

17032

Національний
"КИЄВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ"



університет

Факультет природничих наук
Кафедра фізико-математичних наук

Практикум з молекулярної фізики

Навчальний посібник

АБ

Київ



Видавничий дім
"КМ Академія"
2003

Наукова бібліотека
Університету
"Києво-Могилянська
академія"

Навчальний посібник “Практикум з молекулярної фізики” підготовлений на кафедрі фізико-математичних наук факультету природничих наук Національного університету “Києво-Могилянська академія”. У ньому описані лабораторні роботи до курсу “Молекулярна фізика”, які виконуються студентами 2-го року навчання кафедри фізико-математичних наук НаУКМА. Практикум може бути рекомендований для студентів природничих факультетів вузів, які вивчають загальний курс фізики.

Упорядник:

Шиманська О.Т., кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізико-математичних наук природничого факультету Національного Університету “Києво-Могилянська академія”.

Рецензенти:

Адаменко І. І., доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка ,

Анісімов І. О., доктор фіз.-мат. наук, завідувач кафедри фізичної електроніки радіофізичного факультету Київського Національного університету імені Тараса Шевченка.

*Затверджено до друку Вченою радою НаУКМА
Протокол №19 (8.3) від 07.11.2002 року*

Передмова

Даний методичний посібник включає в себе описи лабораторних робіт молекулярного практикуму кафедри фізико-математичних наук Національного університету "Києво-Могилянська академія". Лабораторні роботи цього практикуму охоплюють більшість розділів лекційного курсу «Молекулярна фізика», який читається студентам 2-го року навчання в обсязі 26 годин. Для забезпечення цього курсу практикумом власне і написано цей посібник.

Метою лабораторного практикуму з молекулярної фізики є засвоєння студентами експериментальних методів дослідження фізичних властивостей речовин у газоподібному, рідкому та твердому станах, набуття студентами практичних навичок вимірювання фізичних величин, зокрема коефіцієнта внутрішнього тертя та довжини вільного пробігу молекул газу, відносної вологості повітря, в'язкості та поверхневого натягу рідин, питомої теплоємності плавлення льоду і т. ін.

Звичайно, виконання лабораторних робіт інколи випереджає прочитаний на лекціях матеріал. Тому в описах лабораторних робіт цього навчального посібника наведені короткі теоретичні відомості для полегшення підготовки студентів до якісного виконання лабораторних робіт. Проте студентам слід пам'ятати, що в теоретичних відомостях до лабораторної роботи не дається повного опису явища, яке вивчається, а наводиться лише той мінімум знань, без яких неможливо викласти методику і постановку дослідів. Тому перед виконанням лабораторної роботи студенту слід опрацювати теоретичний матеріал за підручниками, посилання на які наводяться у списку літератури в кінці кожного опису лабораторної роботи.

В опис лабораторних робіт включені також опис установки, порядок виконання лабораторної роботи і

обробки експериментальних результатів та контрольні запитання.

Студент допускається до виконання лабораторної роботи після того, як він відповість на запитання викладача, що стосуються мети роботи, основних формул і означень по темі, методики вимірювань і т. ін.

Приступаючи до виконання лабораторної роботи, студент повинен на початку провести контрольний дослід і впевнитись у тому, що установка перебуває в робочому стані, оцінити інструментальні похибки приладів, які визначають систематичні похибки вимірів, а тоді вже починати детальні експериментальні вимірювання досліджуваних фізичних величин.

Для роботи в молекулярному практикумі студент повинен мати два зошити: робочий і зошит для звітів. При виконанні роботи в лабораторії студент у робочому зошиті записує результати вимірювань та інші дані, потрібні для розрахунків, проводить обчислення за робочою формулою, оцінює похибки вимірювань. У кінці заняття студент представляє одержані результати на перевірку викладачеві, який своїм підписом засвідчує виконання роботи і дає поради щодо подальшого оформлення звіту. Робота вважається виконаною, якщо студент представляє результат із оцінкою похибки, а не лише таблицьку експериментальних даних.

Звіт про роботу студент оформляє в зошиті для звітів, де після дати виконання роботи наводить короткі теоретичні відомості, експериментальні дані у вигляді таблиць та графіків, розрахунок експериментальних похибок, записує остаточний результат з довірчим інтервалом та довірчою ймовірністю, наводить в письмовому вигляді відповіді на запитання, що поставлені в кінці опису роботи. При аналізі похибок вимірюваних та обчислених величин слід враховувати, прямі чи не прямі виміри були виконані при дослідженнях, відтворювані чи невідтворювані умови

досліді були при вимірюваннях. Поради і вказівки по визначенню похибок фізичних вимірювань наведені в окремому методичному посібнику, який використовується при виконанні лабораторних робіт у всіх практикумах загальної фізики НаУКМА.

В процесі виконання молекулярного практикуму студентам надається можливість проявити ініціативу у вигляді удосконалення робіт лабораторного практикуму та розробки і постановки нових робіт. Це сприяє надбанню студентами професійних навичок у постановці лабораторних робіт, які необхідні для випускників-бакалаврів та спеціалістів кафедри фізико-математичних наук.

Даний посібник для лабораторних робіт у молекулярному практикумі призначений для студентів кафедри фізико-математичних наук, але він може бути використаний студентами кафедр біології, екології природничого факультету НаУКМА при виконанні лабораторних робіт із курсу загальної фізики та студентами природничих факультетів інших вузів.

У постановці та модернізації лабораторних робіт молекулярного практикуму НаУКМА, підготовці до друку цього посібника брали участь (окрім укладача цього посібника) співробітники кафедри фізико-математичних наук НаУКМА: Голод П.І., Мельник Р.М., Рудько Г.Ю., Соколов М.І. та студенти кафедри.

1. Визначення відношення теплоємностей газу $\gamma = C_p/C_v$ за методом Клемана–Дезорма

Мета роботи: визначити відношення теплоємності при сталому тиску до теплоємності при сталому об'ємі $\gamma = C_p/C_v$ для повітря методом, запропонованим Клеманом і Дезормом.

Прилади та матеріали: балон ємністю 20 л; U-подібний відкритий водяний манометр; система сполучення з гумових трубок і кранів.

Теоретичні відомості та опис приладу

Для нагрівання одного моля газу на один градус при різних умовах (постійний тиск P або постійний об'єм V) витрачається неоднакова кількість теплоти. Тому для газу вводять поняття про дві теплоємності: молярну теплоємність при постійному тиску C_p та молярну теплоємність при постійному об'ємі C_v .

Молярна теплоємність при постійному тиску C_p (або при постійному об'ємі C_v) визначається тією кількістю теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 моля газу на один градус.

Для газів $C_p > C_v$.

Питома теплоємність при постійному тиску c_p (або при постійному об'ємі c_v) визначається тією кількістю теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 грама газу на один градус ($c_p > c_v$).

Відношення теплоємностей газів (молярних $\gamma = C_p/C_v$ або питомих $\gamma = c_p/c_v$) відіграє дуже важливу роль при описанні адіабатних процесів.

Адіабатний процес – це така зміна стану газу, яка відбувається без теплового обміну з оточуючим середовищем.

Метод Клемана-Дезорма для визначення відношення теплоємностей газів $\gamma = C_p/C_v$ ґрунтується на адіабатному розширенні газів (у даній роботі – повітря).

Основою приладу є великий скляний товстостінний балон 1 ємністю 20 л (рис. 1). Він сполучений гумовими трубками з відкритим U-подібним водяним манометром 2 і через кран 3 із “гумовою грушею” 4. Кран 5 сполучає балон із навколишнім повітрям.

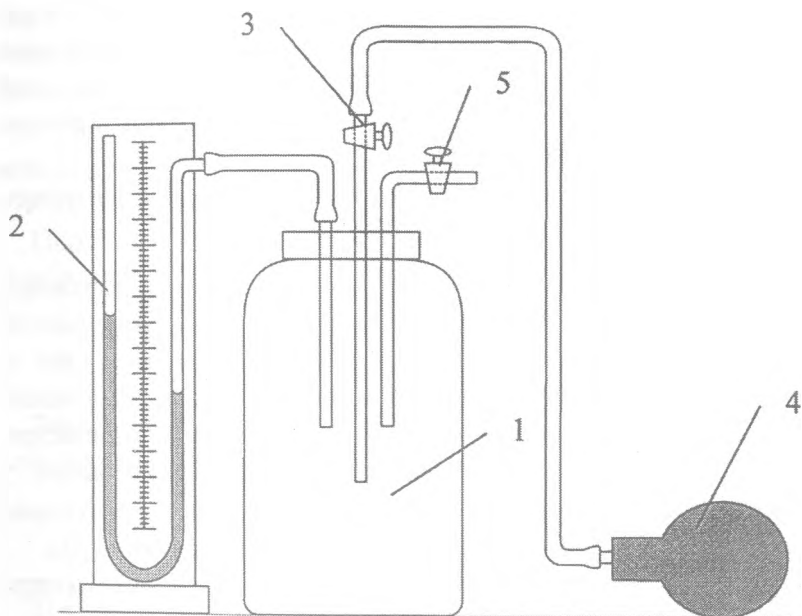


Рис. 1. Прилад Клемана і Дезорма для визначення відношення теплоємностей $\gamma = C_p/C_v$: 1 – скляний товстостінний балон; 2 – U-подібний водяний манометр; 3 – кран, через який нагнітають повітря у балон; 4 – гумова „груша”; 5 – кран для сполучення балону з атмосферою.

Вихідний стан повітря в балоні 1. Крани 3 та 5 відкриті, а тому тиск і температура повітря маси m у балоні такі ж, як атмосферні – P_0 , T_0 , а об'єм V_0 дорівнює об'єму балона. Рівні рідини в правому та лівому колінах манометра однакові.

Експериментальна частина даної лабораторної роботи складається з чотирьох етапів.

I етап. На початку у балоні 1 міститься повітря масою m при атмосферному тиску P_0 . При закритому крані 5 повітря із атмосфери нагнітають в балон через кран 3. При цьому маса повітря m у балоні, що займала до накачування певний об'єм V_0 , стискується до тиску P_1 і займає менший об'єм V_1 . Одночасно при цьому адіабатичному стисненні маса повітря нагрівається.

Отже, для маси повітря m встановились *параметри стану I*: P_1 , V_1 , T_1 .

II етап. Припинивши накачування, кран 3 закривають і чекають кілька хвилин, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною (T_0); при цьому об'єм маси газу m залишається незмінним (V_1), а тиск зменшується до значення P_2 . Величину P_2 визначають за допомогою манометра. Позначимо остаточну різницю рівнів, що встановилась у манометрі, h_1 . Тоді $P_2 = P_0 + \rho g h_1$, (де ρ – густина манометричної рідини, g – прискорення вільного падіння).

Отже, для маси повітря m встановились *параметри стану II*: $P_2 = P_0 + \rho g h_1$, $T_2 = T_0$, $V_2 = V_1$.

III етап. Відкриваємо на короткий час кран 5, щоб тиск у балоні зрівнявся з атмосферним $P_3 = P_0$ (при цьому рівні рідин у манометрі зрівняються), після чого закриваємо кран 5. При відкриванні крану 5 повітря у балоні адіабатично розширюється до об'єму V_3 (при цьому, зважаючи на малий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона і навколишнім повітрям не відбувається). Температура

повітря в балоні зменшується до T_3 , тому що робота виконується самим повітрям і його внутрішня енергія зменшується.

Для маси повітря m установлюються *параметри стану III*: $P_3 = P_0$, $T_3 (< T_0)$, $V_3 (< V_0)$.

IV етап. Після закриття крану 5 чекаємо, поки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною $T_4 = T_0$. Об'єм залишається незмінним ($V_4 = V_2$), тиск при нагріванні повітря ізохорично збільшується до P_4 , відповідно змінюється різниця рівнів рідини в манометрі. Позначимо нову різницю рівнів в манометрі через h_2 , тоді $P_4 = P_0 + \rho g h_2$.

Через 2 - 3 хвилини для маси повітря m встановлюються такі *параметри стану IV*: $P_4 = P_0 + \rho g h_2$, $T_4 = T_1 = T_0$, $V_4 = V_2$.

Перехід повітря зі стану II у стан III — адіабатний. Отже, за рівнянням Пуассона

$$P_3 V_3^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (1.1)$$

Температури повітря в станах II і IV однакові ($T_1 = T_4 = T_0$), тому за законом Бойля–Маріотта маємо:

$$P_2 V_2 = P_4 V_4. \quad (1.2)$$

Прологарифмувавши рівняння (1.1) і (1.2) та розв'язавши їх відносно γ , дістанемо:

$$\gamma = \frac{\lg P_2 - \lg P_3}{\lg P_2 - \lg P_4}. \quad (1.3)$$

Розклавши $\lg(P_0 + \rho gh_1)$ і $\lg(P_0 + \rho gh_2)$ у ряд Тейлора* й обмежившись двома першими членами, матимемо:

$$\lg P_2 = \lg(P_0 + \rho gh_1) = \lg P_0 + \frac{\rho gh_1}{P_0} + \dots,$$

$$\lg P_4 = \lg(P_0 + \rho gh_2) = \lg P_0 + \frac{\rho gh_2}{P_0} + \dots$$

Підставивши ці результати в (1.3) і врахувавши, що $P_3 = P_0$, остаточно одержимо:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (1.4)$$

Усі розглянуті процеси віднесено до маси повітря m , яка була в балоні до початку досліду.

Порядок виконання роботи

1. Закрийте кран 5. Через відкритий кран 3 накачайте в балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини. Зачекайте деякий час, щоб нагріте при цьому адіабатичному стискуванні повітря охолело до температури навколишнього середовища, а різниця рівнів у манометрі не змінювалася з часом. Запишіть значення різниці рівнів рідини h_1 в манометрі.

* Формула Тейлора: $f(a+h) = f(a) + \frac{h}{1!} f'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) + \dots$

- Швидко відкрийте й закрийте кран 5. Через 2–3 хв. зніміть покази манометра, тобто запишіть значення різниці рівнів h_2 .
- За формулою (1.4) обчисліть значення відношення молярних теплоємностей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ для повітря і порівняйте з теоретично знайденим значенням $\gamma = (i+2)/i$, (де i - кількість ступенів вільності), вважаючи повітря двохатомним газом.
- Дослід повторіть не менше 10 разів при різних показках манометра (в поділках шкали). Одержані результати занесіть у таблицю:

Таблиця 1.

№	h_1 , под.	h_2 , под.	γ	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma$

- Обчисліть середнє значення величини γ , проаналізуйте похибки вимірювань, вважаючи умови досліду невідтворюваними, запишіть результат з довірчим інтервалом і довірчою ймовірністю.
- У координатах P - V накресліть діаграму термодинамічних процесів, які відбуваються під час експерименту. Позначте на діаграмі стани 0, I, II, III, IV.

Контрольні запитання

- Наведіть приклади ізотермічного, ізобаричного і адіабатичного процесів у газах. Як вони реалізуються в даній роботі?
- Чому $C_p > C_v$? Виведіть формулу Майєра $C_p = C_v + R$.

3. Чому манометр в роботі наповнюють водою, а не ртуттю?
4. Як впливає на результат досліду запізнення із закриттям крану 5?
5. Виведіть рівняння адіабатичного процесу.
6. Чому дорівнюють теплоємності ідеального газу при ізотермічному й адіабатичному процесах?
7. Як залежить величина γ від числа ступенів вільності молекул?
8. Виведіть робочу формулу (1.4) для визначення відношення теплоємностей в даній роботі.

