ . Ці величини зв'язані з коефіцієнтом внутрішнього тертя  $\eta$  співвідношенням, яке порівняно складне у теоретичному доказі:

$$\lambda = \lambda_0 + \sqrt{(\pi/2) \rho_p T_p \eta_p} \quad (4)$$

де  $\rho_p$  – густина рідини  $\alpha$  – константа (стала приладу), яка залежить від радіуса диска і його моменту інерції.

Запишемо формулу (4) для досліджуваних рідини й води (еталонної рідини), в'язкість якої  $\eta_v$  відома. За допомогою нескладних перетворень цих двох формул маємо

$$\eta_p = \frac{\rho_p T_p \eta_p (\lambda_\alpha - \lambda_0)}{\rho_a T_a \eta_a (\lambda_a - \lambda_0)} \quad (5)$$

При визначенні  $\lambda_0$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_v$  маємо на увазі, що, відповідно до формули (3),

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_{n-1} = \ln(A_1/A_2) + \ln(A_2/A_3) + \dots + \ln(A_{n-1}/A_n) = \ln(A_{n-1}/A_1),$$

тому що  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_{n-1}$ .

Таким чином,

$$\lambda = (1/(n-1)) \cdot \ln(A_1/A_n) \quad (6)$$

### Порядок роботи

1. Спостерігати затухання коливань диска у повітрі. Для цього спочатку перемістити шкалу і підстроїти освітлювач таким чином, щоб зайчик знаходився на нулі шкали, а шкала була перпендикулярна до падаючого на неї променя. Злегка закрутити дрот так, щоб зайчик відхилився на 15-20 см. При коливаннях диска відрахувати 10-15 максимальних відхилень зайчика від нуля шкали в одну вибрану сторону, реєструючи амплітуду першого  $A_1$  і останнього  $A_n$  відхилень, та розрахувати  $\lambda_0$ .

2. Дослідити затухання коливань диска у воді. Для цього наповнити посудину водою так, щоб диск був повністю занурений, та виконати такі ж виміри, що й для повітря. Виміряти секундоміром час, за який відбувається 10-20 повних коливань, і визначити період коливань.

3. Спостерігати затухання коливань диска у досліджуваній рідині (пропонуються водні розчини). При цьому слід діяти так, як і в описаних дослідах з повітрям та водою. Визначити період коливань  $T_v$  та розрахувати  $\lambda_v$ .

4. Виміряти температуру води та розчину. За допомогою таблиці ( $\epsilon$  в лабораторії) визначити коефіцієнт в'язкості відповідно до температури.

5. Кожен з дослідів по визначенню  $\lambda_0$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_v$ ,  $T_0$ ,  $T_v$ , і  $T_p$  повторити по три рази. Результати вимірювань занести в таблицю.

Середовище	$A_1$	$A_2$	$\lambda$	$\Delta\lambda$	$T$	$\eta$	$\Delta\eta/\eta$	$\eta_{\text{ист}}$
						X	X	X
Повітря						X	X	X
						X	X	X
Середнє	XX	XX		$\sqrt{\langle \Delta\lambda_0^2 \rangle}$			X	X
						X	X	X
Вода						X	X	X
						X	X	X
Середнє	XX	XX		$\sqrt{\langle \Delta\lambda_a^2 \rangle}$			X	X
Досліджувана речовина								
Середнє	XX	XX		$\sqrt{\langle \Delta\lambda_\delta^2 \rangle}$				

Погрішність визначити за формулою:

$$\frac{\Delta\eta_p}{\eta_p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T_a}{T_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_p}{T_p}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\lambda_p}{\lambda_p - \lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\lambda_0}{\lambda_a - \lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0}\right)^2},$$

де  $\Delta T_v$  и  $\Delta T_p$ , визначаємо за формулою,

$$\Delta T^2 = \Delta T_{\text{сист}}^2 + t_{n,\alpha} \sqrt{\frac{\sum (\Delta T_i)^2}{n(n-1)}}.$$

### Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт в'язкості? Визначити його з (1).
2. Довести формулу (5) для визначення  $\eta_p$ .
3. Довести формулу (7) для розрахунків відносної похибки.

### Лабораторна робота №9

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ

Прилади та приладдя: основний прилад, випрямляч, мікроампер метр, амперметр, вольтметр, потенціометр ПП-63.

### Теоретичні відомості

Перенесення тепла від більш нагрітої частини якого-небудь тіла до менш нагрітої може здійснюватися трьома засобами: теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням. У випадку передачі тепла шляхом теплопровідності кількість тепла що проходить за час  $dt$  через площадку  $\delta S$ , перпендикулярно до напрямку, в якому існує градієнт температури, визначається рівнянням:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} \delta S dt, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, який залежить від властивостей речовини. Для газів коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, він зростає при її збільшенні. Знак “–” у формулі означає, що перенесення тепла відбувається у напрямі зменшення температури.

Один з методів визначення коефіцієнта теплопровідності газів такий. По осі циліндричної труби, в середині якої знаходиться досліджуваній газ, натягається тонка дротинка. Якщо дротинка нагрівається електричним струмом, а температуру трубки підтримувати постійною, то в напрямі радіуса трубки виникає градієнт температури. Через будь-яку коаксіальну з дротинкою циліндричну поверхню радіуса  $y$  за одиницю часу пройде кількість тепла:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} 2\pi y l, \quad (2)$$

де  $l$  – довжина дротинки. Для стаціонарного процесу  $q$  – постійна.

Розділимо в цьому випадку перемінні і про інтегруємо:

$$q \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y} = -2\pi l \int_{T_1}^{T_2} dT$$

де  $y_1$  – радіус дротинки;  $T_1$  – її температура;  $y_2$  – внутрішній радіус трубки;  $T_2$  – температура газу біля внутрішньої поверхні трубки.

Внаслідок одержимо:

$$\lambda = \frac{q}{2\pi l} \frac{\ln(y_2 / y_1)}{T_1 - T_2}. \quad (3)$$

Отже, щоб визначити коефіцієнт теплопровідності, слід знати кількість тепла, яка переноситься від дротинки до стінки трубки шляхом теплопровідності, різницю температури між шарами газу, які безпосередньо прилягають до поверхні дротинки і трубки (ми будемо вважати, що вона дорівнює різниці температур між дротинкою і трубкою), та розміри дротинки і трубки.

Величина у формулі (3) завжди менше тієї кількості тепла  $q' = IU$  ( $I$  – сила струму,  $U$  – напруга), яка виділяється дротинкою, тому що крім теплопровідності тепло може передаватися від дротинки до трубки тепловипромінюванням і конвекцією. Для оцінки кількості тепла, яке віддає дротинка шляхом випромінювання, можна скористатися законом Стефана-Больцмана, за яким з одиниці поверхні абсолютно чорного тіла за одиницю часу випромінюється енергія

$$W = \sigma T^4,$$

де  $T$  – абсолютна температура чорного тіла, коефіцієнт  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>. Будь-яке тіло, яке не є абсолютно чорним, при тій же температурі випромінює меншу енергію:

$$W = A\sigma T^4,$$

де  $A$  – поглинальна здібність тіла. Для всіх тіл  $A < 1$ . Наприклад для нікелю  $A = 0.4$ .

Якщо  $T_1$  – абсолютна температура нагрівної дротинки,  $T_2$  – абсолютна температура стінки трубки і якщо вважати, що все випромінювання дротинки падає на стінку трубки, то енергія, яка виділяється через випромінювання,  $q_2 = A\sigma(T_1^4 - T_2^4)$ ,

де  $S$  – площа поверхні дротинки. Підрахована енергія випромінювання в умовах цієї задачі складає декілька процентів від енергії, яка виділяється струмом, що тече по дротинці і тут не враховується. Тому будемо вважати, що  $q = q' = IU$ .

### Опис приладу

Вплив конвекції на передачу тепла із вертикально розташованої мідної трубки діаметром  $d$ , по осі якої натягнута ніхромова дротинка діаметром  $d$  (вона підведена до ізольованих від трубки клем).

Для виміру енергії, яку виділяє нагрівна дротинка, послідовно із нею включається амперметр, а паралельно вольтметр. Нагрівання дротинки відбувається завдяки випрямляча, вихідну напругу якого можна регулювати за допомогою перемикача.

Вимір температури дротинки проводять за допомогою термопари, з'єднаної з мікроамперметром ( $T_1 = T_{\text{кім}} + \alpha n$ ), де  $\alpha$  – постійна, яка вказана на приборі,  $n$  – кількість поділок. Температуру у внутрішній стінці трубки вимірюють за допомогою потенціометра ( $T = T_{\text{кім}} + \alpha_1 \epsilon$ ), де  $\epsilon$  – е.р.с. термопари. В модифікованій установці із малою по висоті трубкою замість потенціометра використовують мікрвольт метр. У цьому приладі дротинка скручена у спіраль і розташована у тонкій трубці. Тому беруть, що  $u_1$  дорівнює зовнішньому радіусу цієї тонкої трубки.

### Порядок роботи

Ввімкнути електричну мережу. При цьому перемикач напруги випрямляча поставити на мінімальне значення. Зачекати декілька хвилин і записати показання всіх приладів. Так повторювати для кожного ступеня напруги. Результат записати у таблицю і подати у вигляді графічної залежності  $\lambda$  від  $T$ .

$n/n$	$I$	$U$	$n(\mu A)$	$E(mv)$	$T_1$	$T_2$	$q$	$\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$\lambda_{\text{іст}}$

Абсолютні похибки вимірів електричних величин розрахувати відповідно класу точності приладів, згідно з (3) вивести формулу і оцінити відносну похибку розрахунку.

### Контрольні запитання

1. Як фізично обґрунтовується, що коефіцієнт теплопровідності газів в широких межах не залежить від тиску?
2. При яких умовах починає виявлятися залежність  $\lambda$  від тиску?
3. При яких умовах передача теплоти в газі відбувається переважно шляхом теплопровідності?
4. Вивести формулу (3) для розрахунку коефіцієнта теплопровідності.

## Лабораторна робота № 10

### ВИВЧЕННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ГІПОСУЛЬФІТУ

**Прилади та приладдя:** колбочка з гіпосульфідом, термометр, електронагрівач, секундомір, хімічний стакан.

### Теоретичні відомості

Гіпосульфід - сіркуватоокислий натрій ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) - має відому точку плавлення, при якій він переходить у рідину. Рідина чистого гіпосульфїту може бути значно переохолоджена відносно температури плавлення, якщо охолоджувати його відносно швидко і не штовхати рідину.

Переохолоджений гіпосульфїт при внесені в нього малих кристалів (центрів кристалізації) починає кристалізуватися. При ньому виділяється теплота кристалізації, що приводить до підвищення температури майже до точки плавлення.