Література

1. Матвеев Ф. Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 132 – 140.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с. 68-71, 75-82.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. Ивероновой В. И. – М.: «Наука», 1967, с. 203-206.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 380-396.

2. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя та середньої довжини вільного пробігу молекул повітря

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя та середню довжину вільного пробігу молекул повітря.

Прилади та матеріали: установка для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя та середньої довжини вільного пробігу молекул повітря, секундомір.

Теоретичні відомості

Для газів, як і для рідин, коефіцієнт внутрішнього тертя η для стаціонарної ламінарної течії у капілярі визначається за формулою Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 l V}, \quad (2.1)$$

де r – радіус капіляра, ΔP – різниця тисків на кінцях капіляра, l – довжина капіляра, V – об'єм газу (або рідини), який проходить за час τ через капіляр.

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів коефіцієнт внутрішнього тертя η для газів пов'язаний із середньою довжиною вільного пробігу молекул λ формулою:

$$\eta = \frac{\rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle}{3}, \quad (2.2)$$

де $\langle v \rangle$ – середнє значення швидкостей газових молекул; ρ – густина газу при даній температурі T і тиску P , яка обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{\mu P}{RT}, \quad (2.3)$$

де μ – молярна маса газу; R – універсальна газова стала.

Середня арифметична швидкість $\langle v \rangle$ визначається із закону Максвела про розподіл молекул за швидкостями:

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v \frac{dN(v)}{N} = \int_0^{\infty} \frac{4}{\sqrt{\pi}} v \cdot e^{-\left(\frac{v}{v_i}\right)^2} \left(\frac{v}{v_i}\right)^2 d\left(\frac{v}{v_i}\right), \quad (2.4)$$

де v_i – значення найбільш імовірної швидкості молекул, яке рівне:

$$v_i = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (2.5)$$

тут k – стала Больцмана, m – маса молекули газу, T – абсолютна температура газу.

Із рівняння (2.4) випливає, що середня швидкість молекул $\langle v \rangle$ рівна:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (2.6)$$

або

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (2.7)$$

Підставивши в рівняння (2.2) співвідношення для ρ (2.3) та $\langle v \rangle$ (2.7), отримаємо формулу для середньої довжини вільного пробігу молекул газу $\langle \lambda \rangle$:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} = \frac{3\eta}{\frac{\mu P}{RT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}} = 3 \sqrt{\frac{\pi}{8}} \cdot \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = 1,86 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}. \quad (2.8)$$

Опис установки

Схема установки, на якій виконується робота, наведена на рис. 2. Установка складається із капіляра 1 (у даній роботі його довжина $l=150$ мм, радіус $r=0,6$ мм), аспілятора з водою 2, манометра 3, трубки 4, через яку всмоктується повітря, осушувального фільтра 5 з CaCl_2 , мірної посудини (мензурки) 6 з поділками.

Коли з аспілятора витікає вода, то внаслідок зниження тиску в аспіраторі через трубку 4 засмоктується і проходить

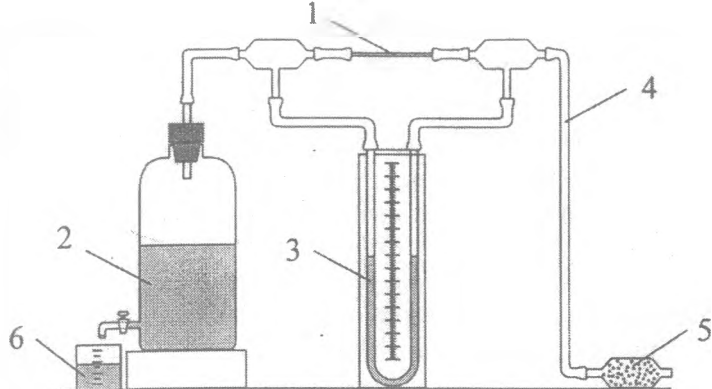


Рис. 2. Установка для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя та середньої довжини вільного пробігу молекул повітря: 1 – капіляр (у даній роботі довжина капіляра $l=150$ мм, радіус капіляра $r=0,6$ мм); 2 – аспіратор із водою; 3 – манометр; 4 – трубка, через яку всмоктується повітря; 5 – осушувальний фільтр з CaCl_2 ; 6 – мірна посудина (мензурка).

через капіляр 1 повітря. Різниця тисків ΔP на кінцях капіляра, що зумовлена внутрішнім тертям шарів повітря, вимірюється манометром ($\Delta P = \rho g \Delta h$, де ρ – густина води, а Δh – різниця рівнів води в манометрі). Об'єм повітря V , яке проходить за час τ через капіляр, рівний об'ємові води, що за цей же час τ витікає з аспіратора. Об'єм води вимірюється за допомогою мірної посудини 6.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити кран аспіратора 2 та виміряти час τ витікання фіксованої кількості води ($V=100$ мл) в мірну посудину. (Час треба починати вимірювати після встановлення стаціонарної течії повітря через капіляр, коли покази манометра $\Delta P = \rho g \Delta h$ перестають мінятися. Об'єм води, що витекла до цього, не враховувати).
2. Дослід повторити 3–5 разів. Дані занести в таблицю.

3. Температуру і зовнішній тиск визначити за показами термометра та барометра.
4. За формулами (2.1) та (2.8) обчислити коефіцієнт внутрішнього тертя η та середню довжину вільного пробігу молекул $\langle \lambda \rangle$.
5. Оцінити точність результатів вимірювань.

Контрольні запитання

1. Запишіть рівняння переносу для газів.
2. Дайте визначення коефіцієнта внутрішнього тертя η для газів. Якою формулою він визначається?
3. Як залежить коефіцієнт внутрішнього тертя газів η від тиску і температури?
4. Яка будова й принцип дії приладу для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя η ?
5. Дайте визначення середньої довжини вільного пробігу λ молекул газу. Виведіть формулу для λ .
6. Як залежить середня довжина вільного пробігу λ молекул газу від тиску та температури?
7. Виведіть формулу Пуазейля для газів.
8. Чому коефіцієнт внутрішнього тертя η для рідин зменшується з температурою, а для газів зростає?

Література

1. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 365.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За ред. Горбачука І.Т., – К.: «Вища школа», 1992, с. 224-226.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с.359-367.
4. Кучерук І.М., Горбачук І. Т., Луцик П.П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 343-352.

3. Вимірювання відносної вологості повітря

Мета роботи: виміряти відносну вологість повітря за допомогою психрометра.

Прилади та матеріали: три психрометри МВ-4М, годинник, батист, нитки, піпетка, дистильована вода.

Теоретичні відомості та опис приладу

Вологість повітря зумовлюється наявністю в ньому водяної пари. Маса водяної пари в повітрі може змінюватись як за абсолютною величиною, так і за ступенем насичення, що, відповідно, характеризується абсолютною та відотною вологостями.

Абсолютна вологість повітря кількісно дорівнює масі водяної пари в грамах, що міститься в 1 м^3 повітря.

Під відотною вологістю при певній температурі розуміють відношення абсолютної вологості до маси насиченої водяної пари в 1 м^3 при тій же температурі. Це відношення виражають у процентах. Відносна вологість вимірюється психрометром.

Вологість також вимірюють за допомогою гігрометра. При цьому визначають точку роси. Точкою роси називається температура, при якій наявна в повітрі водяна пара стає насиченою,

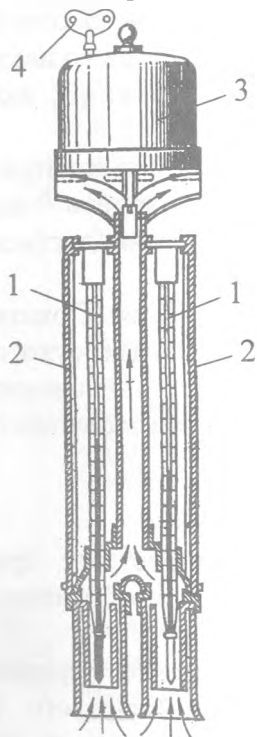


Рис. 3. Психрометр: 1 – ртутні термометри; 2 – оправа; 3 – аспіраційна голівка; 4 – ключ для заведення пружини вентилятора.

конденсуватися на охолодженій поверхні.

Робота психрометра основана на залежності різниці температур сухого та змоченого термометрів від вологості повітря. На рис.3 зображено схему психрометра, який складається з двох однакових ртутних термометрів 1, закріплених у спеціальній оправі 2, та аспіраційної голівки 3. Оправа складається з трубки, яка роздвоюється донизу, та захисних планок. До нижньої роздвоєної частини трубки за допомогою пластмасових трубок прикріплено два патрубки, які є радіаційним захистом резервуарів термометрів. Верхній кінець трубки з'єднаний із аспіратором. Аспіраційна голівка складається із заводного механізму 4 та вентилятора, які закриті ковпаком.

При роботі вентилятора у прилад засмоктується повітря, яке обтікає резервуари термометрів, проходить по повітропровідній трубці до вентилятора і викидається назовні через прорізи у аспіраційній голівці.

Сухий термометр показує температуру повітря. Покази змоченого термометра будуть меншими за покази сухого термометра через охолодження, яке викликане випаровуванням води з поверхні батисту, що був намотаний на резервуар термометра перед початком роботи.

Порядок виконання роботи

При виконанні лабораторної роботи використовуйте три однакових психрометри МВ-4М, які розміщені в лабораторії поблизу один до одного. Позначимо їх А, В, С.

1. За показами сухих термометрів визначте середнє значення температури в лабораторії. Для цього з кожного термометра зніміть по три покази із інтервалом часу у три хвилини.
2. Підготуйте шматочки батисту для кожного психрометра: а) змочіть їх у дистильованій воді; б) щільно обгорніть навколо резервуару правого

термометра в один шар, так щоб краї батисту заходили один за другий не більш ніж на $\frac{1}{4}$ його довжини; в) батист зверху резервуару міцно обтягніть петлею з ниток; г) одягніть другу петлю на середину резервуару і розправляючи батист поступово стягніть її під резервуар і зав'яжіть; г) зайву тканину обріжте; д) для додаткового змочування використайте спеціальну піпетку, якою також можна забрати зайві краплі.

3. Заведіть майже до кінця пружини вентиляторів психрометрів та приведіть вентилятори в дію. Через чотири хвилини після запуску вентиляторів зніміть покази сухих і змочених термометрів. Процедуру повторіть не менше трьох разів.
4. Розрахуйте відносну вологість повітря φ за формулою, наведеною в інструкціях до психрометрів:

$$\varphi = ((E_M - A P \Delta t) / E_C) 100\%, \quad (3.1)$$

де φ – значення відносної вологості повітря;

E_M – пружність (тиск) насиченої водяної пари біля змоченого термометра, (мм.рт.ст.);

E_C – пружність (тиск) насиченої водяної пари біля сухого термометра, (мм.рт.ст.);

A – психрометричний коефіцієнт ($A = 6,620 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$);

P – атмосферний тиск повітря в лабораторії (мм. рт. ст.);

Δt – різниця між температурою сухого t_C та мокрого t_M термометрів ($\Delta t = (t_C - t_M)$).

5. Атмосферний тиск P виміряйте лабораторним барометром (покази в кПа) і переведіть його значення в мм. рт. ст., користуючись довідником.
6. Значення E_C та E_M візьміть з таблиць, наведених у додатку.
7. Дані для кожного з психрометрів А, В, С занесіть в окрему таблицю:

Таблиця 1.

№	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$E_c, \text{мм. рт. ст}$	$E_m, \text{мм. рт. ст}$	$\varphi, \%$	$\bar{\varphi}, \%$

8. Проведіть розрахунок φ для кожного досліду.
9. Для кожного психрометра розрахуйте середні значення $\bar{\varphi}$ та проаналізуйте похибки. Запишіть результати у вигляді:

$$\varphi_A = \bar{\varphi}_A \pm \sigma_A, \varphi_B = \bar{\varphi}_B \pm \sigma_B, \varphi_C = \bar{\varphi}_C \pm \sigma_C.$$

10. Відносну вологість повітря φ для кожного з психрометрів визначте, користуючись також таблицею 3. Для цього з попередніх даних візьміть середні значення t_c та Δt для кожного з психрометрів. Порівняйте результати, одержані двома застосованими методами.
11. Оскільки кожен з психрометрів має свою систематичну похибку, для зведення цих систематичних похибок до випадкових знайдіть середнє зважене значення $\varphi_{зв} = \Phi$ та похибку σ_φ за методом, описаним в Додатку 2. Запишіть остаточний результат для відносної вологості повітря у вигляді:
 $\varphi = \Phi \pm \sigma_\varphi.$

Контрольні запитання

1. Зобразіть діаграму стану речовини, вкажіть області існування агрегатних станів та фазових переходів.
2. Сформулюйте характерні особливості фазових переходів I-го роду.
3. Які ви знаєте методи визначення відносної вологості повітря?
4. В чому полягає метод оцінки результату з використанням середнього зваженого?

Додаток 1

Таблиця 2: Температурна залежність пружності насиченої водяної пари E

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{мм.рт.ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{мм.рт.ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{мм.рт.ст.}$
10	9,21	16	13,63	21	18,65
11	9,84	17	14,53	22	19,83
12	10,52	18	15,48	23	21,07
13	11,23	19	16,48	24	22,38
14	11,99	20	17,54	25	23,76
15	12,79				

Примітка: якщо виміряні значення температур t та Δt виражаються не цілими значеннями, тоді проведіть інтерполяцію.

Таблиця 3. Психрометрична таблиця відносної вологості повітря φ

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

Додаток 2

Обчислення середнього зваженого значення φ

В даній лабораторній роботі відносна вологість φ вимірюється незалежно різними психрометрами А, В, С. В результаті експерименту отримуємо три результати: $\varphi_A = \bar{\varphi}_A \pm \sigma_A$, $\varphi_B = \bar{\varphi}_B \pm \sigma_B$, $\varphi_C = \bar{\varphi}_C \pm \sigma_C$. В загальному випадку $\sigma_A \neq \sigma_B \neq \sigma_C$. Об'єднаймо ці результати, щоб отримати єдину найкращу оцінку φ .

Згідно з теорією похибок найкращою оцінкою результату для нашого випадку має бути середнє зважене значення відносної вологості $\varphi_{зв}$. Позначимо його Φ :

$$\varphi_{зв} = \Phi = \frac{\bar{\varphi}_A \omega_A + \bar{\varphi}_B \omega_B + \bar{\varphi}_C \omega_C}{\omega_A + \omega_B + \omega_C},$$

де $\omega_A, \omega_B, \omega_C$ - статистичні ваги результатів вимірів кожним із психрометрів А, В, С, що відповідно дорівнюють: $\omega_A = 1/\sigma_A^2$, $\omega_B = 1/\sigma_B^2$, $\omega_C = 1/\sigma_C^2$.

Виведемо співвідношення для похибки σ_Φ найкращого результату. Оскільки $\Phi = f(\bar{\varphi}_A, \bar{\varphi}_B, \bar{\varphi}_C)$, то:

$$\begin{aligned} \sigma_\Phi &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{\varphi}_A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{\varphi}_B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \bar{\varphi}_C}\right)^2 \sigma_C^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\omega_A}{\omega_A + \omega_B + \omega_C}\right)^2 \frac{1}{\omega_A} + \left(\frac{\omega_B}{\omega_A + \omega_B + \omega_C}\right)^2 \frac{1}{\omega_B} + \left(\frac{\omega_C}{\omega_A + \omega_B + \omega_C}\right)^2 \frac{1}{\omega_C}} = \\ &= \sqrt{\frac{\omega_A + \omega_B + \omega_C}{(\omega_A + \omega_B + \omega_C)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\omega_A + \omega_B + \omega_C}} = (\omega_A + \omega_B + \omega_C)^{-1/2}. \end{aligned}$$

Література

1. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За ред. Горбачука І.Т. – К.: «Вища школа», 1992, с.220-224.
2. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 228-237.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с.470-482.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 505-514.
5. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. Ивероновой В.И. – М.: «Наука», 1967, с. 277-284.

4. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом відриву краплі

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідин абсолютним та відносним методами.

Прилади та матеріали: мілібюретки з поділками, штативи, вимірювальний мікроскоп, еталонна рідина (дистильована вода), досліджувані рідини (гліцерин, водні розчини спирту різної концентрації).

Теоретичні відомості

Вільна поверхня тіл на межі фаз є причиною особливого типу явищ – так званих поверхневих явищ.

Молекули поверхневого шару рідини перебувають в інших умовах у порівнянні з молекулами всередині рідини.

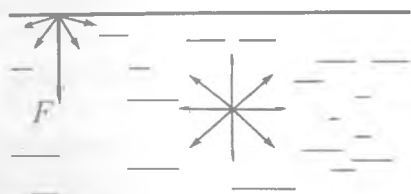


Рис. 4. На молекулу, що знаходиться на поверхні рідини, діє сила, направлена всередину рідини перпендикулярно до її поверхні.

Кожна з внутрішніх молекул оточена з усіх боків іншими молекулами й однаково притягується в усіх напрямках (результуюча сила рівна нулеві) (рис.4). Молекули, що розміщені поблизу поверхні, притягуються сусідніми молекулами, які знаходяться збоку і всередині рідини,

але не мають урівноважуючого притягання з боку молекул, що знаходяться в газовій фазі. В результаті на поверхневу молекулу діє результуюча сила, спрямована всередину рідини.

Для збільшення поверхні рідини необхідно виконати роботу, яка затрачується на виведення молекул із глибини на

поверхню. Очевидно, для зміни поверхні рідини на величину ΔS потрібно виконати роботу, рівну

$$\Delta A = an \cdot \Delta S,$$

де a – робота, що необхідна для виводу однієї молекули на поверхню, n – число молекул в 1 см^2 поверхневого шару. Коефіцієнт $an = \sigma$ є основною величиною, яка характеризує властивості поверхні рідини і називається коефіцієнтом поверхневого натягу. Таким чином:

$$\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S}. \quad (4.1)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу σ чисельно рівний роботі, яку необхідно виконати для збільшення поверхні рідини на одиницю площі.

В системі СІ коефіцієнт поверхневого натягу σ має розмірність Дж/м².

Величина σ залежить від природи рідини і від умов, в яких знаходиться рідина, зокрема від температури.

Отже, особливість поверхневого шару рідини в тому, що його поверхня S має надмірну порівняно з рештою маси рідини потенціальну енергію.

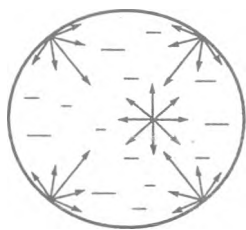


Рис. 5. Рідина під дією лише внутрішніх сил набуває форму кулі.

Відомо, що всяка система, яка перебуває в стані рівноваги, характеризується мінімальною енергією. А це означає, що у стані стійкої рівноваги рідина повинна мати мінімально можливу площу поверхні. Як відомо, при незмінному об'ємі площа тіла буде найменшою у

випадку кулеподібної форми. Тому рідина, на яку не діють зовнішні сили, повинна набувати форму кулі (рис.5).

Це в свою чергу означає, що повинні існувати сили, які перешкоджають збільшенню поверхні рідини. Тому часто користуються так званим „силовим” означенням поверхневого натягу. Фізичний зміст „силового” означення полягає в тому, що коли поверхня обмежена лінією, контуром або периметром змочування, то поверхневий натяг можна представити як відношення сили, що прикладена перпендикулярно до контуру, до довжини цього контуру (сила діє в площині, дотичній до поверхні рідини і направлена в сторону зменшення поверхні рідини).

Отже, сили поверхневого натягу повинні зумовлювати тенденцію рідини зменшувати свою поверхню. Проте, не слід забувати, що першопричиною виникнення сил поверхневого натягу є сили, що діють на молекули поверхневого шару, спрямовані в середину рідини.

Розглянемо детальніше «силовий» підхід до опису поверхневих явищ. Його частіше всього використовують для пояснення дослідів з тонкими плівками рідини. Уявимо дротяний каркас з однією (нижньою) рухливою перетинкою, довжина якої l . Якщо опустити цей каркас в мильний розчин, на ньому утвориться мильна плівка, яка намагаючись скоротитись, потягне нижню рухому перетинку вгору.

Коли сили поверхневого натягу і сила тяжіння перетинки зрівняються, настане рівновага і рух перетинки припиниться.

Робота, що затрачується проти сил поверхневого натягу при переміщенні рухомої перетинки на величину Δh , рівна:

$$\Delta A = F \cdot \Delta h. \quad (4.2)$$

З другого боку

$$\Delta A = \sigma \cdot \Delta S = \sigma \cdot 2 \cdot l \Delta h, \quad (4.3)$$

де $\Delta S = 2 \cdot l \Delta h$ - зміна поверхні плівки з обох боків. Порівнюючи формули (4.2) і (4.3), одержимо :

$$F = 2\sigma l ,$$

звідки

$$\sigma = \frac{F}{2l} = \frac{F/2}{l} , \quad (4.4)$$

де $F/2$ - сила, що діє з одного боку плівки.

Таким чином, коефіцієнт поверхневого натягу чисельно рівний силі, що діє на одиницю довжини лінії, яка є межею поверхні рідини, і направлена по дотичній до поверхні рідини, перпендикулярно до її межі.

В системі СІ коефіцієнт поверхневого натягу σ вимірюється в Н/м.

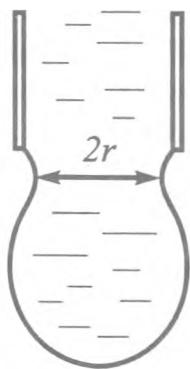


Рис. 6. Виникнення шийки перед відривом краплі.

На практиці одним із поширених методів вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу є метод відриву крапель. При порівняно невеликій швидкості витікання рідини з вузької трубки утворюються краплі майже сферичної форми. Перед відривом краплі виникає шийка, по якій і відбувається розрив поверхні рідини (рис. 6).

Нехай діаметр шийки в момент відриву краплі дорівнює $2r$, а вага краплі, що відривається, рівна P . Тоді справедлива рівність $2\pi r\sigma = P$ або $P = \pi d\sigma$, звідки

$$\sigma = P / \pi d. \quad (4.5)$$

Абсолютний спосіб вимірювання поверхневого натягу рідини полягає у заміні вимірювання ваги краплі P на вимірювання її об'єму $v=V/n$, де n – кількість крапель рідини, що витікають з бюретки, а V – об'єм n крапель, виміряний по шкалі бюретки. Враховуючи те, що вага однієї краплі при відомій густині рідини ρ рівна

$$P = \frac{\rho g V}{n},$$

формулі (4.5) можна надати вигляду:

$$\sigma = \frac{\rho g V}{\pi d n}. \quad (4.6)$$

Відносний спосіб полягає у порівнянні коефіцієнтів поверхневого натягу досліджуваної рідини σ та еталонної рідини σ_0 . Записавши формулу (4.6) для еталонної і досліджуваної рідини та взявши відношення $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ отримаємо:

$$\sigma = A \frac{\rho V}{d} \sigma_0, \quad (4.7)$$

де $A = \frac{d_0}{\rho_0 V_0}$, якщо $n = n_0$. Тут, для еталонної рідини: d_0 – діаметр шийки краплі, ρ_0 , V_0 , n_0 – густина, об'єм та кількість крапель; d , ρ , V , n – те ж саме для досліджуваної рідини. За еталонну рідину рекомендується взяти дистильовану воду.

Опис приладу

Прилад (рис. 7) складається зі штатива 1, на якому закріплені бюретка 2 з краном 3. На бюретці нанесені мірні

поділки 4. На іншому штативі, що знаходиться поруч, закріплений мікроскоп 5 з ручками 6, які дозволяють регулювати різкість зображення

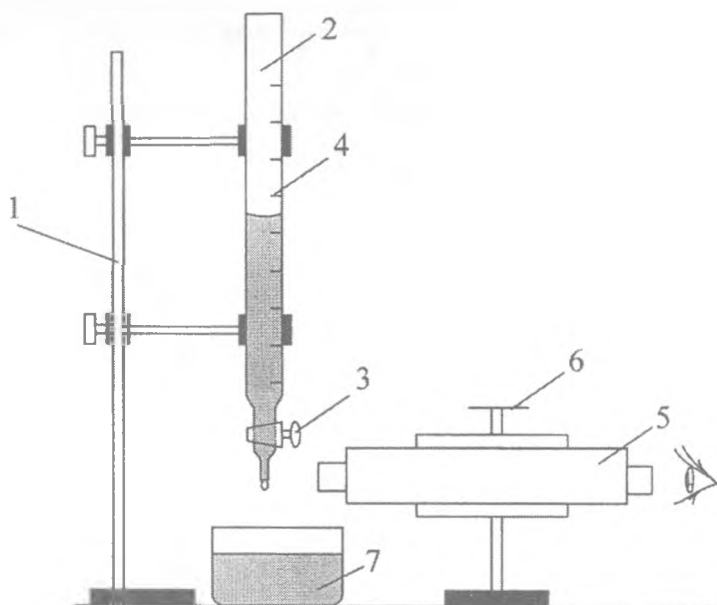


Рис. 7. Прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини: 1 – штатив; 2 – бюретка; 3 – кран; 4 – мірні поділки; 5 – мікроскоп МИР-12; 6 – ручки, які дозволяють регулювати різкість зображення перетяжки краплі; 7 – посудина для збирання крапель рідини.

перетяжки краплі. Рідину, яка витікає з бюретки, збирають в посудину 7.

Для кожної досліджуваної рідини використовується окрема бюретка.

Порядок виконання роботи:

I. Застосуйте абсолютний метод визначення коефіцієнта поверхневого натягу σ для води.

1. У чисту бюретку 2 налейте дистильовану воду до верхньої поділки шкали 4.
2. Наведіть мікроскоп 5 на зображення кінчика піпетки бюретки 2.
3. Відрегулюйте за допомогою крана 3 швидкість витікання води так, щоб Вам було зручно спостерігати перетяжку краплі.
4. Ще раз відрегулюйте мікроскоп 5 так, щоб отримати чітке зображення перетяжки краплі, і виміряйте її діаметр, використовуючи шкалу мікроскопа, ціна поділки якої становить 0.05 мм.
5. Відрахувавши близько 100 крапель і визначивши їх об'єм V по шкалі 4, знайдіть коефіцієнт поверхневого натягу води за формулою (4.6). Повторіть дослід 3 рази, знайдіть середнє значення $\langle \sigma \rangle$ для води, оцініть похибки вимірювань. Порівняйте середнє значення $\langle \sigma \rangle$ для води з табличним значенням.

II. Застосуйте відносний метод визначення σ для гліцерину і розчинів

1. Взявши іншу чисту бюретку 2, налейте в неї досліджувану рідину (гліцерин) і, проробивши всі ті ж самі дії, що й в абсолютному методі визначення, знайдіть відносним методом коефіцієнт поверхневого натягу рідини, використовуючи формулу (4.7) та табличне значення коефіцієнта σ_0 для дистильованої води.
2. Проробіть подібні виміри з розчинами спирту.
3. Представте результати у вигляді графіка $\sigma = \sigma(C\%)$.

Примітка: густину води та розчинів спирту виміряйте методом пікнометра (див. лабораторну роботу 12).

Контрольні запитання

1. Чим зумовлені явища поверхневого натягу? Що таке коефіцієнт поверхневого натягу? В яких одиницях він вимірюється?
2. Чому за відсутності зовнішніх сил крапля рідини набуває форми кулі?
3. На що витрачається робота при збільшенні поверхні рідини?
4. Як зміняться сили поверхневого натягу при зміні (підвищенні чи зниженні) а) температури, б) зовнішнього тиску?
5. Які існують методи вимірювання поверхневого натягу рідин та в чому вони полягають?
6. Чим обумовлена похибка даного експерименту?
7. Виведіть робочу формулу для даної задачі.

Література

1. Загальна фізика. Лабораторний практикум, (за ред. Горбачука І. Т.), – К.: «Вища школа», 1992, с.226-229.
2. Сивухин Д. В. Молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с.438-451.
3. Матвеев Ф. Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, 262-268.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 468-474.

5. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин капілярним методом

Мета роботи: Визначити коефіцієнт поверхневого натягу води, спирту та кількох розчинів спирту (відомої та невідомої концентрації) у воді.

Прилади та обладнання: капіляр, з'єднаний за допомогою гумової трубки з U-подібним манометром і шприцом, набір капілярних трубок, досліджувані рідини (вода, спирт, розчини спирт-вода різних концентрацій, у тому числі, двох невідомих)

Теоретичні відомості

Якщо капіляр занурити в рідину, рідина підніметься або опуститься в капілярі на деяку висоту над рівнем рідини в посудині. Це так зване капілярне явище пояснюється явищем змочування. У капілярних трубках внаслідок взаємодії молекул рідини з молекулами речовини капіляру поверхня рідини викривлюється. Тиск в рідині залежить від форми її поверхні.

Залежність тиску від кривизни поверхні рідини описується формулою Лапласа:

$$P = P_0 \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (5.1)$$

де P – тиск під викривленою поверхнею; P_0 – тиск під плоскою поверхнею; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини; R_1 та R_2 – головні радіуси кривизни поверхні рідини в капілярі.

У циліндричній капілярній трубці круглого перерізу поверхня рідини має сферичну форму, тобто $R_1=R_2=R$. У цьому випадку формула Лапласа має вигляд:

$$P = P_0 \pm \frac{2\sigma}{R}. \quad (5.2)$$

Знак “+” має місце при опуклій поверхні рідини, знак “-” – при увігнутій. Отже, для рідин, що змочують поверхню трубки, тиск під увігнутим меніском у капілярній трубці буде меншим, ніж під плоскою поверхнею рідини в широкій посудині на величину $2\sigma/R$, а для рідин, що не змочують поверхню трубки, навпаки – тиск буде більшим на таку ж величину.

Цим і пояснюється, що рідина в капілярних трубках при змочуванні піднімається, а при незмочуванні – опускається.

Очевидно, що при встановленні рівноважного положення меніска в капілярі має місце рівність:

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh, \quad (5.3)$$

де ρ – густина досліджуваної 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 радіус сферичної поверхні R дорівнює радіусу капіляра.

Якщо якимось чином збільшити зовнішній тиск над поверхнею змочуючої рідини в капілярі, можна досягти того, що рівні рідини у широкій посудині і в капілярі зрівняються. Нехай для цього зовнішній тиск потрібно збільшити на величину ΔP . Тоді буде виконуватися рівність:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}.$$

Вимірявши цей додатковий тиск ΔP , можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу σ досліджуваної рідини за формулою:

$$\sigma = \frac{R}{2} \cdot \Delta P. \quad (5.4)$$

Опис приладу

Установка для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу зображена на рис.8. Вона складається з капіляра 1, який з'єднаний з манометром 2 і з шприцом 3 через розподільник тиску 4, що має кран 5, призначений для з'єднування системи з атмосферою. За допомогою шприца 3 можна змінювати тиск у системі.