На рис. 1 схематично показана залежність температури від часу, яка обумовлена процесами, що діються під час плавлення та кристалізації гіпосульфїту. Спочатку температура росте пропорційно часу згідно з відрізком  $O'A$ . Нахил прямої до осі абсцис залежить від теплоємності кристалічного матеріалу та інтенсивності нагрівання.

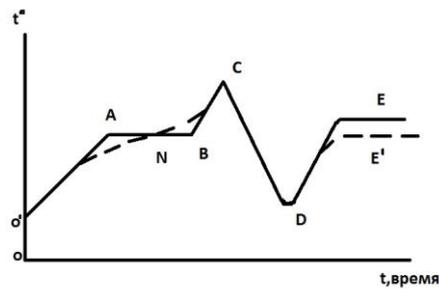


Рис. 1. Залежність температури гіпосульфїту від часу

Під час плавлення речовини, що не має домішок, її температура перестає збільшуватися, тому що тепло йде на збільшення потенціальної енергії (розрив зв'язків між молекулами, які склали кристалічну решітку). Теоретично ця частина графіка повинна бути горизонтальним відрізком прямої (відрізок АВ). Але якщо теплопровідність речовини порівняно мала, температура в ній неоднорідна. Термометр, який сам відводить тепло, вимірює температуру в найближчому до нього шарі речовини. Плавлення речовини йде неодноразово. Пунктирна крива на рис. 1 показує, яка може бути реальна залежність температури від часу. Середню температуру на близькому до горизонтального відрізка (точку N) можна вважати за температуру плавлення.

### Порядок роботи

Після підвищення температури рідкого гіпосульфїту до  $80^{\circ}\text{C}$  його починають охолоджувати. Охолоджують спочатку на повітрі до температури  $50^{\circ}\text{C}$ , а потім у воді, зануривши колбу у посуд (хімічний стакан) з холодною водою. Ні в якому разі не можна охолоджувати колбу відразу у воді, бо від цього вона трісне. Для охолодження в повітрі і занурення у воду колбу з речовиною перемішують уздовж штатива.

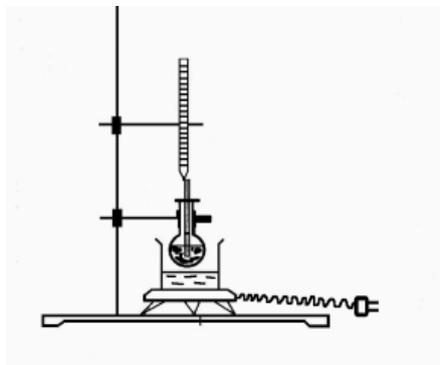


Рис.2. Схема приладу для вивчення кристалізації гіпосульфїту

Після охолодження рідкого гіпосульфїту до  $30^{\circ}\text{C}$  посуд з водою приймають і кидають у розплав гіпосульфїту маленькі кристалики - центри кристалізації. Починається кристалізація. Під час кристалізації температура підвищується майже до точки плавлення, а потім мало змінюється аж до кінця кристалізації (відрізок DE). При інтенсивному відводі тепла (якщо не прийняти посуд з водою) точка плавлення, як правило, не досягається і температурна залежність відповідає відрізку DE.

При значному переохолодженні, обережно нахиливши колбу із гіпосульфїтом, можна побачити, що рідина стала більш в'язкою. Рідини, в яких в'язкість швидко збільшується при зменшенні температури, можуть твердіти без кристалізації (як скло). Це пов'язано з тим, що при збільшенні в'язкості, зменшується рухливість молекул, тому зменшується кількість виникаючих спонтанно центрів кристалізації, а існуючі центри ростуть дуже повільно.

### Порядок роботи

Розташувати колбу з гіпосульфідом та термометром над поверхнею нагрівача і ввімкнути останній в електричну мережу. Записувати температуру гіпосульфідом, що вимірюється термометром, через кожні 0.5 хвилини.

Коли весь гіпосульфід перетвориться у рідину, а температура підвищиться до 80°C, нагрівач вимикають. Гіпосульфід охолодити на повітрі до температури 50°C, а потім колбу з речовиною занурити у воду. Продовжувати записувати температуру через кожні 0.5 хвилини.

Після охолодження речовини до 30°C посуд з водою прийняти, (колбу переміщують на штативі угору). Вкинути маленький кристалик гіпосульфідом і продовжувати вивчати залежність температури від часу; спостерігати за ходом кристалізації. Перестати записувати після того, як вона після збільшення почне зменшуватися. Дані досліду занести у таблицю. Побудувати графік залежності температури гіпосульфідом від часу. На відрізках цієї залежності, що відповідають кристалізації та плавленню, відмітити значення температури плавлення.

#### Контрольні запитання

1. Чому температура під час плавлення не підвищується?
2. Пояснити залежність температури від часу при плавленні і кристалізації гіпосульфідом, розглядаючи побудований графік.
3. Указати на графіку відрізок часу, коли рідкий гіпосульфід знаходиться у переохолодженому стані.
4. Описати рух молекул у різних агрегатних станах речовини.

## Лабораторна робота №11

### Визначення вологості повітря

**Прилади та приладдя:** психрометр, стаканчик для змочування одного з термометрів психрометра.

**Мета роботи** полягає у визначенні абсолютною та відносною вологості повітря.

#### Теоретичні відомості

Атмосферне повітря має у своєму складі деяку кількість водяної пари, що обумовлює вологість повітря. Кількість водяної пари в повітрі при даних умовах характеризується абсолютною та відносною вологістю повітря.

Абсолютною вологістю називається кількість водяної пари, що знаходиться в одиниці об'єму повітря. Як правило, її виражають в г/м<sup>3</sup>.

Виразимо густину повітря при нормальних умовах з рівняння стану ідеального газу:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{P_{\text{пов}0} \mu_{\text{пов}}}{RT_0}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{пов}}$  – тиск повітря;  $\mu$  – молярна маса;  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура.

Аналогічно для густини водяної пари далекої від насичення, при будь-якому тиску  $P$  і темпе-

ратурі  $T$ , маємо, що  $\rho_{\text{парі}} = \frac{P\mu_{\text{парі}}}{RT}$ .

$$\text{Тому} \quad (\rho_{\text{парі}}/\rho_{\text{нов}}) = (P\mu_{\text{парі}}T_0)/(P_0\mu_{\text{нов}}T) \quad (2)$$

$$\text{або} \quad \rho_{\text{парі}} = \rho_{\text{нов}}(P\mu_{\text{парі}}T_0)/(P_0\mu_{\text{нов}}T) \quad (3)$$

Підставивши значення  $\rho_{\text{нов}}=1293$  г/м<sup>3</sup> і виразивши  $P_{\text{пов}}$  в мм рт. ст. ( $1.013 \cdot 10^5$  н/м – 760 мм рт. ст.), одержимо



**Рис. 1.**  
**Психрометр**

$$\rho_{\text{пари}} = 1,06 \frac{P}{1 + \alpha t} \quad (4)$$

Формула (4) дає змогу визначити абсолютну вологість повітря ( $\rho$  в  $\text{г}/\text{м}^3$ ), якщо відома пружність (парціальний тиск) водяної пари (з цієї формули також видно, що при малих значеннях  $t$ : величина абсолютної вологості в  $\text{г}/\text{м}^3$  мало відрізняється від величини пружності водяної пари  $P$ , вимірюваної в мм рт. ст. Тому на практиці найчастіше визначають абсолютну вологість не за кількістю водяної пари  $m$  в грамах, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря, а за її пружністю  $P$ , вираженою в мм рт. ст.

Відносна вологість характеризує ступінь насичення повітря паром. Відносною вологістю називають відношення абсолютної вологості до кількості пари в  $1 \text{ м}^3$ , яка насичує повітря за даної температури:

$$W = m/M. \quad (5)$$

Отже, можемо написати

$$W = (m/M) \cdot 100\% = (P/P_0) \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $P_0$  – пружність насиченої водяної пари за температури  $T$ . Відносну вологість звичайно виражають у процентах.

Визначення вологості повітря проводять по психрометру або гігрометру.

### ***Визначення абсолютної і відносної вологості повітря за допомогою психрометра.***

Психрометр – найбільш поширений прилад для визначення вологості повітря. Якщо два однакових термометри знаходяться в однакових потоках повітря, показання цих термометрів повинні бути однаковими. Якщо балончик одного з термометрів буде весь час зволожений, наприклад, обгорнутим мокрою тканиною, то показання термометрів будуть різними. Завдяки випаровуванню води з тканини так званий "мокрый" термометр буде показувати більш низьку температуру, ніж сухий. Чим менша вологість оточуючого повітря, тим інтенсивнішим буде випаровування і тим нижчими будуть показання "морого" термометра. Рівниця температур, виміряна цими термометрами, характеризуватиме вологість повітря.

Тепло, що йде на випаровування, надходить до "морого" термометра вів повітряного потоку, який утворюється вентилятором. За законом тепловіддачі Ньютона кількість теплоти ( $Q_1$ , яка переходить через поверхню системи 5, залежить від різниці температур між системою і оточуючим середовищем:

$$Q_1 = \alpha(v)(t - t_1)S_1, \quad (7)$$

де  $\alpha(v)$  – так званий коефіцієнт тепловіддачі, який залежить від швидкості повітряного потоку  $v$ ;  $t_1$  – температура "морого" термометра  $t$  – температура оточуючого середовища. У методі психрометра  $(t - t_1)$  – це максимальна різниця температур сухого і "морого" термометрів.

З іншого боку, масу води, що випаровується за одиницю часу, можна за формулою Дальтона представити так:

$$m_{\text{вип.}} = K(v)S_2(P_0 - P)/P_{\text{пов.}}$$

Тут  $S_2$  – площа поверхні, з якої відбувається випаровування;  $P_{\text{пов.}}$  – тиск повітря;  $P_0$  – пружність насиченої водяної пари при температурі рідини, що випаровується, тобто при темпера-

турі  $t_1$ ;  $P$  – пружність водяної пари, що знаходиться в повітрі;  $K(v)$  коефіцієнт пропорційності, що залежить від швидкості потоку повітря.

Кількість теплоти  $Q_2$ , яка йде на випаровування маси води, очевидно, дорівнює

$$Q_2 = m_{\text{вип.}} \lambda = \lambda K(v) S_2 (P_0 - P) / P_{\text{пов.}} \quad (8)$$

де  $\lambda$  – питома теплота пароутворення воли.