Надлишковий, у порівнянні з атмосферним, тиск ΔP вимірюється за різницею рівнів рідини в манометрі Δh

$$\Delta P = \rho_m g \Delta h, \quad (5.5)$$

де ρ_m – густина рідини в манометрі. Підставивши (5.5) в (5.4),

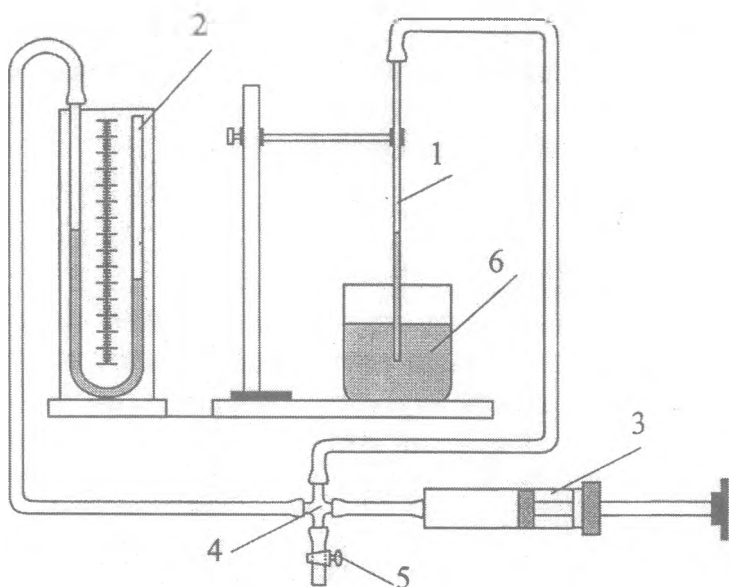


Рис. 8. Прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин капілярним методом: 1 – капіляр; 2 – манометр; 3 – шприц; 4 – розподільник тиску; 5 – кран, який дозволяє з'єднувати систему з атмосферою, 6 – посудина з досліджуваною рідиною.

одержимо вираз для поверхневого натягу досліджуваної рідини:

$$\sigma = \frac{R}{2} \cdot \rho_m g \Delta h \quad (5.6)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряйте за допомогою мікроскопа МИР-12 радіус R капіляра.
2. Досліджувану рідину (воду) залийте у посудину 6 і опустіть у неї капіляр при відкритому крані 5.
3. Рідина в капілярі підніметься на деяку висоту. Закрийте кран 5 і, повільно пересуваючи поршень шприца, збільшуйте тиск у системі, доки рівень рідини в капілярі не опуститься до рівня рідини в посудині.
4. Запишіть покази манометра Δh , повторивши дослід 3-5 разів.
5. Проведіть ті ж самі досліди для капіляра іншого діаметра.
6. За формулою (5.6) визначте коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини (води), користуючись даними, отриманими для двох капілярів різних діаметрів.
7. Такі ж виміри та розрахунки проведіть для спирту, кількох водних розчинів спирту (відомої концентрації) та водних розчинів спирту (невідомої концентрації).
8. Побудуйте графік концентраційної залежності поверхневого натягу системи спирт-вода та визначте за цим графіком концентрацію невідомого розчину.
9. Оцініть похибки вимірювань коефіцієнта поверхневого натягу σ .

Контрольні запитання

1. Які явища спостерігаються на межі рідини та твердого тіла?
2. Якою фізичною величиною характеризується змочування?

3. Від чого залежить тиск, який створює викривлення поверхні?
4. Якою умовою визначається висота підняття рідини в капілярі?
5. Виведіть робочу формулу для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу капілярним методом.
6. Що називається крайовим кутом? Яка його величина для повністю змочуваних поверхонь, для незмочуваних поверхонь?
7. Чому рівний коефіцієнт поверхневого натягу при критичній температурі?

Література

1. Дущенко В.П., Кучерук І.М., Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Вища школа», 1987, с.373-376.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум (За загальною редакцією Горбачука І.Т.). – К.: «Вища школа», 1992, с. 229.
3. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 262-268.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 468-474, 499-505.
5. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика. Молекулярная физика. – М.: «Наука», 1986, с. 414-429.

6. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса

Мета роботи: Експериментально визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини за швидкістю рівномірного падіння кульки в цій рідині.

Прилади та матеріали: Скляний циліндр із досліджуваною рідиною (гліцерин), кульки, секундомір, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Якщо при русі рідини її шари мають різну швидкість, то між шарами існують сили тертя. Виникнення цих сил пояснюється тим, що шари обмінюються молекулами. Молекули із шару, що має більшу швидкість, потрапляючи в повільніший шар, передають йому деяку кількість руху, в результаті повільніший шар прискорюється. Молекули із більш повільного шару одержують в швидкому шарі деяку кількість руху, що приводить до гальмування більш швидкого шару.

Розглянемо рух двох горизонтальних шарів рідини в напрямку x з різними швидкостями. Дослід показує, що при усталеному русі сила внутрішнього тертя (в'язкість), що діє між двома шарами, пропорційна площі їх співдотику S і градієнтові швидкості $\frac{dv}{dz}$, тобто:

$$F = \eta \frac{dv}{dz} S, \quad (6.1)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, який характеризує властивості даної рідини і має назву *коефіцієнта внутрішнього тертя* або *коефіцієнта динамічної в'язкості*.

Коефіцієнт динамічної в'язкості η чисельно рівний силі внутрішнього тертя, що виникає на одиниці поверхні співдотику двох шарів, які рухаються один відносно другого при градієнті швидкості, рівному одиниці.

Одиницею динамічної в'язкості є паскаль-секунда.
 $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с}).$

Величина φ , обернена до в'язкості η , називається *текучістю*.

Поряд з динамічною в'язкістю використовується також кінематична в'язкість ν , що визначається як динамічна в'язкість, віднесена до густини:

$$\nu = \eta / \rho.$$

Одиницею кінематичної в'язкості є $1 \text{ м}^2/\text{с}.$

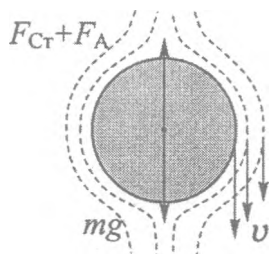


Рис. 9. Рух кульки в рідині.

Метод Стокса. У цій роботі експериментально визначається динамічний коефіцієнт внутрішнього тертя рідини η за швидкістю ν рівномірного падіння кульки в рідині.

При русі в рідині на кульку діє сила опору, обумовлена в'язкістю рідини. Має місце не тертя кульки об рідину, а тертя окремих шарів

рідини: кулька вкривається тонким шаром рідини, що рухається зі швидкістю кульки; наступні, більш віддалені від кульки шари рідини рухатимуться повільніше (рис. 9). Стокс теоретично показав, що при падінні кульки в необмеженій рідині без завихрень, сила тертя, яка діє на кульку, виражається формулою:

$$F_{\text{ст}} = 6\pi\eta v, \quad (6.2)$$

де v – швидкість падіння кульки, r – радіус кульки.

Виведення цієї формули досить складне, проте вигляд співвідношення, яке визначає силу $F_{\text{ст}}$, можна з точністю до сталого множника одержати, виходячи із принципу розмірностей фізичних величин. Досліди показують, що сила опору, яка діє на рухому кульку в рідині, буде тим більшою, чим більшими є коефіцієнт внутрішнього тертя η рідини, радіус кульки r та швидкість падіння кульки v .

Таким чином, можна записати:

$$F_{\text{ст}} = A\eta r^a v^b, \quad (6.3)$$

де $A = \text{const}$, a, b – показники степені.

Сила внутрішнього тертя між шарами рівна:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (6.4)$$

де x – нормаль до напрямку падіння кульки.

Порівнюючи співвідношення (6.3) та (6.4), можна побачити, що добуток $r^a \cdot v^b$ повинен мати розмірність добутку $\frac{dv}{dx} S$. Запишемо вирази для розмірностей:

$$[r^a \cdot v^b] = \text{м}^a \cdot (\text{м/сек})^b = \text{м}^{a+b} / \text{сек}^b,$$

$$(dv/dx) \cdot S = (1/\text{сек}) \cdot \text{м}^2 = \text{м}^2 / \text{сек}.$$

Прирівнявши ці вирази, одержимо: $\text{м}^{a+b} / \text{сек}^b = \text{м}^2 / \text{сек}$, тобто $a+b=2$, $-b = -1$, а отже: $a=1$, $b=1$. Тоді маємо $F = A\eta r v$. Множник A цим методом визначити не можна. Розгляд теорії гідродинаміки в'язкої рідини в методі Стокса дає значення $A=6\pi$.

З формули (6.2) видно, що сила опору рідини зростає при зростанні швидкості кульки. На кульку при її падінні в'язкій рідині діють такі сили:

1. Сила тяжіння, що спрямована вертикально донизу, з абсолютною величиною рівна:

$$P = mg = \rho_k V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g,$$

де m – маса кульки, ρ_k – густина матеріалу кульки, V – об'єм кульки, g – прискорення сили земного тяжіння;

2. Архімедова сила виштовхування кульки, спрямована вертикально вгору:

$$F_A = m_p g = \rho_p V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g,$$

де m_p – маса витісненої рідини, ρ_p – густина рідини;

3. Сила внутрішнього тертя, що направлена протилежно до напрямку руху кульки:

$$F_{\text{ст}} = 6 \pi \eta r v.$$

На початку руху швидкість кульки зростає, відповідно зростає і сила тертя. При деякому значенні швидкості $v = v_k$ сили, які діють на кульку, зрівноважуються:

$$P = F_A + F_{\text{ст}},$$

або

$$F_{\text{ст}} = P - F_A. \quad (6.5)$$

Рух кульки при цьому стає рівномірним. З умови рівноваги всіх сил, які діють на кульку, впливає вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя, а саме:

$$6 \pi \eta r v_k = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_p g,$$

де ρ_k – густина кульки. Звідси:

$$\eta = 2(\rho_k - \rho_p)r^2g/9v_k \quad (6.6)$$

Ця формула справедлива для випадку, коли відстань від кульки до стінок посудини велика. Урахування наявності стінок, дна посудини та верхньої поверхні рідини при русі кульки вздовж осі циліндричної посудини, приводить до такого виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2(\rho_k - \rho_p)r^2g}{9v_k \left(1 + 2.4 \frac{4r}{R}\right) \left(1 + 2.4 \frac{4r}{h}\right)}, \quad (6.7)$$

де R – радіус циліндричного перерізу посудини, h – висота стовпа рідини у ній. Оскільки відношення $\frac{r}{h}$ для нашої експериментальної установки дуже мале, то останнім множником у знаменнику, який враховує вплив на рух кульки наявності дна та поверхні рідини, можна знехтувати.

Остаточний вигляд формули, якою можна скористатись в даній роботі, має вигляд:

$$\eta = [2(\rho_k - \rho_p)r^2g] / [9v_k(1 + 2.4 \frac{4r}{R})]. \quad (6.8)$$

Для знаходження значення швидкості кульки $v_k = \frac{L}{t}$

треба виміряти секундоміром час t та довжину шляху L руху кульки, коли швидкість кульки установиться постійною.

Коефіцієнт внутрішнього тертя має суттєву залежність від температури. З підвищенням температури в'язкість рідини зменшується.

Наприклад, коефіцієнт внутрішнього тертя гліцерину при температурі 20°C дорівнює $1,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$, а при температурі 40°C досягає $0,224 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{сек}^{-1}$. Тому, визначаючи коефіцієнт внутрішнього тертя, необхідно вказувати температуру рідини. Слід зауважити, що визначення температури рідини треба проводити з точністю

не менше $\Delta t = 0,5^{\circ}\text{C}$, оскільки поблизу $t = 20^{\circ}\text{C}$ зміна температури на один градус викликає зміну коефіцієнта внутрішнього тертя гліцерину на 4%.

Опис приладу

На рис. 10 представлено прилад Стокса. Він являє собою скляний циліндр 1, заповнений гліцерином або іншою в'язкою рідиною. За циліндром 1 розміщена мірна лінійка 2 для вимірювання довжини шляху L , пройденого кулькою 3. Металеву кульку 3 опускають через скляну трубку 4, що розміщена по вісі циліндра 1.

На циліндрі 1 з допомогою ниток нанесені дві мітки 5, 6, віддаль L між якими можна змінювати.

Звичайно вимірюють якомога більший шлях L для зменшення відносної похибки. Треба враховувати також те, що кулька рухається спочатку прискорено,

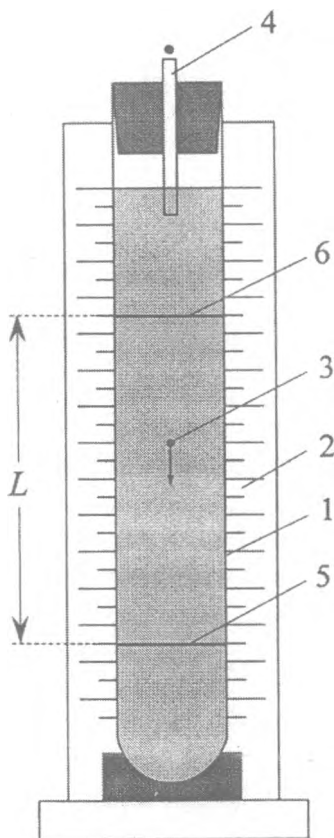


Рис. 10. Прилад Стокса:
1 – скляний циліндр; 2 – мірна лінійка; 3 – металева кулька; 4 – скляна трубка.

тому не можна брати поверхню рідини за початок відліку.

Густина рідини визначається за допомогою пікнометра або береться з довідника.

Порядок виконання роботи

1. Визначте діаметр кульок за допомогою мікрометра з точністю до 0,005 мм, обчисліть радіус кульки.
2. Визначте кімнатну температуру за допомогою термометра.
3. Запишіть в таблицю температуру рідини, вважаючи її рівною кімнатній.
4. Густина досліджуваної рідини візьміть або з таблиці, або виміряйте пікнометром.
5. Опустіть кульку в трубку з рідиною.
6. За допомогою секундоміра визначте час t , за який кулька, рухаючись рівномірно, пройде відрізок L , що відмірюється по масштабній лінійці трубки. (Око помістіть так, щоб не було паралаксу).
7. Повторіть цей дослід із іншими кульками при різних значеннях L .
8. Результати дослідів запишіть в таблицю 1:

Таблиця 1.

№	L , м	t , с	v , м/с	η , кг/м·с	T , °К

9. За формулою (6.8) обчисліть η .
10. Обчисліть середнє значення η .
11. Проаналізуйте абсолютну та відносну похибки експерименту при невідтворюваних умовах дослідів.
12. Запишіть результат з довірчим інтервалом та довірчою ймовірністю.

13. Обчисліть коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = \eta / \rho$. Оцініть похибки.