При стаціонарному режимі, тобто при незмінних температурах  $t_1$  і  $t$   $Q_1 = Q_2$ . Враховуючи, що  $S_1 = S_2$ , з (7) і (8) одержимо

$$\frac{K\lambda(P_0 - P)}{P_{\text{пов.}}} = \alpha(t - t_1)$$

звідки

$$P = P_0(t_1) - A(t - t_1)P_{\text{пов.}}, \quad (9)$$

де  $A = \alpha / K\lambda$  – стала системи. Величина цієї сталої залежить від швидкості потоку повітря і знаходиться експериментально.

Будову стандартного аспіраційного психрометра показано на рис.1. Він складається з двох термометрів. Балончик правого термометра огорнутий тканиною. Аспіратор психрометра має пружинний вентилятор, що заводиться ключем **К**. Повітряні потоки входять у циліндри з термометрами знизу. А над балонами термометрів обидва потоки з'єднуються в один.

### Порядок роботи

Змочування тканини термометра проводиться за допомогою маленького хімічного стаканчика з водою. Ключем **К** майже повністю заводять вентилятор (5–7 обертів) і починають слідкувати за показаннями термометрів. Через 4–5 хвилин показання термометрів встановлюються і різниця  $(t - t_1)$  може бути виміряна. Абсолютна вологість визначається за формулою (9), враховуючи, що стала даного приладу  $A = 8.1 \cdot 10^{-4}$  (град мм рт. ст.)<sup>-1</sup>. Величину  $P_0(t_1)$ , що входить у формулу (9), знаходять з таблиці 1, а атмосферний тиск вимірюють барометром. Якщо з табл. 1 знайти тиск насиченої водяної пари  $P_0(t)$  при температурі оточуючого повітря  $t$ , то за формулою (6) можна розрахувати відносну вологість.

**Таблиця 1.** Значення тиску насиченої пари води (мм рт. ст.) в залежності від температури

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4.58	4.92	5.29	5.68	6.09	6.54	7.01	7.51	8.04	8.50
10	9.20	9.68	10.50	11.22	11.97	12.77	13.62	14.51	15.46	16.46
20	17.50	18.63	19.80	21.04	22.36	22.73	25.18	26.72	28.32	30.01
30	31.80	33.66	35.63	37.69	39.86	42.14	44.53	47.03	49.66	52.41

Похибка визначення абсолютної вологості  $P$  пов'язана в найбільшій мірі з похибкою визначення температури мокрого термометра. Тому її визначають за формулою

$$\Delta P = \Delta P_0(t_1) + AP\Delta t_1. \quad (10)$$

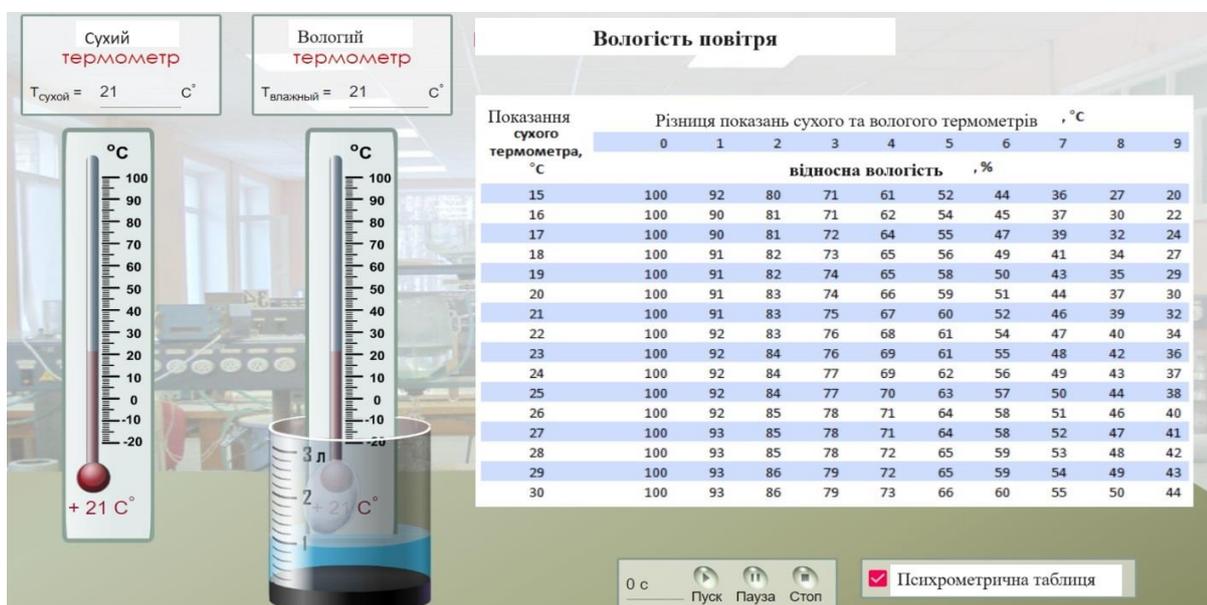
Похибку  $\Delta P_0(t_1)$  знаходять як результат множення швидкості зміни тиску з ростом температури  $dP_0/dt$  за температурі  $t_1$  на величину стандартної похибки визначення температури ( $\Delta t_1 = \Delta S(t_1)$ ).

Похідну  $dP_0/dt$  знаходиться з табл. 1. Наприклад, в інтервалі температури він 12 по 13°C  $dP_0/dt = (11.22-10.50)$  у мм рт. ст./град. Всі результати вимірів і розрахунків заносять у таблицю 2

Таблиця 2

№ пп	$P_{\text{пов.}}$	$t$	$P_0$	$t_1$	$P_1$	$P$	$\Delta t_1$	$\Delta P$	$W$	$\Delta W$
1			X		X	X		X		
2			X		X	X		X		
3			X		X	X		X		
Середнє							$\Delta S(t_1)$			

**Визначення абсолютної і відносної вологості повітря за допомогою віртуального стенда**



### Контрольні запитання

1. Що називається вологістю повітря (абсолютною, відсною)?
2. Що таке точка роси?
3. Чому пружність насиченої пари збільшується а ростом температури?
4. Вивести формулу (10).

### Лабораторна робота №12

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ

**Прилади та приладдя:** прилад з пристроєм для підвищення тиску та манометром, посудинки а водою та розчином, капіляри.

#### Теоретичні відомості

Молекули рідини біля поверхні знаходяться в особливих умовах. Такі молекули мають більшу потенціальну енергію, ніж молекули, що містяться в об'ємі рідини. Тому рідина мас

як можна меншу вільну поверхню, а поверхневий шар увесь час натягнутий, як розтягнута гумова плівка. Сила поверхневого натягу направлена по дотичній до поверхні рідини і діє нормально до будь-якої лінії по границі поверхні рідини і будь-якого іншого твердого чи рідкого тіла. Сила, яка діє на одиницю відстані уздовж такої лінії, зветься коефіцієнтом поверхневого натягу. Він є питомою характеристикою рідини.

Якщо капіляр занурити в рідину, то рідина підніметься або опуститься в капілярі на деяку висоту над рівнем рідини в посудині. Це явище пояснюється тим, що тиск, під яким знаходиться рідина, залежить від форми її поверхні. У капілярних трубках внаслідок взаємодії молекул рідини з молекулами речовини капіляра поверхня рідини викривлюється.

Залежність тиску, під яким знаходиться рідина, від форми її поверхні описується формулою Лапласа

$$P = P_0 + \alpha(1/R_1 + 1/R_2) \quad (1)$$

де  $P$  – тиск під викривленою поверхнею;  $P_0$  – тиск під плоскою поверхнею;  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $R_1$ , та  $R_2$  – головні радіуси кривизни поверхні рідини. У капілярній трубці  $R_1 = R_2 = R$ , тобто поверхня рідини має сферичну форму. У цьому випадку формула Лапласа має вигляд

$$P = P_0 + 2\alpha/R. \quad (2)$$

Якщо поверхня опукла, то радіус кривизни  $K = 1/R$  і додатак до тиску будуть більше нуля. При угнутій поверхні  $K < 0$ . Отже, при змочуванні рідиною стінок тиск під угнутим меніском у трубці буде менший за тиск під плоскою поверхнею рідини в широкій посудині на величину  $2\alpha/R$ . При незмочуванні, навпаки, тиск буде більший на таку ж величину. Цим і пояснюється те, що рідина в капілярних трубках при змочуванні піднімається, а при незмочуванні опускається. Очевидно, що при рівновазі

$$2\alpha/R = \rho gh,$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення сили земного тяжіння;  $h$  – висота підняття рідини в капілярній трубці відносно рівня рідини в широкій посудині;  $R$  – радіус сферичної поверхні рідини в капілярі. При повному змочуванні стінок капіляра рідиною  $R$  дорівнює радіусу капіляра.

Якщо збільшити зовнішній тиск над поверхнею рідини в капілярі, що його змочує, то можна досягти того, що рівні рідини в широкій посудині і в капілярі зрівняються. Нехай для цього зовнішній тиск потрібно збільшити на величину  $\Delta P$ . Очевидно, при цьому  $\Delta P = 2\alpha/R$ . Вимірявши цей додатковий тиск  $\Delta P$ , можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини.

**Опис приладу.** Прилад складається з капіляра  $n$ , з'єднаного за допомогою гумової трубки  $A$  з манометром  $M$  широкою скляною, трубкою (воронкою)  $B$ , яка опущена в посудину з водою (рисунок). Опускаючи і піднімаючи трубку  $B$ , можна змінювати тиск у системі.

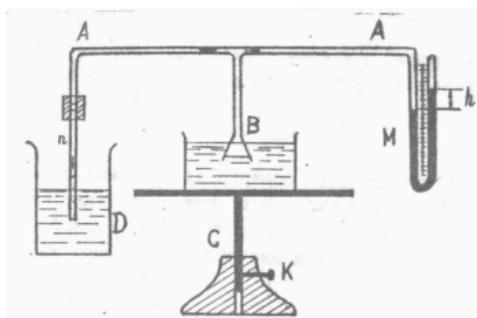


Схема приладу для визначення коефіцієнту поверхневого натягу рідини.

## Порядок роботи

1. Для визначення радіусів капілярних трубок провести досліди з рідиною, коефіцієнт поверхневого натягу  $\alpha$  якої відомий. Досліджувану рідину налити у посудину  $B$  і опустити в неї капіляр (точніше поставити посудину, в яку вже налита ця рідина). Повільно підняти столик  $C$  за допомогою спеціальної тяги і виведеної ручки, збільшити тиск в системі і довести рівень рідини в капілярі до рівня рідини в посудині  $B$ . Цей надлишковий у порівнянні з атмосферним тиск  $\Delta P$  виміряти за різницею рівнів рідини в манометрі  $M$ . Він дорівнює, очевидно, тискові, обумовленому викривленим поверхні рідини в капілярі. Таким чином,

$$2\alpha_1/R = \rho_1 g \Delta h_1,$$

де  $\rho_1$  – густина рідини в манометрі;  $\Delta h_1$  – різниця рівнів цієї рідини в манометрі. Звідси,

$$R = 2\alpha_1 / (\rho_1 g \Delta h_1),$$

2. Описаний вище дослід провести з рідиною, поверхневий натяг,  $\alpha$ , якої треба визначити (і для тих самих капілярів). Розрахувати коефіцієнт поверхневого натягу за формулою

$$\alpha = \rho_1 g \Delta h_2 R / 2,$$

де  $\Delta h_2$  – значення різниці рівнів в манометрі в дослідах з рідиною, коефіцієнт  $\alpha$  якої невідомий;  $R$  – розраховані радіуси капілярів.

3. Результати вимірювань і розрахунків занести у таблицю. Знайти середнє значення коефіцієнта  $\alpha$  та похибку його визначення.

## Контрольні запитання

1. Яка природа поверхневого натягу?
2. Вивести формулу Лапласа для визначення тиску під викривленою поверхнею рідини.
3. Чому рівні рідини в капілярі і в посудині, в яку він занурений, різні?

## Лабораторна робота 13

### ВИВЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ

**Прилади та приладдя:** прилад Ребіндера .

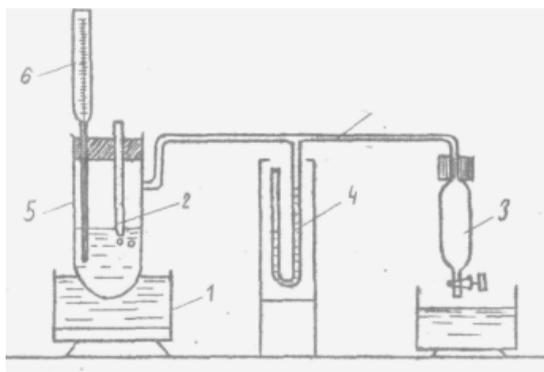


Схема приладу за методом Ребіндера

Коефіцієнт поверхневого натягу в даній роботі визначається за методом Ребіндера. Прилад Ребіндера (рисунок) складається з наповненого водою аспілятора 3, з'єднаного за допомогою гумових трубок 7 з U-подібним манометром 4 і верхнім повітряним простором посудини 5, в яку наливається невелика кількість досліджуваної рідини. У посудину 5 введена (скрізь пробку) скляна трубка 2 з вузьким кінцем, що дотикається до поверхні рідини.

Якщо відкрити кран аспілятора, з нього почне витікати вода і над поверхнею досліджуваної рідини створиться деяке розрідження. Манометр 4 вимірює різницю між атмосферним

тиском і тиском, який створюється над поверхнею рідини в посудині 5. Ця різниця тисків  $\Delta P$  приводить до виникнення на нижньому відтягнутому кінці трубки 2 повітряної бульбашки. При збільшенні  $\Delta P$  ця бульбашка поступово збільшується, але радіус  $R$  кривизни спочатку зменшується (бо ж він був дуже великий, коли бульбашка тільки з'явилася). Різниця тисків  $\Delta P$ , що зростає, урівноважується тиском, обумовленим поверхневим натягом викривленої поверхні рідини на отворі трубки 2,

$$\Delta P = 2\alpha_1/R, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус кривизни бульбашки;  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини. Права частина (1) записана згідно з рівнянням Лапласа для сферичної поверхні рідини.

Зменшення радіуса бульбашки відбувається доти, доки він не стане рівним радіусу отвору трубки 2. Подальше зменшення радіусу бульбашки неможливе. Тому максимальний тиск, обумовлений поверхневим натягом

$$\Delta P_{\max} = 2\alpha/r = \rho g \Delta h_{\max} = \rho g H \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина рідини в манометрі;  $H$  – різниця рівнів у колінах манометра.

При подальшому витіканні води з аспірації тиск у системі зменшується і відрізняється від атмосферного тиску на більшу величину, ніж  $\Delta P_{\max}$ . При цьому радіус бульбашки трохи зростає, величина  $2\alpha/r$  стає меншою, ніж  $\Delta P_{\max}$ . Далі бульбашка проривається, повітря з трубки через рідину попадає в посудину  $B$ , тиск у ній зростає, а різниця тисків зменшується. Вода з аспірації продовжує витікати, різниця тисків  $\Delta P$  знову збільшується, на кінці трубки 2 утворюється нова бульбашка, і весь процес повторюється.

Розрахунок коефіцієнта поверхневого натягу проводиться за формулою (2), Через те, що отвір трубки не являє собою кола,  $r$  краще розглядати як параметр приладу, що підлягає експериментальному визначенню. Тоді з (2) випливає

$$\alpha = A H. \quad (3)$$

Для визначення  $A$  треба провести дослід з рідиною, поверхневий натяг  $\alpha_0$  якої відомий, наприклад з дистильованою водою. Очевидно, для сферичної поверхні рідини:

$$A = \alpha_0 / H_0, \quad (4)$$

де  $H_0$  - максимальна різниця тисків, визначена по манометру при вимірюваннях з еталонною рідиною. Визначивши сталу приладу  $A$ , знаходять коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини за формулою (3).

### Порядок роботи

1. Відкривши пробку аспірації 3, налити в нього воду, а посуд 5 заповнити приблизно до половини дистильованою водою. Закривши пробку, відкрити кран аспірації так, щоб після пониження тиску в системі повітряні бульбашки рідко відривалися від трубки 2. Виміри тиску по манометру 4 виконувати тоді, коли різниця рівнів у манометрі досягне максимального значення, тобто перед тим, як повітряна бульбашка на отворі трубки 2 прорветься. Записати дані 10 вимірів величини  $H_0$ . Визначити температуру в посудині 5 по термометру 6. З таблиць знайти коефіцієнт поверхневого натягу води при даній температурі. За цими даними визначити сталу приладу  $A$ .

2. Наповнити посуд 5 досліджуваною рідиною (приблизно до половини), так щоб кінець трубки 2 дотикався до її поверхні. Занурити посудину 5 в посудину, через яку протікає вода від термостату, температура якої може бути встановлена на будь-якому рівні до  $100^\circ\text{C}$  (верхній отвір трубки 2 повинен бути у повітрі). Виключити термостат. За допомогою головки регулюючого термометра термостата встановити температуру на декілька градусів вище кімнатної. Приблизно через 5 хвилин, коли ця температура встановиться, провести вимірювання. Знову відрегулювати термостат на нову температуру, більшу за попередню, і через 5 хвилин виконати виміри  $H$  для цієї нової температури. Дослід повторювати доти, доки температура не досягне  $70\text{-}80^\circ\text{C}$ .

3. Розрахувати значення коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини за даними всіх вимірювань. Результати занести в таблицю й побудувати на їх основі графік залежності  $\alpha=f(t)$ . Якщо з таблиць відома залежність досліджуваної рідини від температури, порівняти результати розрахунків з табличними даними. Розрахувати похибку визначення  $H_0$  за формулою

$$\Delta_S(H_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_{0_i}^2}{n(n-1)}}$$

Таблиця

N n/n	$\alpha_{\text{в}}$	$H_0$	$\Delta H_0$	A	$\Delta A/A$	$t^\circ\text{C}$	H	$\alpha(t)$	$\Delta\alpha/\alpha$
1	X								
2	X								
10	X								
<b>Середнє</b>	X		$\Delta_S(H_0)$						

Рекомендується розрахувати аналітичним методом (мінімізація середньоквадратичного відхилення) параметри найкращої прямої, якою апроксимується експериментальна залежність  $\alpha(t)$  (бажано з використанням ЕОМ).

### Контрольні запитання

1. Яка природа поверхневого натягу?
2. Вивести формулу Лапласа (ТУ).
3. Розглянути термодинаміку поверхневого натягу і пояснити його залежність від температури.
4. Якій умові повинна відповідати найкраща пряма, що відповідає експериментальній й залежності.
5. Як треба вибрати масштаби при будівництві графічної залежності?

### Лабораторна робота №14

#### ВИВЧЕННЯ МОДЕЛІ БЛИЖНЬОГО ПОРЯДКУ РІДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУНКЦІЇ РАДІАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ АТОМІВ

**Прилади та приладдя:** прилад а кульками, лінійка, комп'ютер.

#### Теоретичні відомості

Розглянемо, що являє собою функція радіального розподілу атомів на прикладі двовимірної ґратки, яка зображена на рис. 1. Виберемо довільний атом A (вузол решітки) за центр координатної системи. На найближчій відстані до нього розташовані  $n_1=4$  атоми. Найменша відстань між атомами визначається їх ефективними розмірами і особливостями взаємодії.

Проведемо коло радіусом  $r_1$ , навколо атома A. Це коло називається координаційним, а число атомів  $n_1$ , на даній відстані  $r_1$  від центрального атома – координаційним числом.

Аналогічно можна визначити число атомів  $n_2$  на відстані  $r_2$ , наступній за найближчою, і провести координаційне коло радіусом  $r_2$  (у нашому випадку  $n_2$  також дорівнює чотирьом).

Якщо продовжити цей процес систематизації розміщення атомів у решітці, то одержимо серію координаційних кіл, що охоплюють всю сукупність атомів. Кожна структура характеризується своїм специфічним положенням координаційних кіл, ( $r_1, r_2, r_3, \dots, r_v$ ) і відповідними значеннями координаційних чисел ( $n_1, n_2, n_3, \dots, n_v$ ). Розміщення атомів

даної структури відносно центрального (довільно вибраного атома) представляють у вигляді залежності координаційних чисел від міжатомних відстаней  $r_i$ . Для двовимірної решітки така залежність показана на рис. 2. Ця залежність дискретна.

Описану схему використовують і для характеристики розміщення атомів у тривимірній ґратці. Причому в тривимірній структурі роль координаційного кола відіграє координаційна сфера. У таблиці 1 приведені значення координаційних чисел для перших шести координаційних сфер найбільш розповсюджених кристалічних структур: об'ємноцентрованої, ОЦК, гранецентрованої, ГЦК, і гексагональної компактної, ГК.