Контрольні запитання

1. Що називається коефіцієнтом динамічної в'язкості, якими є його розмірність та одиниця вимірювання? Від чого залежить значення сили тертя?
2. Що називається градієнтом швидкості та яка його одиниця вимірювання в системі СІ? Як направлений градієнт швидкості?
3. Які сили діють на кульку, що падає в рідині? Який характер має рух кульки на початковому етапі? Запишіть рівняння руху на основі II закону Ньютона.
4. При якій умові опір руху кульки буде пропорційним швидкості?
5. Для якої рідини цим методом можна визначити точніше коефіцієнт в'язкості: для води чи для гліцерину?
6. Як залежить в'язкість рідини від температури? Намалуйте графік.
7. Як зміниться швидкість руху кульки при збільшенні її діаметра?
8. Чи потрібно вводити поправочний коефіцієнт розрахункову формулу при Ваших вимірюваннях?

Література

1. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 356, 365, 387.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. Ивероновой В.И. – М.: «Наука», 1967, с. 226-230.
3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 463-468.

7. Дослідження температурної та концентраційної залежності коефіцієнта внутрішнього тертя рідин за допомогою капілярного віскозиметра

Мета роботи: Дослідити:

а) температурну залежність в'язкості рідин капілярним віскозиметром в інтервалі температур 20–50°C; визначити величину енергії активації для води;

б) концентраційну залежність в'язкості розчинів спирту у воді капілярним віскозиметром, визначити концентрацію невідомого розчину спирту.

Прилади та матеріали: 1) капілярний віскозиметр та інструкція до нього; 2) секундомір; 3) досліджувані рідини; 4) термостат.

Теоретичні відомості

При русі тіл у в'язкому середовищі чи при русі різних шарів цього середовища один відносно одного виникає внутрішнє (в'язке) тертя. Сила опору, що виникає при цьому, називається *силою внутрішнього тертя*. Робота, затрачена на подолання сил тертя, перетворюється в різні види енергії, що розсіюється в зовнішньому середовищі. Тому тертя відносять до дисипативних процесів.

Під час протікання рідини по трубці шари рідини ковзають один по одному (при ламінарній течії), переміщуючись з різними швидкостями. При цьому, ті шари, що знаходяться ближче до стінок трубки, рухаються повільніше. Максимальна швидкість шарів спостерігається по осі трубки.

У різних рідинах сили тертя різні. Тому кажуть, що рідини мають різну в'язкість.

Внутрішнє тертя належить до явищ переносу (при порушенні рівноваги в тілах ідуть потоки тепла, маси чи імпульсу). У розглядуваному випадку імпульс переноситься

в напрямку зменшення швидкості рідини. Так, імпульс, що передається за час dt від шару до шару рідини через площу dS дорівнює:

$$dK = -\eta \frac{dv}{dx} dS dt. \quad (7.1)$$

Експериментально встановлено, що сила внутрішнього тертя пропорційна площі поверхні S і градієнту швидкості $\frac{dv}{dx}$ (зміні швидкості v на одиницю довжини у напрямку перпендикулярному до швидкості руху):

$$f = \eta S \frac{dv}{dx}, \quad (7.2)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, що називається *коефіцієнтом внутрішнього тертя* (або *динамічної в'язкістю*). Величина η чисельно рівна силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі паралельно рухомих шарам при одиничному градієнті швидкості, направленому перпендикулярно до переміщення цих шарів.

Сила внутрішнього тертя залежить від в'язких властивостей середовища, швидкості руху, форми і розміру тіл. Коефіцієнт в'язкості η залежить від роду рідини і температури.

Температурна залежність $\eta(T)$ для рідин описується з формулою Френкеля:

$$\eta = A e^{\frac{U}{kT}}, \quad (7.3)$$

де A – коефіцієнт, U – енергія активації, k – стала Больцмана, T – абсолютне значення температури.

Енергія активації U – це та мінімальна енергія, яка потрібна для переходу молекули рідини з одного тимчасового стану рівноваги до іншого.

Енергія активації U залежить від ступеня впорядкованості розташування молекул і величини міжмолекулярних сил. Експериментально перевірка формули Френкеля здійснюється шляхом побудови температурної залежності в'язкості $\eta = \eta\left(\frac{1}{T}\right)$ у логарифмічному масштабі:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{U}{kT} \quad (7.4)$$

Існують різні експериментальні методи визначення величини η з використанням рівняння (7.2), а саме – метод визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин за допомогою капілярного віскозиметра, метод Стокса, метод спостереження затухаючих коливань у рідинах та інші.

Розглянемо метод визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин η за допомогою капілярного віскозиметра. Нехай рідина тече капілярною трубкою довжиною l і радіусом r . Швидкість руху рідини в певній точці капіляра позначимо через u , а відстань від цієї точки до осі капіляра – через y . Припустимо, що швидкість u буде однаковою в усіх точках, що знаходяться на одній відстані від осі трубки.

Виділимо в рідині елементарний циліндричний об'єм. Згідно з формулою (7.2) сила внутрішнього тертя f , що діє на бічну поверхню циліндра, буде мати вигляд:

$$f = \eta 2\pi y l \frac{du}{dy}, \quad (7.5)$$

де y – змінний радіус, l – довжина виділеного циліндра. При усталеному русі сила f урівноважується різницею сил тиску на основі циліндра ΔPS , де $S = \pi y^2$ – площа поперечного перерізу циліндра. Тому:

$$-\eta 2\pi y l \frac{dv}{dy} = \Delta P \pi y^2$$

або

$$dv = -\frac{\Delta P}{2\eta l} y dy. \quad (7.6)$$

Проінтегрувавши рівняння (7.6), отримаємо вираз для швидкості руху рідини:

$$v = -\frac{\Delta P}{2\eta l} \frac{y^2}{2} + C, \quad (7.7)$$

де C – стала інтегрування. Щоб визначити значення C припустимо, що швидкість біля стінки трубки ($y=r$) дорівнює нулеві, тоді:

$$C = -\frac{\Delta P}{2\eta l} \frac{r^2}{2}, \quad (7.8)$$

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta l} (r^2 - y^2). \quad (7.9)$$

Вираз (7.9) є законом розподілу швидкостей v по перерізу трубки. Користуючись співвідношенням (7.9), легко розрахувати об'єм рідини q , що протікає за одиницю часу через поперечний переріз капіляра радіусом r

$$q = \int_0^r 2\pi v y dy. \quad (7.10)$$

Підставляючи в (7.10) значення v з формули (7.9) та інтегруючи отриманий вираз, маємо:

$$q = \frac{r^4 \Delta P \pi}{8\eta l}. \quad (7.11)$$

Цей вираз відомий під назвою закону Пуазейля. Користуючись цим законом, ми можемо визначити коефіцієнт внутрішнього тертя η :

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8ql} \quad (7.12)$$

Оскільки рідина витікає під дією сили тяжіння, то різниця тисків на кінцях капіляра буде рівною $\Delta P = \rho gl$, де ρ – густина рідини. Отже,

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho g \tau}{8V}, \quad (7.13)$$

де τ – це час, за який заданий об'єм рідини V проходить через капіляр (оскільки $q = \frac{V}{\tau}$).

Опис приладу

На рис. 11 наведено схематичне зображення скляного капілярного віскозиметра ВПЖ-3.

Цифрами позначено деталі:

- 1 - груша для засмоктування досліджуваної рідини у віскозиметр;
- 2 - резервуар для досліджуваної рідини;
- 3 - кран;
- 4 - резервуар певного об'єму;
- 5 - мітки М1, М2;
- 6 - капіляр;
- 7 - посудина з досліджуваною рідиною;
- 8 - трубки для під'єднання віскозиметра до термостату;
- 9 - штатив.

Згідно з інструкцією до віскозиметра, коефіцієнт в'язкості η визначається за формулою:

$$\eta = B \tau \rho, \quad (7.14)$$

де τ – час, за який проходить меніск в'язкої рідини від М₁ до М₂ (див. рис. 11), а B – константа, що дорівнює:

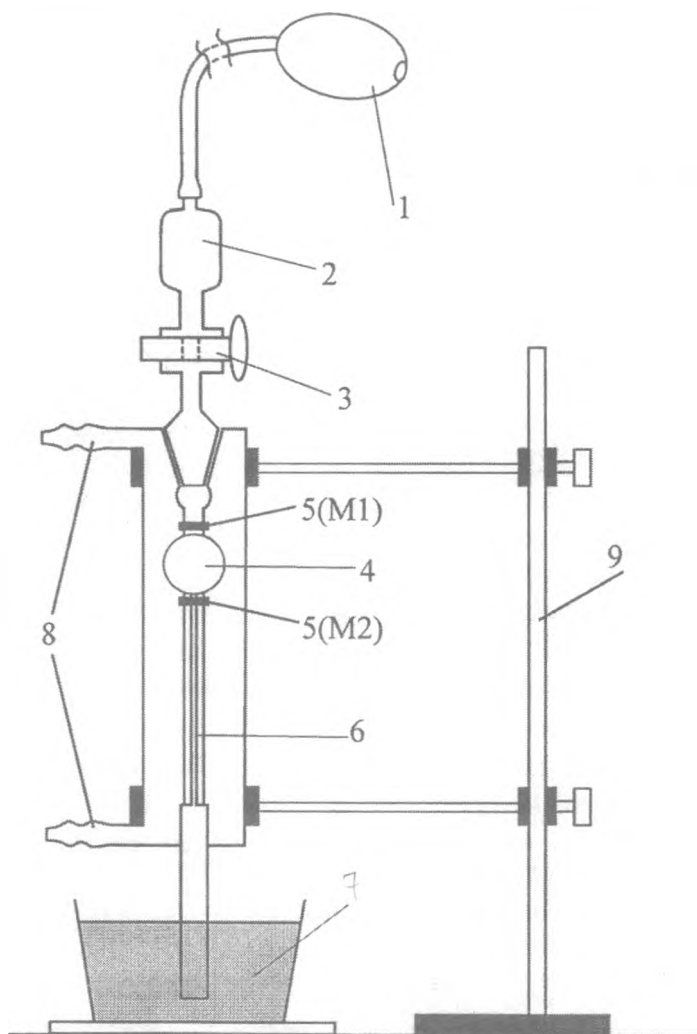


Рис. 11. Скляний капілярний віскозиметр ВПЖ-3: 1 – груша для всмоктування робочої рідини; 2 – резервуар для досліджуваної рідини; 3 – кран; 4 – резервуар певного об'єму; 5 – мітки M1, M2; 6 – капіляр; 7 – нижня посудина з досліджуваною рідиною; 8 – трубки для під'єднання віскозиметра до термостату.

$$B = \frac{\pi r^4 g}{8V} \quad (7.15)$$

(Значення константи B наводиться в інструкції).

Порядок виконання роботи:

I. Вимірювання в'язкості води при кімнатній температурі.

1. При відкритому крані 3 з нижньої посудини 7 із дистильованою водою (попередньо профільтрованою) грушею 1 накачайте робочу рідину в резервуар 2.
2. Закрийте кран 3. Підготуйте секундомір для роботи.
3. Відкрийте кран 3.
4. Для дистильованої води при кімнатній температурі секундоміром виміряйте час τ , за який меніск рідини проходить шлях $M_1 M_2$. Повторіть виміри не менше трьох разів. Знайдіть середнє значення τ .
5. Занесіть дані τ , в таблицю.
6. Коефіцієнт внутрішнього тертя η води розрахуйте за формулою (7.14). Значення температури визначте термометром. Константа, яка фігурує у формулі (7.14), надана в інструкції до віскозиметра: $B = 0,0159 \text{ мм}^2/\text{с}^2$. Значення густини води ρ візьміть із таблиці температурної залежності густини $\rho(T)$, приведеної у Додатку 1.
7. Повторіть вимірювання 3-5 разів.

II. Дослідження температурної залежності в'язкості води.

1. Увімкніть термостат до мережі. Проведіть виміри в'язкості при температурах 25°C , 37°C та 45°C , як це робилося при кімнатній температурі.
2. Результати представте у вигляді Таблиці 1.

Таблиця 1.

№	T, K	τ, c	$\rho, g/cm^3$	$\eta_i, Pa \cdot s$	$\Delta \eta_i, Pa \cdot s$

3. Побудуйте графік залежності $\eta(T)$, відклавши на осі ординат $\ln \eta$, а на осі абсцис $-\frac{1}{T}$.
4. Оцініть значення енергії активації U із нахилу прямої на графіку $\ln \eta, \frac{1}{T}$.
5. Оцініть похибки вимірювань.

III. Дослідження концентраційної залежності в'язкості $\eta(C)$ розчинів.

1. Визначте (при кімнатній температурі) концентрації декількох наданих водних розчинів спирту за допомогою спиртометра.
2. Визначте в'язкість цих же розчинів так, як це робилося в пункті I.
3. Коефіцієнти внутрішнього тертя η відомих розчинів спирту знайдіть за формулою (7.14).
4. Значення густин розчинів спирту, які треба підставляти у формулу (7.14), визначте методом пікнометра (див. лабораторну роботу №12).
5. Знайдіть коефіцієнт внутрішнього тертя для водного розчину спирту невідомої концентрації (ρ знайдіть за методом пікнометра).
6. Усі одержані результати занесіть у Таблицю 2:

Таблиця 2.

$C, \%$	τ_1, c	τ_2, c	τ_3, c	$\rho, kg/m^3$	$\eta_i, ml Pa \cdot s$	$\Delta \eta_i, ml Pa \cdot s$

7. Побудуйте графік залежності в'язкості η від концентрації $\eta = \eta(C)$.
8. Із графіка визначте концентрацію невідомого розчину (методом інтерполяції).
9. Оцініть похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Напишіть рівняння переносу Фіка, Фур'є, Ньютона для газів.
2. Напишіть вирази для коефіцієнтів переносу та їх взаємозв'язки.
3. Виведіть формулу Пуазейля.
4. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?
5. У чому суть методу капілярного віскозиметра?
6. Як оцінити енергію активації для рідин?
7. Зобразіть графічно температурну залежність коефіцієнта в'язкості η для рідин та газів за ортобаричних умов у широкому інтервалі температур, включаючи критичну точку.

Література

1. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 356, 365, 387.
2. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика: Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Вища школа», 1993, с. 367-373.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. Ивероновой В.И. – М.: «Наука», 1967, с. 230-233.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: «Госиздат. физико-математической литературы», 1963.

5. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 463-468.

Додаток

Густина води при різних температурах

t, °C	ρ , кг/м ³	t, °C	ρ , кг/м ³
0	999.87	21	998.02
5	999.99	22	997.80
8	999.88	23	997.57
9	999.81	24	997.32
10	999.73	25	997.07
11	999.63	26	996.81
12	999.52	27	996.54
13	999.40	28	996.26
14	999.27	29	995.97
15	999.13	30	995.67
16	998.97	31	995.37
17	998.80	32	995.05
18	998.62	33	994.72
19	998.43	34	994.40
20	998.23	35	994.06

8. Визначення питомої теплоти плавлення та розрахунок зміни ентропії льоду

Мета роботи: ознайомитися з будовою, принципом дії водяного термостату та порядком роботи з ним, визначити питому теплоту плавлення льоду за допомогою рівняння теплового балансу, розрахувати зміну ентропії системи в процесі встановлення теплової рівноваги.

Прилади та матеріали: термостат водяний ІТЖ-0-03, термометр, мірний циліндр або інша градуйована посудина, ваги, металева кювета для льоду.

Теоретичні відомості

Питома теплота плавлення λ – це фізична величина, що дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати одиниці маси речовини при температурі плавлення для переведення її в рідкий стан.

Питома теплота плавлення вимірюється в [Дж/кг].