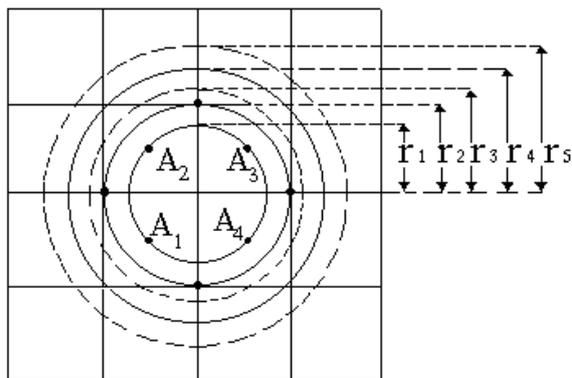


Рис. 1

Рис. 1. Координаційні «сфери» двовимірної квадратної кристалічної ґратки,  $a$  – період решітки

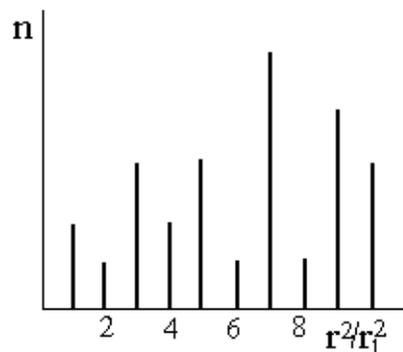


Рис. 2

Рис. 2. Розподіл атомів за координаційними «сферами» двовимірної ґратки

Таблиця 1

Тип структури	Номер координаційної сфери					
	1	2	3	4	5	6
ОЦК	8	6	12	24	8	6
ГЦК	12	6	24	12	24	8
ГПУ	12	6	2	18	12	16

На відміну від твердих тіл (кристалів) атоми в рідинах, аморфних тілах розмішуються неупорядковано і не на чітко визначених відстанях один від одного, але і не зовсім рівномірно, як у газах. На невеликій відстані від даного атома існує так званий близький порядок у розміщенні атомів, який характеризує особливості відхилення координаційного числа від середнього значення, що відповідає рівномірному розподілу атомів. Відхилення обумовлені скінченними розмірами атомів та їх взаємодією. На великих відстанях у порівнянні з розмірами атомів відхилення координаційного числа від середнього значення практично відсутні.

У випадку рідин та аморфних твердих тіл розглядають число атомів не на поверхні точно визначених сфер, а у сферичних прошарках. Якщо провести навколо даного атома дві сфери з радіусами  $r$  та  $r+\Delta r$ , то об'єм сферичного прошарку буде дорівнювати  $4\pi r^2 \Delta r$ . Визначимо радіальну густину молекул через кількість молекул у сферичному шарі:

$$\rho(r) = \frac{n_r}{4\pi r^2 \Delta r}, \quad (1)$$

тобто це середня кількість молекул в одиниці об'єму цього шару. Позначимо через  $r_0$  середню густину молекул. Рентгенівські дослідження показують, що зі зростанням відстані  $r$  гус-

тина  $g(r)$  наближається до  $g_0$ , а в разі малих відстаней  $g(r)$  може бути або більше, або менше ніж  $g_0$ .

Радіальною, або парною функцією розподілу  $g(r)$  називають відношення

$$g(r) = r(r)/r_0. \quad (2)$$

Вона характеризує кореляції взаємного розташування молекул у просторі (відхилення від хаотичного розміщення). На рис. 3 графічно зображена функція  $g(r)$  для рідкого натрію, одержана на основі рентгенівського дослідження. Як бачимо, ця функція зростає зі збільшенням  $r$  від значення  $g(r)=0$  на малих відстанях (сусідній атом не може влізти в середину того, що розглядається), а потім змінюється так, що стає то більшою, то меншою за одиницю. Однак чим більша відстань від атома, який береться за початковий, тим менші відхилення значень функції  $g(r)$  від одиниці. Для рівномірного розподілу атомів  $g(r) = 1$  для всіх  $r$ .

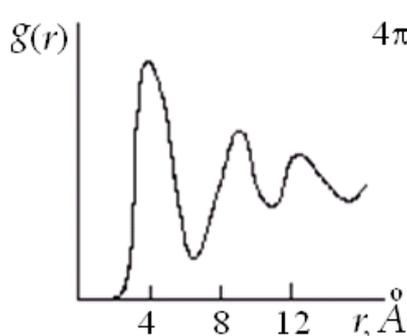


Рис. 3. Парна функція  
радіального розподілу атомів

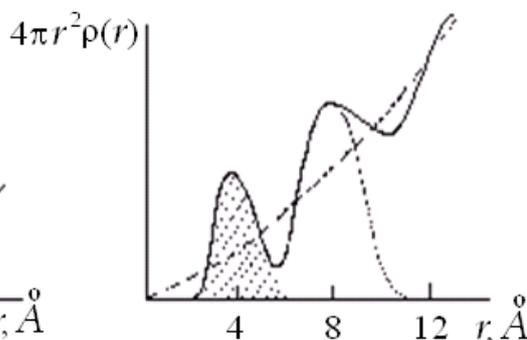


Рис. 4. Функція  
атомного розподілу

Зазначимо, що з графіком радіального розміщення в ідеальному кристалі (рис. 2) краще порівнювати графік так званої функції атомного розподілу  $4\pi r^2 \rho(r)$ , якісний вигляд якого відтворено на рис. 4. Добуток  $4\pi r^2 r Dr$  визначає число атомів у сферичному шарі, утвореному сферами з радіусами  $r$  і  $r+Dr$ . Тому площі під піками графіка визначають кількості атомів у відповідних координаційних сферах (на рис. 4 заштрихована площа під першим піком). Однак вирішення того, як розділити між піками площу їх перетину, є досить складною проблемою. Тому з достатньою точністю можна визначити кількість атомів тільки для перших двох координаційних сфер. Пунктирна крива на рис. 4 відповідає функції  $4\pi r^2 \rho_0$ .

У двовимірному випадку атомну густину в прошарку  $\Delta r$  (кільце) на відстані  $r$  від вибраного атома можна записати як відношення

$$\rho(r) = \frac{\Delta N(r, \Delta r)}{2\pi r \Delta r},$$

де  $\Delta N(r, \Delta r)$  – кількість атомів або молекул, центри яких знаходяться у кільці площею  $2\pi r \Delta r$ . Середню густину  $\rho_0$  для описаної нижче моделі із  $n_{\text{кул}}$  скляних кульок коробці (дискова) слушно знайти як відношення їх загальної кількості молекул до площі розглянутого двовимірного об'єму.

### Опис приладу та способу розрахунків

У роботі вивчається невпорядковане розміщення молекул у двовимірній рідині (аморфному тілі) на моделі. Модель побудована так. В об'ємі у формі циліндра розміщується  $N$  кульок однакового діаметра одним шаром, причому частина простору залишається незайнятою. Циліндр зверху закритий пластинкою зі скла чи плексигласу на відстані від дна, трохи більший від діаметра кульок. Дно, прозора пластинка і кульки виготовлені з матеріалів великої твердості, щоб взаємодію кульок між собою і матеріалом циліндра можна було вважати пружною. Якщо ці вимоги виконуються, то розміщення кульок у моделі буде відповідати ро-

зміщенню не взаємодіючих молекул. Така будова моделі дозволяє стверджувати, що всі кульки є еквівалентними. Тому, якщо зробити декілька кульок міченими і поворотами та нахилами змінювати розміщення кульок в моделі, то частота появи мічених кульок на відстані  $r_i$ , буде відповідати ймовірності даної міжатомної відстані, що дозволить розрахувати функцію  $g(r)$  (2).

Позначимо кількість дослідів через  $p$ , кількість вимірювань в одній послідовності через  $q$ , число інтервалів міжатомних відстаней через  $m$  (інтервали  $\Delta r$  порядку радіуса кульок). Повне число вимірювань  $N=pq$ ; ймовірність кожного інтервалу  $p_i=1/m$  для всіх  $i$ ; ймовірність попадання результату вимірювання в цей інтервал  $g(i)$ ; кількість вимірів з відстанями між кількома, що попадають в інтервал від  $r_i$  до  $r_i + \Delta r$ , дорівнюватиме  $n(r_i) = Np_i g(i)$ . Звідси одержимо:

$$g(r_i) = g(i) = n(r_i)/(Np_i) = m n(r_i)/N. \quad (3)$$

У наших приладах розміщено 4 кольорові (мічені) кульки. Тому в одному досліді можна виміряти 6 відстаней між ними. Рекомендується зробити 50 дослідів. Тоді  $N=50 \cdot 6=300$ .

У роботі необхідно шляхом вимірювань знайти величини  $n(r_i)$ , обчислити значення функції  $g(r_i)$ , накреслити графік залежностей  $g(r)$  та функції  $W(r_i)=2\pi r \rho_0 g(r)$  від  $r$  та обчислити значення координатних чисел для перших двох-трьох координатних "сфер" (кілець).

### Порядок роботи

До початку експерименту накреслити таблицю, вертикальні графі якої – це частота появи кульок на даній відстані і від центральної кульки. Відстані розбити на інтервали шириною  $\Delta r = 0.5$  см, діаметр кульок дорівнює 1 см. Перший інтервал, закінчується на відстані 0,5 см. Далі ідуть інтервали  $0,5 \pm 0,5$  см;  $1 \pm 0,5$  см;  $1,5 \pm 0,5$  см  $13.5 \pm 0,5$  см. Всього 28 інтервалів, тому  $p_i=1/28$ . Радіус циліндричної моделі з кульками дорівнює  $R$  (вимірюється); середня щільність для моделі  $\rho_0 = n_{кул}/\pi R^2$ , де  $n_{кул}$  – число кульок у моделі.

Після кожного перемішування кульок виміряти 6 відстаней між чотирма міченими кульками. Кожну відстань вимірювати три рази і середнє значення відмітити у відповідній графі рискою. Після завершення експерименту обчислити значення  $n(r_i)$ ,  $g(r_i)$  (за формулою (3)), а також значення функції атомного розподілу  $W(r_i)$ , яка у випадку двовимірної моделі дорівнює  $2\pi r \rho_0 g(r)$ . Всі обчислені величини  $n(r_i)$ ,  $g(r_i)$ , і  $W(r_i)$  занести у відповідні графі табл. 2. Одержані значення функції  $g(r_i)$ , і  $W(r_i)$  використати для побудови графіка відповідних залежностей. При цьому кожне значення  $g(r_i)$  або  $W(r_i)$ , що відповідав інтервалу  $i$ ,  $i+0.5$  см, відкладати посередині цих інтервалів, тобто в точках  $0.25 \dots 1.25$ ;  $1.75$ ;  $\dots 13.75$  (для перших інтервалів з  $r_i < 2$ ,  $n(r_i)=0$ ).

Графік накреслити в довільному масштабі. Після побудови графіка визначити кількість атомів, що приходиться на  $1 \text{ см}^2$  площі даного масштабу.