Кількість теплоти, що надана тілу, можна визначити з рівняння теплового балансу. Для ізольованої системи тепло, віддане одними тілами системи, повністю поглинається іншими тілами системи:

$$\sum Q_i = 0.$$

Для льоду маси $m_{\text{л}}$ при температурі $T_{\text{л}}$, що поміщений у воду маси $m_{\text{в}}$ при температурі $T_{\text{в}}$, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$m_{\text{в}}c_{\text{в}}(T_{\text{в}} - \vartheta) = m_{\text{л}}c_{\text{л}}(T_0 - T_{\text{л}}) + m_{\text{л}}\lambda + m_{\text{л}}c_{\text{в}}(\vartheta - T_0), \quad (8.1)$$

де Θ – температура рівноваги, c_v – питома теплоємність води ($c_v = 4200$ Дж/кг·К), c_l – питома теплоємність льоду ($c_l = 2100$ Дж/кг·К), T_0 – температура плавлення льоду ($T_0 = 273,16$ К).

З формули (8.1) отримуємо для питомої теплоти плавлення:

$$\lambda = \frac{m_v c_v (T_v - \Theta) - m_l c_l (T_0 - T_l) - m_l c_v (\Theta - T_0)}{m_l} \quad (8.2)$$

Ентропія – важлива термодинамічна функція, яка може бути виміряна експериментально. Ентропія розраховується за загальною формулою:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}, \quad (8.3)$$

де:

ΔS – зміна ентропії в процесі зміни стану речовини від стану 1 до стану 2;

dQ – елементарна кількість теплоти, що надана системі;

T – абсолютна температура, при якій відбувається теплопередача.

У даній роботі зміна ентропії льоду ΔS є сумою її змін у таких послідовних процесах:

- 1) нагрівання льоду від T_l до температури плавлення льоду T_0 ,
- 2) танення льоду при T_0 ,
- 3) нагрівання води від T_0 до температури теплової рівноваги Θ :

$$\Delta S = \int_{T_A}^{T_0} \frac{m_{\lambda} c_{\lambda} dT}{T} + \frac{1}{T_0} \int_0^{m_{\lambda}} \lambda dm + \int_{T_0}^{\Theta} \frac{m_{\lambda} c_{\theta} dT}{T}, \quad (8.4)$$

де інтегрування в першому та третьому членах ведеться по температурі. Для другого члена процес іде при сталій температурі, бо відбувається танення льоду, і інтегрування ведеться по масі. Остаточно маємо:

$$\Delta S = m_{\lambda} c_{\lambda} \ln \frac{T_0}{T_A} + \frac{\lambda m_{\lambda}}{T_0} + m_{\lambda} c_{\theta} \ln \frac{\Theta}{T_0}. \quad (8.5)$$

Опис приладу

У роботі використовується водяний термостат 1ТЖ-0-03, призначений для використання в медичних і хімічних експериментах, які потребують дотримання сталої температури. Схематичне зображення термостату наведено на рис. 12.

Робоча камера 1 термостату являє собою заповнений водою відсік, у якому розташовують відповідні досліджувані прилади та матеріали. Вода в камері нагрівається електричним нагрівачем 2 та переміщується електричним насосом 3 для конвективного вирівнювання температур по всьому об'єму робочої камери. Термостат налаштовано на шість стандартних температур: 25, 37, 45, 65, 90 та 100 °C із точністю підтримання температури $\pm 0,3$ °C. Якщо робочою рідиною є вода, температура не повинна перевищувати 45°C. Підтримання заданої температури проводиться за допомогою електронної схеми, що працює за принципом зворотного зв'язку і регулює потужність нагріву рідини в

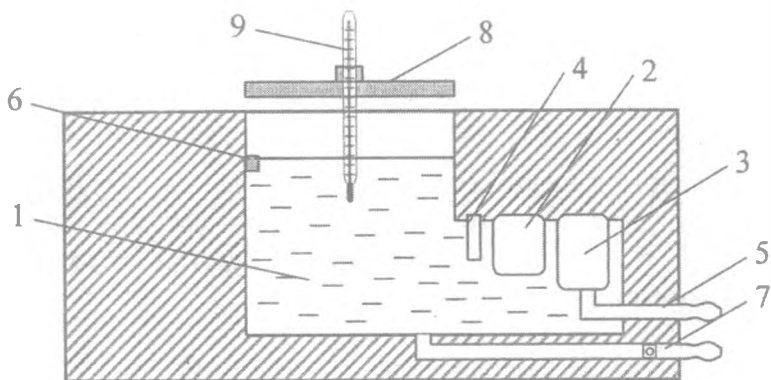


Рис. 12. Водяний термостат ІТЖ-0-03: 1 – робоча камера; 2 – електричний нагрівач; 3 – електричний насос; 4 – термодатчик; 5 – трубки зовнішнього контуру термостатування та охолодження (показана в перерізі лише одна); 6 – відмітка рівня рідини; 7 – трубка зливу з краном; 8 – кришка; 9 – термометр.

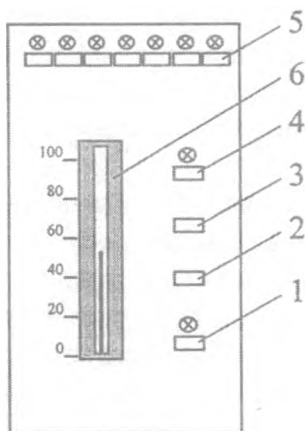


Рис. 13: Передня панель ІТЖ-0-03: 1 – живлення; 2 – вмикання насоса; 3 – вібратор для пробірок; 4 – прискорене нагрівання; 5 – вибір температури термостатування; 6 – якісний індикатор потужності нагрівника.

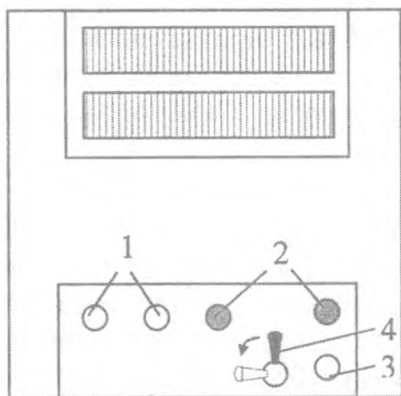


Рис. 14: Бокова панель ІТЖ-0-03: 1 – штуцери для підключення зовнішнього охолодження; 2 – вхід та вихід для зовнішнього контуру термостатування; 3 – трубка для зливу; 4 – кран трубки для зливу (стрілкою вказане положення крану при зливі робочої рідини).

залежності від різниці показів термодатчика 4 на терморезисторах та заданої кінцевої температури. Передбачено режим прискореного нагрівання, при якому вмикається додатковий підігрівач. На рис. 12 також позначені: 5 – трубки зовнішнього контуру термостатування та охолодження, 6 – відмітка рівня рідини, 7 – трубка зливу з краном, 8 – кришка, 9 – термометр.

На передній панелі термостата (рис. 13) розташована скляна трубка для перевірки рівня рідини в робочій камері та блок управління. На рис. 13 позначено:

1 – кнопка "Мережа" для підключення до електромережі (при цьому вмикається світловий індикатор);

2 – кнопка для вмикання насосу;

3 – кнопка для вмикання вібратора для пробірок, що призначений для перемішування вмісту пробірок, які можуть розміщуватися в термостаті у спеціальному штативі (у даній роботі цей пристрій не використовується);

4 – кнопка для вмикання прискореного нагрівання. При досягненні температури, на $0,5-1^{\circ}$ нижчої за задану, прискорене нагрівання автоматично відключається;

5 – кнопки для вибору температури термостатування з відповідними індикаторами (щоб вимкнути термостатуючий механізм, потрібно до половини натиснути одну з цих кнопок, після чого увімкнута кнопка відключиться);

6 – індикатор, який якісно показує потужність нагрівника.

Робочий режим встановлюється, коли індикаторний стовпчик 6 наближається до відмітки з заданою температурою.

На рис. 14 зображена права стінка термостату. Штуцери 1 та 2 призначені для підключення зовнішнього охолодження, штуцери 3 та 5 – для підключення зовнішнього контуру (вони повинні бути надійно закриті заглушками, бо

в даній роботі термостат працює “на себе” без зовнішнього контуру). Трубка 6 призначена для зливу робочої рідини, який здійснюється шляхом переведення крану 4 у горизонтальне положення.

Порядок виконання роботи

Підготовка льоду.

Лід бажано готувати в спеціальній металевій кюветі. Необхідна для роботи маса льоду становить не менше 400 г (оптимально 500 – 1000 г). При наявності потужного холодильника з регулюванням температури воду необхідно починати заморожувати за 4 – 5 годин до початку досліду при максимально низькій температурі. При використанні побутового холодильника воду треба ставити в нього за 7–12 годин до досліду. Кювету слід виймати з холодильника безпосередньо перед внесенням льоду до термостату.

Вмикання термостату.

1. Набираючи воду мірним циліндром чи іншою посудиною залийте до камери 18–20 літрів чистої (бажано дистильованої) води. Слідкуйте за тим, щоб вода не потрапляла на решітки електричних частин термостата, при попаданні води на корпус необхідні витерти її. Вставте в отвір кришки термометр.
2. Перевірте заземлення термостату (у разі його пошкодження повідомте про це лаборанта).
3. Увімкніть термостат у мережу і натисніть кнопку “Мережа”. Натисніть кнопки “Насос” та “Прискорене нагрівання”. На верхній панелі натисніть кнопку, що відповідає температурі 37°C (друга ліворуч). Швидкість нагрівання води дорівнюватиме приблизно 1° за хвилину. Після автоматичного відключення

прискореного нагрівання робоча температура води в термостаті встановиться через 2–5 хв.

Вимірювання температури теплової рівноваги.

1. Вийміть термометр.
2. Вимкніть термостатування.
3. Вимкніть насос.
4. Вийміть з холодильника лід і подрібніть його.
5. Трохи підніміть кришку термостату та обережно висипте весь лід у воду. Закрийте кришку.
6. Зважте порожню посудину. Визначте масу льоду.
7. Через кілька хвилин лід розтане (перевірити це можна трохи піднявши кришку). Вставте термометр та увімкніть насос.
8. Через 2–3 хв, коли вода рівномірно перемішається, виміряйте температуру рівноважного стану.

Розрахунки питомої теплоти плавлення льоду проведіть за формулою (8.4).

Розрахунки зміни ентропії льоду проведіть за формулою (8.5).

Похибки. Можна оцінити похибку вимірювань питомої теплоти плавлення льоду за допомогою стандартної процедури. Якщо ΔT , $\Delta \Theta$, Δm_n , Δm_s – абсолютні похибки вимірювань відповідних величин, то формула для абсолютної похибки непрямих вимірювань має вигляд:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_s}\right)^2 (\Delta T_s)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_n}\right)^2 (\Delta T_n)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \Theta}\right)^2 (\Delta \Theta)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial m_s}\right)^2 (\Delta m_s)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial m_n}\right)^2 (\Delta m_n)^2}$$

Відносна похибка розраховується як $\varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$.

Аналогічні вирази використовуються для розрахунку абсолютної та відносної похибок визначення зміни ентропії льоду.

Увага! Після закінчення роботи обов'язково вимкніть термостат та злийте воду з робочої камери!

Контрольні запитання

1. Запишіть рівняння теплового балансу та поясніть фізичний зміст кожного з членів формул (8.1), (8.4), (8.5).
2. Чому робочу камеру термостата можна в певному наближенні розглядати як ізольовану систему?
3. Температура термостатування підтримується з точністю не більше 0.3°C . Від яких систем термостата залежить ця точність? Чи можна підтримувати задану температуру *абсолютно* точно?
4. Вкажіть основні джерела випадкових похибок у цьому експерименті. Як зменшити ці похибки?
5. У рівнянні теплового балансу (8.1) не враховується теплоємність стінок робочої камери термостату. Чи можна її виміряти та врахувати?
6. Поясніть процедуру розрахунку похибок для питомої теплоти плавлення льоду.
7. Що можна заздалегідь сказати про зміну ентропії всієї системи в процесі встановлення рівноваги?
8. Що таке фазові перетворення I роду? Як поводити себе внутрішня енергія F , ентропія S та термодинамічний потенціал Гіббса Φ при фазових перетвореннях I роду?
9. Запишіть рівняння Клапейрона-Клаузіуса.

10. Зобразіть об'ємну діаграму стану PVT та її проекції на площини PV , PT , TV .

Література

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с. 470-496.
2. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 334-343.
3. Загальна фізика. Лабораторний практикум, (за ред. Горбачука І.Т.), – К.: «Вища школа», 1992, с. 201-202, 204-206.
4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: «Наука», 1964
5. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 403-414.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика. Молекулярная физика. – М.: «Наука», 1986, с. 126-138, 449-453.

9. Визначення ізохорного температурного (термічного) коефіцієнта тиску повітря

Мета роботи: дослідити, як змінюється тиск повітря при збільшенні температури, якщо об'єм залишається сталим. За знайденими даними визначити температурний (або термічний) коефіцієнт тиску повітря при сталому об'ємі при різних температурах.

Прилади і матеріали: скляна колба об'ємом 3 літри з газом, що досліджується (повітря), манометр, термометр, електрична плитка, барометр, гранітна підставка.

Теоретичні відомості

Термодинамічний стан одного моля ідеального газу характеризується трьома величинами – тиском P , об'ємом V та температурою T . Якщо зафіксувати один з цих параметрів, то залежності між двома іншими будуть виражатися простими співвідношеннями, які були встановлені експериментально.

Залежність об'єму газу V від його температури t для випадку, коли газ нагрівається при постійному тиску ($P = \text{const}$), була знайдена французьким фізиком Гей-Люссаком. Математично вона виражається формулою:

$$V = V_0(1 + \alpha_p \Delta t) = V_0 + V_0 \alpha_p \Delta t, \quad (9.1)$$

де величина α_p - ізобарний температурний (або термічний) коефіцієнт об'ємного розширення газу, V_0 - об'єм газу при 0°C .

Аналогічна залежність для тиску P від температури t була встановлена Шарлем для випадку, коли газ нагрівається при постійному об'ємі ($V = \text{const}$):

$$P=P_0(1+\alpha_v \Delta t)=P_0+P_0\alpha_v \Delta t, \quad (9.2)$$

де величина α_v - *ізохорний температурний (або термічний) коефіцієнт тиску*.

Ізохорним температурним (або термічним) коефіцієнтом тиску α_v називається відносна зміна тиску газу при зміні температури на 1 градус при сталому об'ємі.

У термодинаміці температурні (або термічні) коефіцієнти визначаються через частинні похідні від термодинамічних параметрів. Так, частинна похідна від об'єму V по температурі T при постійному тискові входить як складова частина у вираз для ізобарного коефіцієнта температурного розширення об'єму α_p речовини:

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (9.3)$$

а частинна похідна від тиску P по температурі T при постійному об'ємі входить як складова частина у вираз для ізохорного температурного коефіцієнта тиску α_v речовини:

$$\alpha_v = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v. \quad (9.4)$$

У свою чергу частинна похідна від V по тиску P при постійній температурі T відіграє таку ж саму роль у виразі для ізотермічного коефіцієнта стисливості речовини β_T :

$$\beta_T = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T. \quad (9.5)$$

Знайдемо числові значення для ізохорного температурного коефіцієнта тиску ідеального газу при нормальних умовах ($P_0=101.3 \times 10^3 \text{ Па}$, $T_0=273.15 \text{ К}$). Згідно з означенням (9.4), у випадку ідеального газу, для якого $PV=RT$ та $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V}$, значення ізохорного термічного коефіцієнта тиску буде рівним при 0°C :

$$\alpha_V = \frac{1}{P_0} \frac{R}{V} = \frac{VR}{RT_0 V} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273.15} \text{ К}^{-1} = 0,00367 \text{ К}^{-1}. \quad (9.6)$$

Аналогічно одержується при 0°C значення для ізобарного температурного коефіцієнта об'ємного розширення:

$$\alpha_P = \frac{1}{273.15} \text{ К}^{-1} = 0,00367 \text{ К}^{-1}.$$

Ці значення однакові для всіх ідеальних газів.