Таблиця 2

$r_i$ , см	1.5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	..	13	13,5
$n(r_i)$																		..		
$g(r_i)$																		..		
$W(r_i)$																		..		
$\rho_0$																				

## **Порядок роботи у випадку комп'ютерного варіанту**

У комп'ютерному варіанті використовується модель густого газу з твердих дисків, при зближенні яких відбуваються пружні удари. Розміри частинок  $3 \cdot 10^{-10}$  м, такі як у молекул, а їх швидкості відповідні до температури.

Визначення  $g(r)$  для комп'ютерної моделі виконується за даними значень відстаней між атомами. Якщо загальне число відстаней, що відповідають розглядуваним інтервалам по відстані (28 інтервалів шириною  $0,5 \text{ \AA}$  в межах кола радіусом  $14 \text{ \AA}$ ) дорівнює  $N$ , то на один інтервал у середньому припало б  $n_i = N/28$  значень. Але дійсні числа  $\Delta N_i$  різні для різних інтервалів. Відношення  $\Delta N_i/N$  характеризують ймовірності певних відстаней між атомами. Вони дорівнюють відношенню числа атомів у даному прошарку  $2\pi r_i \Delta r \rho_0 g(r_i)$  до загального числа атомів у розглянутому двовимірному об'ємі –  $\pi R^2 \rho_0$  ( $R = 14 \text{ \AA}$ ):

$$\Delta N_i/N = (2\pi r_i \Delta r \rho_0 g(r_i)) / (\pi R^2 \rho_0).$$

Звідси знаходимо:

$$g(r_i) = (\Delta N_i/N) R^2 / (2r_i \Delta r). \quad (4)$$

Після запуску файлу  $g(r).exe$  (програма  $G(r)$ ) буде запрошення ввести ширину колонок гістограми, температури, молярної маси газу. Потім з'явиться картина, що відображає рух молекул. А потім машина прорахує всі значення  $n(r_i)$  і загальну кількість вимірів відстаней між молекулами в межах круга радіусом  $14 \text{ \AA}$  (28 інтервалів по  $0,5 \text{ \AA}$ ). За натисненням клавіші «пробіл» відключається графічний режим і з'являються записи названих величин. Їх слід переписати й виконати завдання, перелічені в попередньому пункті. Функція  $g(r)$ , розрахована за формулою (4), нормована – за великих  $r$  вона наблизитиметься до 1.

### **Аналіз результатів**

Згідно з вище зазначеним (пояснення до рис. 4), перше та друге координаційні числа ( $Z_1$  та  $Z_2$ ) дорівнюють площі під першим та другим піком функції атомного розподілу (рис. 5). Площу під піками можна визначити двома способами, перший а них проілюстрований на рис. 5 – праву сторону першого піку добудовують симетрично лівій. Після визначення лівої сторони другого піку (так, щоб сумарна ордината відповідала графіку) праву сторону його роблять такою ж, як і ліву.

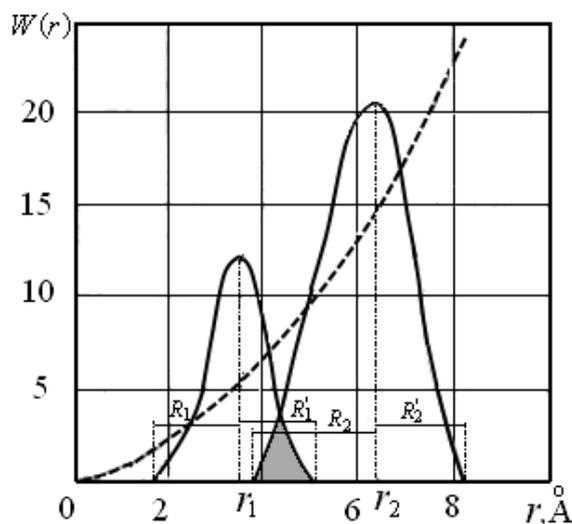


Рис. 5. Графік функції атомного розподілу

У другому методі кожний пік від наступного відділяється лінією, паралельною осі ординат. Лінії проводять униз від точок, що відповідають мінімуму функції  $W(r_i)$  між відповідними двома піками.

## Контрольні запитання

1. Які особливості руху молекул в речовинах, що знаходяться в різних агрегатних станах?
2. Що спільне і чим відрізняється атомна будова кристалів і рідин?
3. Дати визначення радіальної щільності, парної радіальної функції розподілу і функції атомного розподілу.

## Лабораторна робота №15

### ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГАУСА

**Прилади та приладдя:** прилад дошка Гальтона, лінійка, комп'ютер

#### Теоретичні відомості

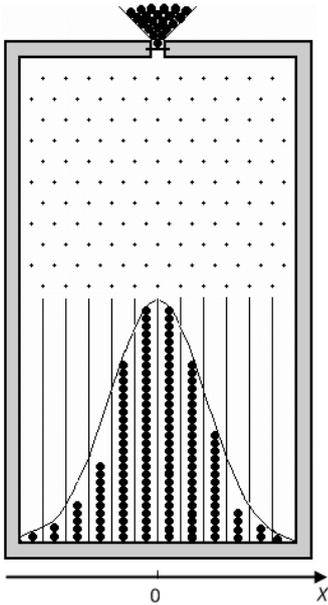


Рис. 1. Схема дошки Гальтона

Якщо результати досить великого числа вимірювань будь-якої фізичної величини  $a$  відкласти на числовій осі, то можна помітити, що вони будуть розташовані довільно, відхиляючись по обидві сторони від точки, яка відповідає істинному значенню величини,  $a_{\text{іст}}$ . Враховуючи це, можна в першому наближенні прийняти за істинне середнє арифметичне значення величини:  $a_{\text{сеп}} = \langle a \rangle$

$$a_{\text{іст}} = \langle a \rangle = (1/n) \sum_{i=1}^n a_i,$$

де  $n$  – число вимірювань.

За міру випадкової похибки можна розглядати середнє арифметичне абсолютних похибок окремих вимірювань:

$$\Delta a = (1/n) \sum_{i=1}^n |a_i - a_{\text{іст}}|.$$

Однак, такий спосіб визначення випадкової похибки придатний тільки для орієнтовної оцінки. Більш строгим і надійним засобом визначення цієї величини з розрахунків, проведений на основі теорії ймовірності.

Результати окремих вимірювань є випадковими величинами, оскільки не існує способів, які могли б однозначно провішувати їх появу. Виберемо на числовій прямій довільно два результати вимірювань  $a_i$  і  $a_k$ . Оскільки істинне значення величини  $a_{\text{іст}}$  невідоме, ми не можемо бути впевненими, що " $a_{\text{іст}}$ " знаходиться в інтервалі  $[a_i, a_k]$ . Не виключено, що " $a_{\text{іст}}$ " не належить  $[a_i, a_k]$ . Очевидно, що чим ширше вибраний інтервал, тим більша ймовірність того, що в нього потрапить істинне значення величини

Оскільки результати окремих вимірювань є випадковими величинами, середньоарифметичне також буде випадковою величиною. Користуючись методами теорії ймовірності, Гауса довів закон нормального "розподілу похибок, який задовольняє дві експериментальні закономірності: 1) вимірювання з великими відхиленнями від істинного значення зустрічаються рідше, ніж з малими; 2) вимірювання рівних за величиною, але різних за знаками похибок однаково ймовірні. Закон нормального розподілу похибок виражається формулою

$$\Delta n = n f(x) \Delta x = n \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \Delta x,$$

де  $n$  – число вимірювань із загального числа  $n$  вимірювань з похибками в інтервалі від  $x$  до  $x + \Delta x$  ( $x = a - a_{\text{іст}}$ ).

Величина  $\sigma^2$  називається дисперсією вимірювань. Вона є основним параметром, який визначає вид кривої розподілу випадкових похибок.

Зміст функції  $f(x)$  полягає в тому, що площа фігури, яка міститься між кривою, віссю  $X$  і двома вертикальними прямими, проведеними паралельно осі ординат від точок  $x_1$  та  $x_2$ , саме дорівнюють ймовірності, з якою похибка будь-якого виміру потрапляє в інтервал від  $x_1$  до  $x_2$ .

Середня квадратична похибка окремого результату

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 / n} . \quad (2)$$

Згідно з теоремою Гауса при  $n \rightarrow \infty$   $S_n$  прямує до сталого значення

$$S_n = 2 \int_0^{\infty} x^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma^2, \quad (3)$$

а середня квадратична похибка середнього арифметичного

$$S_{n_x} = \frac{S_n}{\sqrt{n-1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 / [n(n-1)]}.$$

Вона прямує до нуля при  $n \rightarrow \infty$  ( $n$  – число дослідів). Знайшовши  $S_n$  для великої серії вимірювань, ми можемо визначити  $\sigma^2$  згідно з (3), а отже і функцію  $S_{n_x} = \frac{S_n}{\sqrt{n-1}}$  у законі нормального розподілу похибок.

Дослід з великим числом вимірювань можна моделювати за допомогою дошки Гальтона (рис. 1), яка відтворює картину випадкових відхилень від початкового напрямку руху частинок, які випробували порівняно велике число зіткнень з поставленими на їх шляху стержнями та ще й одна з одною. З бункера потік частинок потрапляє на 12 рядів металевих стержнів, які відхиляють частинки від вертикального напрямку. При співударі зі стержнями відбувається відхилення частинок в рівною ймовірністю вправо і вліво від стержня. Розсіяні частинки збираються в збірці з багатьма комірками. Числа, зібраних у комірках частинок, відтворюють закон нормального розподілу випадкових відхилень від початкового заданого напрямку руху.

Знайдемо, чому дорівнює середньоквадратична похибка для даної моделі. Очевидно, що для числа дослідів  $n$ , яке дорівнює числу зерен (тобто частинок), середнє квадратичне відхилення координати  $x$  зернин в комірках від середнього значення координати для всіх зернин  $x_{\text{сеп}}=0$  складає

$$S_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n x_j^2 / n}, \quad (4)$$

де  $x_j$  – відстань від положення  $j$ -ої зернини до середини горизонтальної шкали. Кількість зернин у кожній комірці пропорційна висоті  $n_i = B y_i$ , де  $i$  – номер комірки,  $B$  – коефіцієнт пропорційності. Тому загальна кількість зернин складає

$$n = B \sum_{i=1}^{\hat{e}} y_i, \quad (5)$$

де  $k$  – кількість комірок.