Опис приладу.

На рис.15 зображена установка для визначення ізохорного термічного коефіцієнта тиску. Вона складається із скляної колби 1 (об'ємом 3 літри), нагрівача 2 (електричної плитки), термометра 3 для визначення температури повітря в колбі та манометра 4, що приєднаний до колби за допомогою гумової трубки 5. Колба стоїть на гранітній підставці 6, яка потрібна для рівномірного прогрівання повітря у колбі. Робочою рідиною в манометрі є вода.

Порядок виконання роботи:

1. Виміряйте початкову (кімнатну) температуру повітря в колбі термометром 3 в градусах Цельсія та

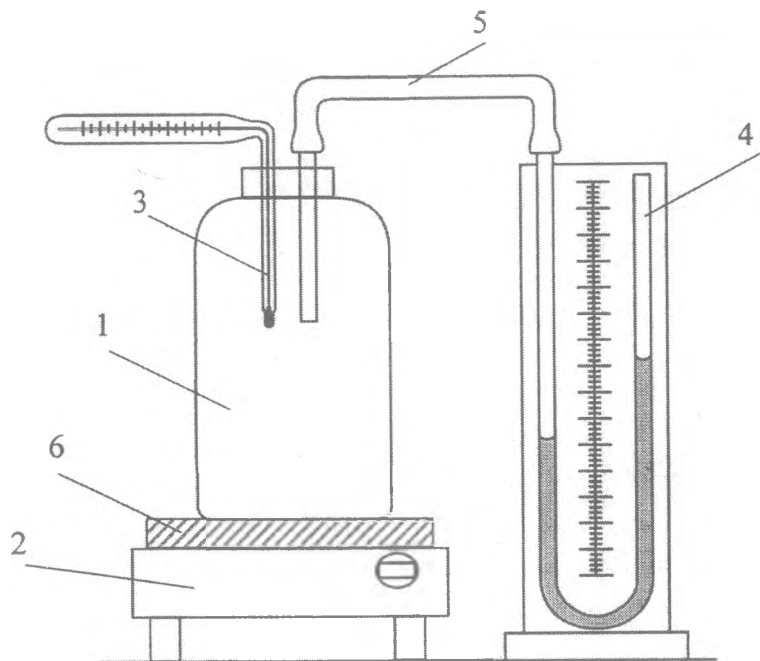


Рис.15. Установка для визначення ізохорного температурного коефіцієнта тиску повітря: 1 – колба; 2 – нагрівач (електрична плитка); 3 – термометр; 4 – манометр; 5 – гумова трубка; 6 – гранітна підставка.

початковий тиск в паскалях. Оскільки початковий тиск в колбі рівний атмосферному тиску, то за значення початкового тиску візьміть покази барометра при кімнатній температурі ($1 \text{ атм} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

2. Підігрійте колбу 1 з повітрям на електричній плитці 2. (Для рівномірного нагрівання бажано обгорнути колбу фольгою.)

3. При нагріванні колби з повітрям записуйте через однакові проміжки часу покази термометра та відповідні їм покази манометра (тобто різницю рівнів води в манометрі).
4. Дослідні дані представте у вигляді таблиці:

Таблиця 1.

№	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta h, 10^{-3}\text{м}$	$P_0, \text{Па}$	$\Delta P, \text{Па}$	$P, \text{Па}$	α_V, K^{-1}

5. Розрахунок величини ΔP проведіть за формулою $\Delta P = \rho_B g \Delta h$, а величини α_V при різних температурах – за формулою, яку можна одержати із (9.2):

$$\alpha_V = \frac{\Delta P}{P_0 \Delta t} = \frac{\rho_B g \Delta h}{P_0 \Delta t}, \quad (9.7)$$

де Δt – зміна температури, ΔP – зміна тиску в системі, ρ_B – густина рідини в манометрі (вода), g – прискорення вільного падіння, Δh – різниця рівнів рідини в манометрі.

6. Оцініть точність результатів вимірювань величини α_V .
7. Побудуйте графік залежності тиску $P = P_0 + \Delta P$ та величини α_V від температури t , вкажіть на ньому межі довірчих інтервалів.

Контрольні запитання.

1. Дайте визначення ізохорного температурного коефіцієнта тиску. Яка існує аналогія між температурними коефіцієнтами при сталому тиску та при сталому об'ємі?
2. Покажіть, що ізохорний температурний коефіцієнт тиску газу обернено пропорційний абсолютній температурі.
3. Що вносить найбільшу похибку у Ваші вимірювання?

Література

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с. 35-41.
2. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. Ивероновой В.И. – М.: «Наука», 1967, с. 188-190.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 313-317.

10. Визначення сталої Больцмана k

Мета роботи: експериментально визначити сталу Больцмана k .

Прилади і матеріали: скляний балон місткістю 10л; медичний інсуліновий шприц на 5см³; лабораторний термометр; U-подібний водяний манометр; ацетон; пристрій для видалення парів ацетону з балону з вентилятором.

Теоретичні відомості

Виходячи з молекулярно-кінетичного тлумачення поняття температури, її слід вимірювати в одиницях енергії. Проте це робити дуже незручно на практиці, оскільки необхідно оперувати досить малими числами (температурі в 1 К відповідає енергія $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж), та й сама процедура вимірювання при цьому значно ускладнюється.

Множник k , який виражає співвідношення між одиницею енергії (джоулем) та температурою (кельвіном), називають *сталю Больцмана k* . Числове значення сталої Больцмана k встановлюється експериментально різними методами.

Стала Больцмана k фігурує у всіх законах, які містять класичні або квантові функції розподілу частинок за енергіями. Зв'язок сталої Больцмана з іншими газовими сталими виражається рівністю $k=R/N_A$, де R — універсальна газова стала; N_A — число Авогадро.

В даній роботі в основу дослідного визначення сталої Больцмана покладено рівняння стану ідеального газу Менделєєва-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT = \frac{m}{\mu} k N_A T. \quad (10.1)$$

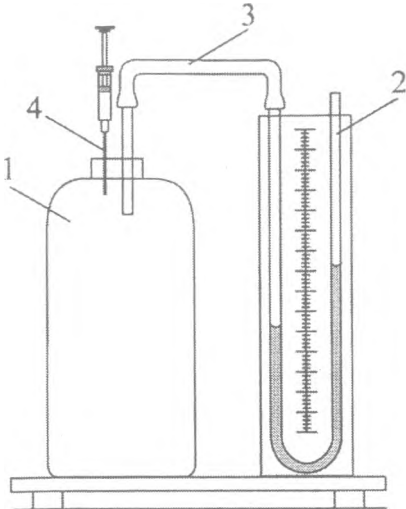


Рис.16. Прилад для визначення сталої Больцмана k : 1 – скляний товстостінний балон; 2 – рідинний манометр; 3 – гумова трубка; 4 – медична голка.

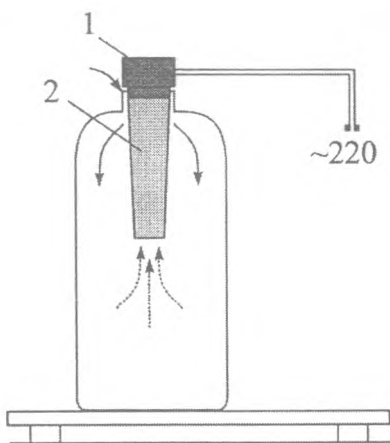


Рис.17: 1 – вентилятор, який використовується щоб відкачати пари ацетону з балону; 2 – ковпак-чашка.

Опис приладу та методика визначення k

Прилад для визначення сталої Больцмана k (рис. 16) складається зі скляного товстостінного балону 1 та з манометра 2, що з'єднується гумовою трубкою 3 з балоном. У корку балона закріплено медичну голку 4 для введення через неї шприцом рідини, що легко випаровується (наприклад, ацетону). Після введення певної маси ацетону (Δm_a) у балоні підвищується тиск на величину парціального тиску ΔP газоподібного ацетону. Величину ΔP визначають диференціальним манометром.

Парціальний тиск газоподібного ацетону в балоні $\Delta P = nkT$ пропорційний масі Δm_a введенного ацетону:

$$\Delta P = \frac{\Delta m_a}{\mu V} N_A kT = nkT, \quad (10.2)$$

де $\frac{\Delta m_a}{\mu}$ – число молів введеного в балон ацетону; V – робочий об'єм балона; T – температура газової суміші в балоні;
 $n = \frac{\Delta m_a N_A}{\mu V}$ – кількість молекул ацетону в одиниці об'єму балона (для ацетону $\mu = 0,058$ кг/моль), звідки

$$k = \frac{\mu V}{N_A T} \frac{\Delta P}{\Delta m_a} = \frac{\Delta P}{n T} \quad (10.3)$$

Парціальний тиск ΔP парів ацетону в балоні вимірюється манометром. Якщо різниця рівнів стовпчиків рідини в манометрі Δh , то тиск ΔP рівний:

$$\Delta P = \rho_p g \Delta h, \quad (10.4)$$

де ρ_p – густина манометричної рідини (задається наперед при відповідних температурах досліду). Маса ацетону $\Delta m_a = \rho_a V_a$, де ρ_a – густина ацетону ($\rho_a = 790$ кг/м³); V_a – об'єм введеного ацетону.

$$n = \frac{\rho_a V_a N_A}{\mu V} \quad (10.5)$$

Підставивши (10.4), (10.5) у формулу (10.3) отримуємо:

$$k = \frac{\mu V}{N_A T} \frac{\rho_p g \Delta h}{\rho_a V_a} = \frac{\mu V \rho_p g}{N_A \rho_a} \frac{\Delta h}{V_a T}. \quad (10.6)$$

Отже, для сталої Больцмана k маємо:

$$k = A \frac{\Delta h}{V_a T}, \quad (10.7)$$

де $A = \frac{\mu V \rho_p g}{N_A \rho_a}$ – коефіцієнт, який є константою в умовах досліду.

Порядок виконання роботи

1. Перевірте герметизацію балону. Дуже важливо, щоб гумова пробка щільно прилягала до горловини балону.
2. Наповніть медичний шприц з голкою одним-двома кубічними сантиметрами ацетону. Зніміть з шприца голку і приєднайте цей шприц до голки 4 на балоні 1. (Початкові положення рівнів рідини в колінах манометра повинні бути однаковими.)
3. Натискаючи на поршень шприца, введіть у балон ацетон об'ємом V_{a1} . Для збереження герметизації балону не виймайте шприц із голки 2.
4. Після випаровування ацетону і встановлення рівноваги в системі зніміть покази манометра Δh і виміряйте температуру T .
5. Введіть в балон ще певний об'єм ацетону ΔV . Зніміть покази манометра для нового об'єму ацетону $V_{a2} = V_{a1} + \Delta V$.
6. Дані занесіть в таблицю 1.

Таблиця 1.

№	$V_a \cdot 10^3, \text{м}^3$	$\Delta h, \text{мм}$	$k = A \frac{\Delta h}{V_a T}, \text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$	$\Delta k, \text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$

7. Для проведення повторного дослідження необхідно відкачати пари ацетону з балону. Для цього використайте вентилятор 1 (рис.17). На горловину балону надіньте ковпак-чашку 2. Потім помістіть електричний вентилятор в чашку та увімкните живлення вентилятора. При цьому повітря з парами ацетону витягується вентилятором. Після 1,5-2 хвилини роботи вентилятора вимкніть живлення та зніміть чашку. Подібну операцію слід проводити перед кожним наступним дослідом.

8. Дослід повторіть 3-5 разів для різних значень V_a .
9. Обчисліть значення постійної Больцмана k за формулою (10.7). Значення ρ_p візьміть з таблиць.
10. Знайдіть середнє значення величин k та оцініть похибки вимірів у даному експерименті. Знайдіть довірчий інтервал, враховуючи невідтворюваність умов експерименту. Порівняйте одержане значення k з табличним.
11. Оцініть кількість молекул ацетону в одиниці об'єму балона ($n = \rho_a V_a N_A / \mu V$) при різних дослідах.
12. Зробіть висновки відносно методики та результатів вимірювань.

Контрольні запитання і завдання

1. Який фізичний зміст універсальної газової сталої R ?
2. Виведіть робочу формулу для розглянутого методу визначення постійної Больцмана k .
3. Опишіть відомі Вам методи визначення сталої Больцмана k .
4. Наведіть приклади законів, в яких фігурує стала Больцмана k .
5. Які джерела похибок у цій роботі?

Література

1. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За ред. Горбачука І.Т. – К.: «Вища школа», 1992, с. 188-190.
2. Сивухин Д.В. Общій курс фізики. Т.2. Термодинамика и молекулярная фізика. – М.: «Наука», 1990, с. 210-220.
3. Матвеев Ф.Н. Молекулярная фізика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 65-70.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П., Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 305-309.

11. Визначення механічного еквівалента теплоти

Мета роботи: Визначити взаємозв'язок між теплотою і роботою, знайти механічний еквівалент теплоти.

Прилади та матеріали: калориметр, ЛАТР (лабораторний автотрансформатор), амперметр, вольтметр, нагрівник, секундомір, термометр, робоча рідина (вода), дерев'яна лопатка.

Теоретичні відомості

Теплота є одним із видів енергії, і її перетворення в інші види енергії (зокрема в механічну роботу) підлягає закону збереження енергії. Прямим наслідком закону збереження енергії є перше начало термодинаміки, яке встановлює еквівалентність теплоти і роботи. Ця еквівалентність виражається формулою:

$$A = EQ, \quad (11.1)$$

де A – робота, яку необхідно затратити для одержання кількості теплоти, рівної Q ,

E – стала величина, яку прийнято називати *механічним еквівалентом теплоти* (або *механічним еквівалентом калорії*).

Механічний еквівалент теплоти E є тим множником, який дозволяє переходити від механічних одиниць до теплових.

Із формули (11.1) слідує:

$$E = \frac{A}{Q} \quad (11.2)$$

Отже, механічний еквівалент теплоти E показує, яку кількість одиниць роботи треба затратити для отримання однієї одиниці теплоти.

Числове значення механічного еквівалента теплоти залежить від вибору одиниць. На практиці механічний еквівалент теплоти виражається звичайно в технічній системі одиниць. Він рівний

$$E=427 \text{ кГ} \cdot \text{м/ккал}=4,18 \text{ Дж/кал.}$$

Величину, що обернена до механічного еквівалента теплоти

$$E'=1/E, \quad (11.3)$$

звичайно називають *термічним еквівалентом роботи*. Він дорівнює $E'=0,24 \text{ кал/Дж}$.

Механічний еквівалент теплоти відіграє значну роль на практиці. Величину механічного еквівалента теплоти E визначають на досліді шляхом вимірювання значення роботи A та еквівалентної їй кількості теплоти Q .