Суму квадратів відхилень визначимо через подвійну суму, а внутрішню суму по комірці пов'яжемо з її висотою:

$$\sum_{j=1}^n x_j^2 = \sum_{i=1}^{\kappa} \sum_{j=1}^{By_i} x_i^2 = \sum_{i=1}^{\kappa} By_i x_i^2 = B \sum_{i=1}^{\kappa} y_i x_i^2 . \quad (6)$$

Підставляючи (5) та (6) у (4), маємо

$$\sigma = S_n = \sqrt{B \sum_{i=1}^{\kappa} y_i x_i^2 / B \sum_{i=1}^{\kappa} y_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\kappa} y_i x_i^2 / \sum_{i=1}^{\kappa} y_i^2} . \quad (7)$$

### ***Хід роботи***

1. Проведіть три досліди, домагаючись таких розподілів, коли для малих відхилень висота заповнення комірок досить велика, а на краях дошки Гальтона мала, з тим, щоб розподіл не спотворювався із-за обмеженого розмірами дошки інтервалу відхилень.

2. Для кожного досліду "вимірюйте усі значення  $x_i$  та  $y_i$ . За формулою (7) обчисліть  $\sigma$  та знайдіть  $\sigma_{\text{сер}}$ .

3. За знайденими значенням  $\sigma_{\text{сер}}$  розрахуйте функцію  $f(x)$  і побудуйте графік теоретичної функції  $\omega_i = f(x_i)\Delta x$  – ймовірності попадання у відповідні комірки від  $x_i$ . Тут  $\Delta x$  – ширина комірок ( $\Delta x \cong 1$  см) .

4. Розрахуйте для всіх  $x_i$  експериментально одержану ймовірність попадання части-

нок у комірки  $\omega_{i,\text{експ}} = y_i / \sum_{i=1}^{\hat{e}} y_i$  .

5. Побудуйте графік функції  $\omega_{i,\text{експ}}$  від  $x_i$  і порівняйте його з розрахованим за законом нормального розподілу й побудованим раніше графіком.

### ***Комп'ютерний варіант роботи***

Комп'ютерний варіант роботи описаний у книжці «Фізика на Паскалі. Практикум» разом із програмою, яка відтворює розподіл. Роботу можна виконати, користуючись відповідним файлом з розширенням «exe» на Паскалі або запустити файл з розширенням «exe» у папці «Гаус» (Делфі варіант програми). З інтерфейсу програми буде зрозуміло, що робити.

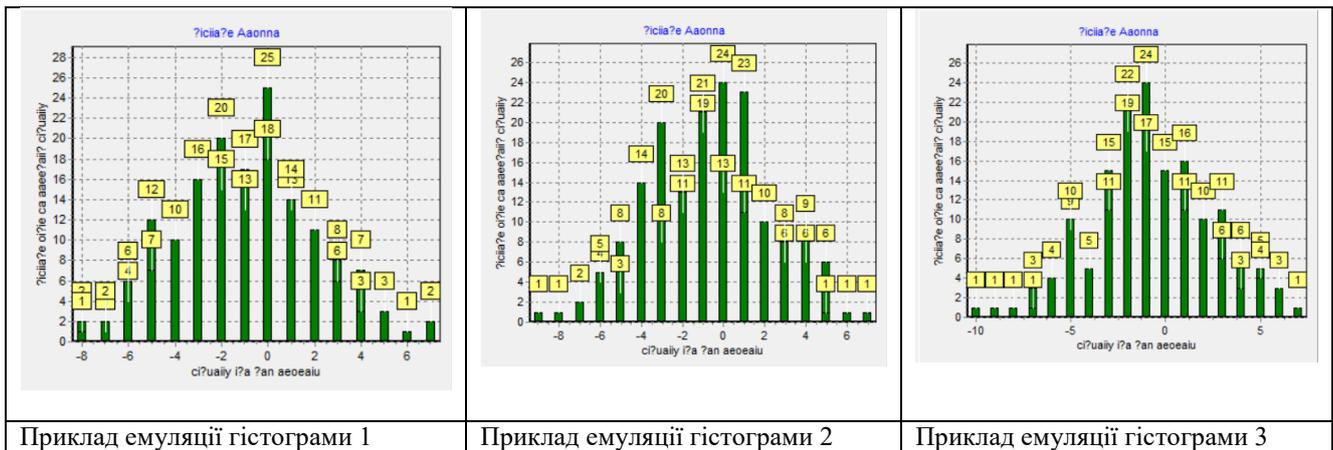
Розподіл Гауса описує зокрема поведінку об'єктів, що виконують випадкові переміщення у випадкових напрямках. У даній лабораторній роботі розглядається наступна модель. Досить велика кількість частинок (матеріальних точок) розміщується на початку координат по осі  $X$ , але в точках з різними координатами по осі  $Y$ . Частинки виконують випадкові стрибки вправо та вліво –  $x[i] := x[i] + (2 * (\text{random}) - 1)$ ; (вираз у дужках приймає випадкові значення в межах від  $-1$  до  $+1$ ). Унаслідок великого числа переміщень деякі частинки зміщуються вправо, інші – вліво; у результаті встановлюється розподіл частинок за координатами. Цей розподіл повинен збігатися з розподілом Гауса. Отже, в даній роботі треба визначити характеристики розподілу за координатами не реальних матеріальних точок, а тих, координати яких розраховуються комп'ютером із застосуванням функції  $\text{random}$  – генератора випадкових чисел, в даному випадку від 0 до 1, ( $\text{random}(N)$ , де  $N$  є цілим числом, дає випадкові цілі числа від 0 до  $N-1$ ).

### ***Завдання для комп'ютерного варіанту роботи***

1. Зарисуйте декілька гістограм, що відповідають розподілу частинок по осі  $X$  у різні моменти часу.

2. Розрахуйте й побудуйте теоретичну функцію, що відповідає висвітленому значенню дисперсії. Якщо гістограми мають досить великі розбіжності, отримайте декілька гістог-

рам для одного й того самого часу дослід, усередніть їх. А для розрахунку теоретичної функції використайте усереднене значення дисперсії.



## Лабораторна робота №16

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ

Рівноважний стан замкнутої системи характеризується однаковим значенням її параметрів по всьому об'єму. Якщо ж стан системи нерівноважний, наприклад  $T$ ,  $P$  або  $C$  у різних ділянках системи неоднакові, то в такій системі мимовільно виникнуть процеси, які прагнуть перевести систему в стан рівноваги. Дифузія представляє собою процес переміщення атомів з області з більш високою концентрацією в ту область системи, де їх концентрація менше. Іншими словами, дифузія відбувається, якщо є градієнт концентрації. Якщо вісь  $x$  паралельна напрямку градієнта концентрації, кількість речовини  $dM$ , що пройшло через площу  $dS$  за проміжок часу  $dt$ , визначається співвідношенням

$$dM = -D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) dS dt \quad (1)$$

де  $\frac{\partial C}{\partial x}$  – градієнт концентрації в напрямку нормальному до площі  $dS$ ;

$D$  – коефіцієнт дифузії.

Знак мінус показує, що дифузійний потік направлений в бік зменшення концентрації.

Це перший закон дифузії Фіка.

Розмірність коефіцієнта дифузії  $D$  –  $m^2/c$  (або  $cm^2/c$ )

Якщо розподіл концентрації змінюється з часом (нестационарний процес дифузії), для знаходження концентрації як функції координати і часу використовують другий закон Фіка.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

який витікає з умови балансу речовини, що входить при дифузії в деяку малу область простору і виходить з неї через обмежуючі поверхні.

Запропонований у роботі метод визначення коефіцієнта дифузії  $D$  заснований на залежності коефіцієнта заломлення світла в рідині від концентрації розчиненої в ній речовини.

Якщо в плоско паралельну посудину налити рідкий розчин 1 з показником заломлення  $n_1$ , а зверху над ним знаходиться чиста рідина 2 з показником заломлення  $n_2$ , то межа між рідинами, що була різкою в початковий момент, з часом з-за дифузії стає менш чіткою - "розмивається". У цьому розмитому шарі змінюється показник заломлення. Зміна показника заломлення відбувається уздовж напрямку дифузійного потоку, тобто в напрямку  $x$  (рис.1), від значення  $n_1(C_1)$  в однорідному розчині 1 (внизу) до значення  $n_2(C_2)$  в чистій рідині 2 (вгорі). В області з перемінним показником заломлення світло поширюється не прямолінійно.

Залежність кута заломлення променя  $\gamma$  при проходженні кювети з розчином товщиною  $d$  - від градієнта коефіцієнта заломлення визначається за формулою

$$\gamma = d \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)_x \quad (3)$$

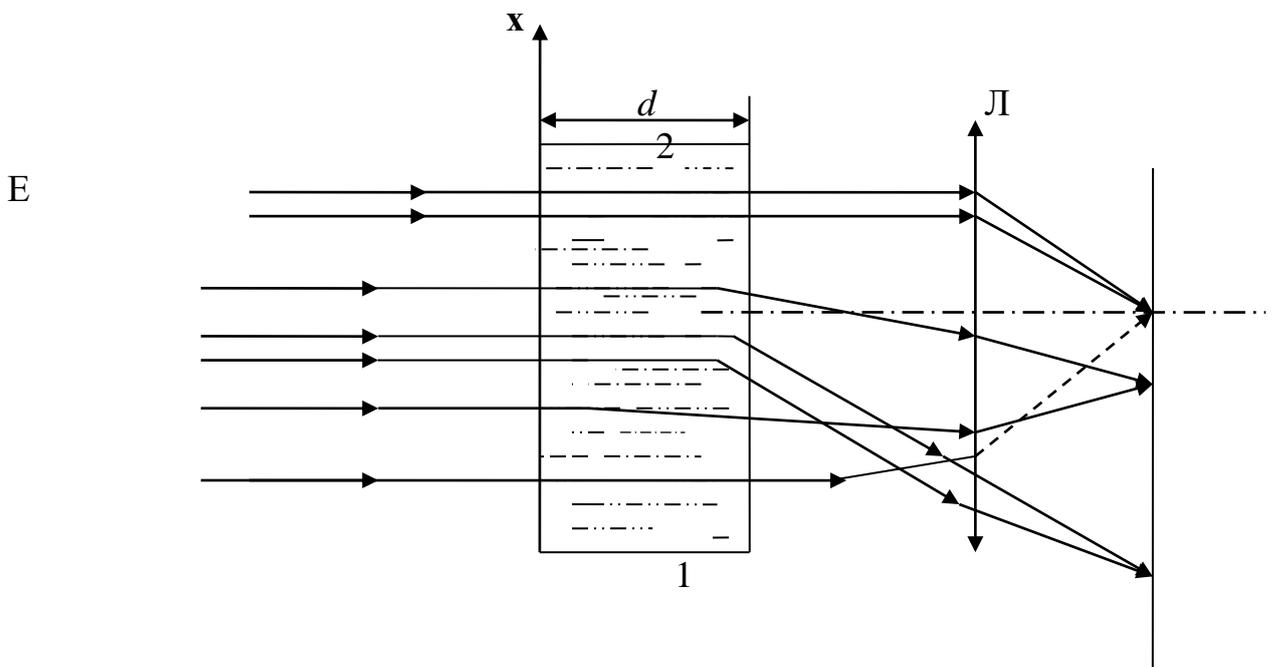


Рис.1 Хід променів через плоско паралельну кювету

З формули (3) випливає, що найбільше відхилення зазнають промені, що проходять в тому місці, де градієнт показника заломлення максимальний. Навпаки, на границях однорідного розчину і чистої рідини з шаром, де йде дифузія (вгорі або вниз), де  $\frac{\partial n}{\partial x} = 0$ , промені пройдуть практично без відхилення (рис.1). Монохроматичний паралельний пучок світла, проходить через плоско паралельну кювету з чистою рідиною або однорідним розчином, можна зібрати за допомогою лінзи  $L$  у вузьку смужку на екрані  $E$ , що знаходиться на фокусній відстані від лінзи. При проходженні світла через неоднорідний розчин ми будемо мати набір променів, що виходять з кювети під різними кутами (див. рис.1)

На екрані в фокальній площині збиральної лінзи в цьому випадку буде спостерігатися широка смуга світла, причому в її нижньому краї зберуться промені, відхилені на максимальний кут  $\gamma_{\max}$ . Максимальне відхилення від первинного напрямку набувають промені, які пройшли через область з найбільшим градієнтом показника заломлення.

Рішення, залежного від часу, рівняння дифузії (2) можна шукати у вигляді:

$$C(x, t) = \frac{C_2 - C_1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi + Const \quad (4)$$

Де  $C_1$  і  $C_2$  - концентрації в областях віддалених від дифузійної зони, тобто в однорідних областях розчину і чистої рідини. З (4) випливає, що

$$\left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{C_2 - C_1}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

а отже, градієнт максимальний при  $x = 0$  (координата спочатку різкої границі), тобто

$$\left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{\max} = \frac{C_2 - C_1}{2\sqrt{\pi Dt}} \quad (5)$$

Для досить розбавлених розчинів можна прийняти, що показник лінійно залежить від концентрації і відповідно записати для градієнта показника заломлення на підставі

$$\left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)_{\max} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}} \quad (6)$$

Тоді максимальний кут відхилення променя:

$$\gamma_{\max} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}} d \quad (7)$$

Де  $d$  - ширина судини (товщина шару рідини), а  $t$  - час, що минув з початку дифузії. Оскільки час  $t$  не відомо з достатньою точністю, обчислювати  $D$  безпосередньо за формулою (7) не слід.

Проте, якщо виміряти кілька значень максимального кута відхилення променів (принаймні два) через відомі проміжки часу  $\Delta t$ , то це вже дозволить знайти коефіцієнт дифузії. Нехай відомі  $\gamma_{\max} = \gamma_1$  при  $t = t_1$  і  $\gamma_{\max} = \gamma_2$  при  $t = t_2$ .

Тоді з (7) легко отримати формулу, яка містить лише проміжок часу, а саме

$$D = \frac{d^2 (n_2 - n_1)^2}{2\pi \Delta t} \left( \frac{1}{\gamma_1^2} - \frac{1}{\gamma_2^2} \right) \quad (8)$$

Для знаходження коефіцієнта дифузії застосовується прилад, який складається з джерела світла. Д (рис. 2), монохроматичного фільтра Ф, калібратора К, зорової труби Т, з мікроскопічним гвинтом, посудини П, що знаходиться на столику.

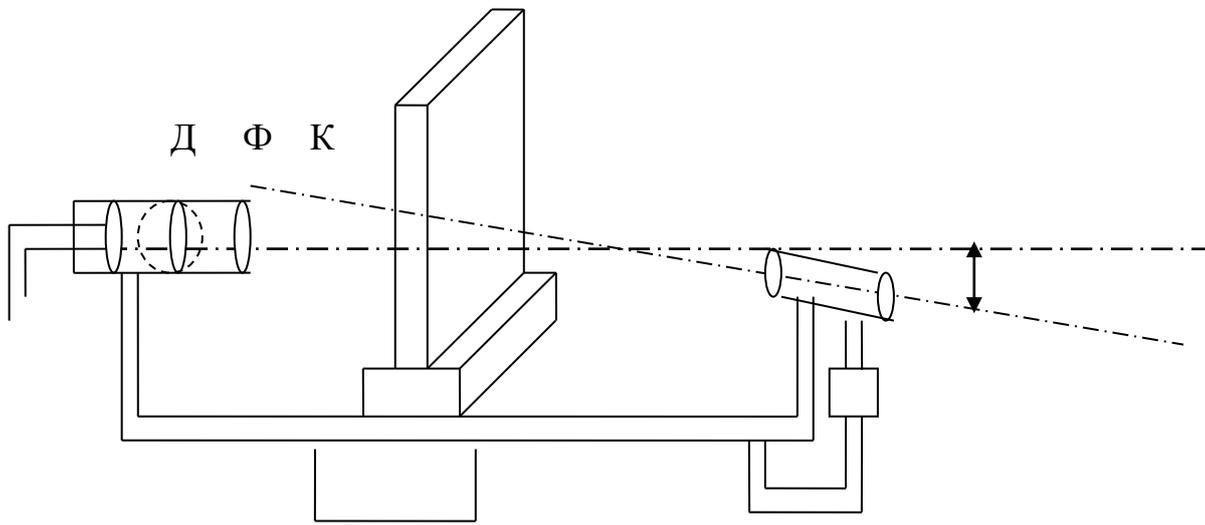


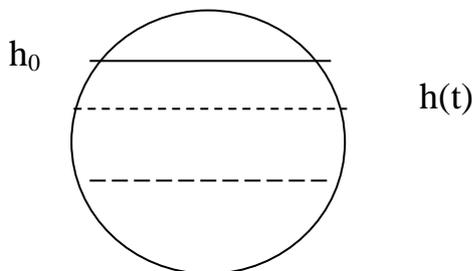
Рис.2 Схема приладу для визначення коефіцієнта дифузії

### Порядок роботи

Посудина П до половини наповнюється дистильованою водою (показник заломлення = 1,333).

Потім проводиться спостереження в оптичну трубу зображення щілини і вимірюється за допомогою мікрометричного гвинта Г таке положення краю оптичної труби по вертикалі, що нитка окуляра збігається з нижньою межею зображення щілини. Цей вимір дозволяє знайти нуль відліку  $h_0$  для визначення кута максимального відхилення променів при наявності градієнта концентрації.

За допомогою піпетки посудина по краплях доповнюється 20 %- водним розчином NaCl (показник заломлення = 1,364) у спеціально вмонтовану в посудину П вигнуту трубочку з тонкими отворами в її дні. Необхідно домогтися, щоб межа розділу між розчином і чистою водою була на рівні оптичної осі системи. В полі зору труби буде видна картина, зображена на рис. 3. Зображення щілини при протіканні процесу дифузії, що становлять собою досить широку світлу смугу, нижню межу якої дають максимально відхилені промені.



Обертанням мікрометричного гвинта окуляра нитка наводять на найбільш відхилену нижню межу (границя) По різниці обох відліків положення труби визначають кут зі співвідношення

$$\gamma = \gamma_{\max} = \text{tg} \gamma_{\max} = 0,5(h_0 - h(t))$$

де  $(h_0 - h(t))$  різниця показань відліку на мікрометричної гвинті;

$l$  – відстань від посудини до мікрогвинта Г. ( $\gamma \approx \text{tg} \gamma$ ) тому, що  $l \gg h_0 - h(t)$ . У момент першого вимірювання положення нижньої межі  $h(t)$  виключають секундомір. Вимірювання положення кута  $\gamma$  проводять далі через 7, 10, 15, 20 та 30 хвилин між вимірами. Збільшення інтервалу часу між послідовними вимірюваннями кута  $\gamma$  зв'язана зі зменшенням градієнта концентрації і швидкості його вимірювання у процесі дифузії.

Для обчислення D за формулою (8) досить двох пар значень  $t_1, \gamma_1$  і  $t_2, \gamma_2$ . Проте для збільшення точності роблять більшу кількість вимірювань. Щоб ліквідувати систематичну помилку, треба комбінувати між собою  $\gamma_1$  і  $\gamma_k$ , а не відносити неоднакові  $\gamma_k$  до одного і того ж  $\gamma_k$ .

Результати вимірювань і обчислень слід представити у вигляді таблиці. Обов'язково оцінити похибку визначення коефіцієнта дифузії.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке дифузія?
2. Що таке градієнт густини у рівнянні Фіка?
3. Фізичний зміст коефіцієнта дифузії у емпіричному рівнянні переносу.
4. Перший закон Фіка для дифузії.

## ЗМІСТ

<b>Лабораторна робота №1</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ КУЛЬКИ, ЯКА ПАДАЄ	3
<b>Лабораторна робота №2</b> ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ МЕТОДОМ КЛЕМАНА І ДЕЗОРМА	5
<b>Лабораторна робота №3</b> ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ПИТОМИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ $C_p/C_v$ ГАЗІВ ЗА ШВИД- КІСТЮ ЗВУКУ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ	8
<b>Лабораторна робота №4</b> ВИВЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ	10
<b>Лабораторна робота №5</b> ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ОХОЛОДЖЕННЯ	12
<b>Лабораторна робота №6</b> ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ РІДИНИ ПОДВІЙНИМ КАЛОРИМЕТРОМ	14
<b>Лабораторна робота №7</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ, СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬ- НОГО ПРОБІГУ ТА ЕФЕКТИВНОГО (ГАЗОКІНЕТИЧНОГО) ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛ МЕ- ТОДОМ ПРОТІКАННЯ ЧЕРЕЗ КАПЛЯР	16
<b>Лабораторна робота №8</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ МЕТОДОМ ЗАТУХА- ЮЧИХ КОЛИВАНЬ	18
<b>Лабораторна робота №9</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ	20
<b>Лабораторна робота №10</b> ВИВЧЕННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ГІПОСУЛЬФІТУ	22
<b>Лабораторна робота №11</b> ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ	24
<b>Лабораторна робота №12</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ	27
<b>Лабораторна робота №13</b> ВИВЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ	29
<b>Лабораторна робота №14</b> ВИВЧЕННЯ МОДЕЛІ БЛИЖНЬОГО ПОРЯДКУ РІДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУНКЦІЇ РАДІАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ АТОМІВ	31
<b>Лабораторна робота №15</b> ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГАУСА	36
<b>Лабораторна робота №16</b> ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ	39