Існує декілька експериментальних методів визначення механічного еквівалента теплоти. Найбільш поширеними є два методи: 1) *калориметричний метод*, в якому система тіл калориметра отримує теплоту за рахунок роботи проти сил тертя; 2) *електричний метод*, в якому система тіл калориметра отримує теплоту від електричного нагрівача.

Другий метод найбільш простий і точний. Тому саме він застосовується в даній лабораторній роботі.

Опис установки та методика визначення E

Установка для визначення механічного еквівалента теплоти представлена на рис. 18. Вона складається із калориметра 1 з водою 2, нагрівника 3, термометра 4, а також електричної схеми з реєструючими приладами: амперметром A і вольтметром V .

Якщо електричний струм I проходить по провіднику, до кінців якого прикладена відповідна напруга U , протягом часу

τ , то роботу електричного струму A можна знайти за формулою:

$$A = IU\tau. \quad (11.4)$$

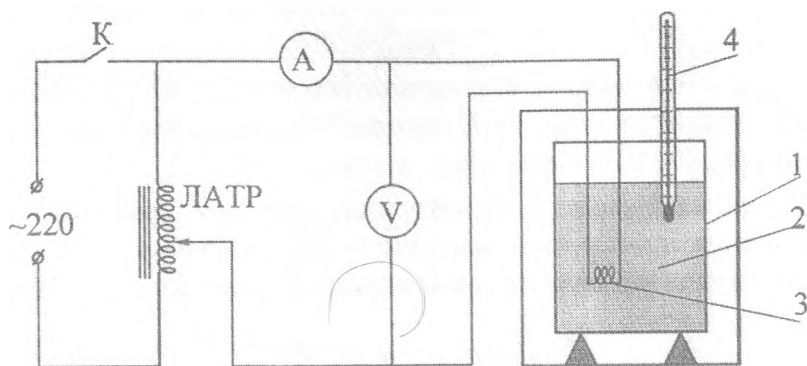


Рис. 18. Схема установки: 1 – калориметр, 2 – рідина, 3 – нагрівник, 4 – термометр, К – ключ для вмикання електричної схеми, А – амперметр, V – вольтметр.

З другого боку, кількість теплоти, що віддається струмом калориметру, визначається виразом:

$$Q = (m_1 c_1 + W)(t_2 - t_1), \quad (11.5)$$

де c_1 — питома теплоємність води, m_1 — маса рідини в калориметрі, t_1, t_2 — початкова та кінцева температури рідини, W — водяний еквівалент калориметра. Величина водяного еквівалента калориметра W визначається добутком маси внутрішньої посудини калориметра m_2 на питому теплоємність c_2 того матеріалу, із якого він зроблений:

$$W = m_2 c_2.$$

Нехтуючи втратами тепла в калориметрі, знаходимо у відповідності з формулою (11.2) значення механічного еквівалента теплоти:

$$E = \frac{IU\tau}{(m_1c_1 + m_2c_2)(t_2 - t_1)} . \quad (11.6)$$

При обчисленні E в технічній системі одиниць, тобто в Дж/кал величина струму I повинна бути виражена в амперах, а напруга U – у вольтах.

У випадку, коли вся електрична енергія витрачається на нагрівання провідника, залежність між виділеною теплотою та електричною енергією описується законом Джоуля-Ленца:

$$Q = E'IU\tau = E'I^2R\tau , \quad (11.7)$$

де Q – кількість теплоти, виділеної струмом у провіднику. Тут коефіцієнт E' – *тепловий еквівалент енергії електричного струму* і дорівнює 0,24 кал/Дж.

Порядок виконання роботи

1. Зберіть електричну схему згідно з рис. 18, ознайомтесь з ціною поділок та межами діапазонів вимірювання амперметра та вольтметра, що застосовуються в даній роботі.
2. За допомогою терезів визначте масу калориметра та робочої рідини (води).
3. Визначте початкову температуру робочої рідини (води).
4. Занурте нагрівальний елемент у калориметр з рідиною.
5. На ЛАТРі виставте напругу близько 70 В.
6. Увімкніть одночасно живлення електричної схеми та секундомір.

7. Запишіть точні значення I та U .
8. Протягом 3 хвилин проведіть нагрівання рідини, час від часу перемішуючи її дерев'яною лопаткою.
9. Вимкніть струм, зупиніть секундомір та запишіть покази термометра.
10. Повторіть дослід 3-5 разів.
11. Обчисліть значення механічного еквівалента теплоти за формулою (11.6) (в даній роботі використовуються вода і калориметр з питомими теплоємностями $c_1 = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, $c_2 = 0,18 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, відповідно).
12. Оцініть похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте перший закон термодинаміки. Дайте визначення для теплоти, внутрішньої енергії системи та роботи.
2. Розгляньте роботу при різних термодинамічних процесах.
3. Для чого знаходять механічний еквівалент теплоти?
4. Які Ви знаєте методи визначення механічного еквівалента теплоти?
5. Що таке термічний еквівалент роботи?
6. Запишіть закон Джоуля і Ленца.
7. Як залежить кількість виділеного тепла від опору R ?

Література

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика. – М., 1997, – 415с.
2. Попко Ю.М., Князева Л.К. Руководство к практикуму по физике. – М., 1959 – 440с.
3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под редакцией Ивероновой В.И. – М.: «Наука», 1967, с. 190-196.

12. Визначення густини рідин методом пікнометра

Мета роботи: визначити густину рідини за допомогою пікнометра.

Прилади: пікнометр, терези з різновагами, еталонна рідина (дистильована вода), досліджувана рідина.

Теоретичні відомості

Пікнометрами називаються невеликі посудини різної форми і місткості, всередину яких можна вводити певні об'єми рідини. Пікнометри використовуються для визначення густини рідких тіл. Зазвичай пікнометри виготовляються зі скла.

На рис. 19 зображений лабораторний пікнометр у вигляді колбочки 1 з притертою пробкою 2. На вузькій частині пікнометра нанесено позначку 3, що відповідає номінальному об'єму пікнометра.

Пікнометр наповнюють рідиною за допомогою піпетки до позначки 3. При заповненні пікнометра необхідно слідкувати за тим, щоб всередині пікнометра на його стінках не лишалось пухирців повітря, для цього, при наповненні пікнометра, рідина повинна стікати по стінках.

При спеціальних лабораторних дослідженнях із рідини

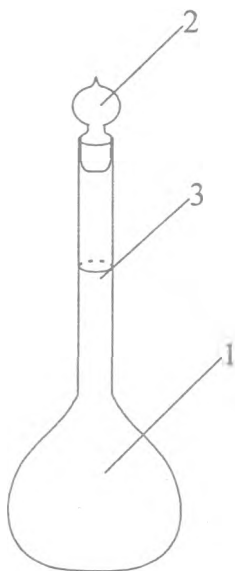


Рис. 19. Пікнометр: 1 – колба, 2 – притерта пробка, 3 – позначка номінального об'єму пікнометра.

попередньо видаляється розчинене повітря, яке змінює її густину. Для цього досліджувану рідину в склянці розміщують в спеціальну посудину, з якої викачується повітря. Через невеликий проміжок часу із рідини починають виділятися пухирці повітря. Після цього рідину швидко переливають в пікнометр.

Густиною тіла називається фізична величина, що дорівнює відношенню маси тіла до його об'єму:

$$\rho = m/V, \quad (12.1)$$

де m і V – відповідно маса і об'єм тіла.

Вираз (12.1) справедливий лише для однорідних тіл. В неоднорідних тілах густина різних ділянок різна. В цьому випадку обирають малий об'єм ΔV , всередині якого тіло можна вважати однорідним. Тоді

$$\rho = \Delta m / \Delta V.$$

Переходячи до границі, одержимо:

$$\rho = dm/dV. \quad (12.2)$$

Питомою вагою тіла називається фізична величина, чисельно рівна відношенню ваги тіла у вакуумі до його об'єму:

$$d = P/V, \quad (12.3)$$

де P – вага тіла у вакуумі.

В загальному випадку

$$d = dP/dV, \quad (12.4)$$

Оскільки $P = mg$, то густина і питома вага зв'язані між собою співвідношенням:

$$d = \rho g$$

$$(12.5)$$

Пікнометричний метод базується на зважуванні досліджуваної речовини, яка займає в пікнометрі певний об'єм V . При визначенні густини пікнометричним методом можна досягти малих похибок вимірювання (до $\pm 0.0001\%$) при застосуванні високоточних терезів. Площа вільної поверхні рідини в пікнометрі дуже мала, що практично виключає випаровування рідини і зменшує поглинання вологи із повітря. При точних вимірюваннях густини температура рідини повинна залишатись строго постійною, що досягається шляхом термостатування рідини.

Існує два основних методи вимірювання густини рідини за допомогою пікнометра – абсолютний та відносний. Перший займає менше часу, але застосовується лише тоді, коли відомий об'єм пікнометра, в якому міститься рідина. Якщо ж об'єм пікнометра не відомий (але фіксований), то застосовують відносний метод.

При абсолютному методі вимірювання густини ρ користуються безпосередньо формулою (12.1), підставляючи відому масу рідини m , що міститься у відомому об'ємі V .

При відносному методі визначення густини застосовують формулу (12.1) до двох різних речовин і беруть відношення ρ_2/ρ_1 . Якщо зважування рідин здійснювалось в однакових об'ємах, відношення густин двох рідин буде рівним $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{m_2}{m_1}$, звідки

$$\rho_2 = \frac{m_2}{m_1} \rho_1. \quad (12.6)$$

Таким чином, при застосуванні відносного методу знаходять густину невідомої рідини ρ_2 , використовуючи

табличне значення густини еталонної рідини ρ_1 і визначаючи експериментально маси досліджуваної m_2 і еталонної m_1 рідин у деякому певному об'ємі V . Для цього виконують три зважування: пустого пікнометра, пікнометра, наповненого еталонною рідиною, пікнометра, наповненого досліджуваною рідиною.

Для отримання більш точних значень густини слід враховувати, що у повітрі на зважуване тіло і на гирі діє виштовхувальна сила Архімеда, що призводить до уявного зменшення ваги. Розглянемо це зменшення більш детально.

1. Зважування пустого пікнометра.

Поставимо на ліву шальку терезів пустий пікнометр та зрівноважимо його гирями. При рівновазі терезів сили, що діють на ліву і праву шальку, рівні.

На ліву шальку діє сила F_1 , що рівна вазі пікнометра в повітрі:

$$F_1 = P_{\text{пiкн}} - F_{A, \text{скла}} = P_{\text{пiкн}} - V_{\text{скла}} \rho_{\text{пов}} g,$$

де $P_{\text{пiкн}}$ - вага пікнометра в пустоті, $F_{A, \text{скла}}$ - сила Архімеда, що діє на порожній пікнометр, $V_{\text{скла}}$ - об'єм скла, із якого виготовлений пікнометр, $\rho_{\text{пов}}$ - густина повітря. Але

$$V_{\text{скла}} = P_{\text{пiкн}} / \rho_{\text{скла}} g,$$

тому $F_1 = P_{\text{пiкн}} (1 - \rho_{\text{пов}} / \rho_{\text{скла}})$.

На праву шальку діє сила F_2 , рівна

$$F_2 = P_1 - F_{A, r} = P_1 - V_r \rho_{\text{пов}} g,$$

де P_1 - вага гирь в пустоті, $F_{A, r}$ - сила Архімеда, що діє на гирі, V_r - об'єм гир, $\rho_{\text{пов}}$ - густина повітря. Оскільки

$$V_r = \frac{P_0}{\rho_r g},$$

де ρ_r - густина гир, то

$$F_2 = P_0 (1 - \rho_{\text{пов}} / \rho_r).$$

Умова рівноваги запишеться у вигляді:

$$P_{\text{пін}} (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{скла}}) = P_0 (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{т}}). \quad (12.7)$$

2. *Зважування пікнометра, наповненого дистильованою водою.*

Наповнимо пікнометр дистильованою водою з густиною ρ_1 до позначки 3, що вказує на об'єм V , і зважимо. Умова рівноваги терезів:

$$P_{\text{пін}} (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{скла}}) + (V \rho_1 g - V \rho_{\text{нов}} g) = P_1 (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{т}}). \quad (12.8)$$

де $V \rho_1 g$ – вага води в пустоті, $V \rho_{\text{нов}} g$ – виштовхувальна сила, що діє збоку повітря на воду в об'ємі V , P_1 – вага пікнометра з водою в пустоті.

3. *Зважування пікнометра, наповненого досліджуваною рідиною.*

Наповнимо пікнометр досліджуваною рідиною, густина якої ρ_2 , до позначки 3 і зважимо. Умова рівноваги терезів:

$$P_{\text{пін}} (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{скла}}) + (V \rho_2 g - V \rho_{\text{нов}} g) = P_1 (1 - \rho_{\text{нов}} / \rho_{\text{т}}), \quad (12.9)$$

де $V \rho_2 g$ – вага рідини в пустоті, $V \rho_{\text{нов}} g$ – виштовхувальна сила, що діє збоку повітря на досліджувану рідину в об'ємі V .

Віднімаючи вираз (12.7) із (12.9) та із (12.8) і розділивши одержані результати один на один, маємо:

$$\frac{\rho_2 - \rho_{\text{нов}}}{\rho_1 - \rho_{\text{нов}}} = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0},$$

звідки значення густини невідомої рідини буде рівним:

$$\rho_2 = \frac{\mathcal{P}_2 - \mathcal{P}_0}{\mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_0} (\rho_1 - \rho_{нов}) + \rho_{нов}, \quad (12.10)$$

або
$$\rho_2 = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} (\rho_1 - \rho_{нов}) + \rho_{нов},$$

де M_0 , M_1 , M_2 – маса пікнометра, маса пікнометра з водою, маса пікнометра з досліджуваною рідиною.

Врахувавши, що $m_1 = (M_1 - M_0)$ – маса еталонної рідини (води) в об'ємі V , а $m_2 = (M_2 - M_0)$ – маса досліджуваної рідини в об'ємі V , одержимо:

$$\rho_2 = \frac{m_2}{m_1} (\rho_1 - \rho_{нов}) + \rho_{нов}. \quad (12.11)$$

Таким чином, у формулі (12.11) врахована поправка на втрату ваги в повітрі. Густина повітря беруть із довідникових таблиць. Якщо $\rho_{нов} \ll \rho_1, \rho_2$, то формула (12.11) набуває вигляду (12.6).

При постійній роботі з пікнометром зручно визначити заздалегідь його постійні, тобто масу і ємність V , щоб в подальшому проводити лише одне зважування пікнометра для визначення маси досліджуваної рідини у відомому об'ємі.

Порядок виконання роботи:

У даній роботі використовується як абсолютний, так і відносний метод визначення густини.

Порядок виконання роботи при використанні відносного методу.

1. Зважте сухий пікнометр. Маса сухого пікнометра – M_0 .

2. Наповніть пікнометр до позначки дистильованою водою, температуру якої попередньо виміряйте, і зважте його. Маса пікнометра з дистильованою водою – M_1 .
3. Видаливши воду з пікнометра і висушивши його, наповніть пікнометр досліджуваною рідиною. Проведіть зважування. Маса пікнометра з досліджуваною рідиною – M_2 .
4. Розрахуйте: а) масу дистильованої води в об'ємі пікнометра: $m_1 = (M_1 - M_0)$; б) масу досліджуваної рідини в об'ємі пікнометра: $m_2 = (M_2 - M_0)$.
5. Оцініть порядок поправки на $\rho_{нов}$ у формулі (12.11). Якщо поправкою можна знехтувати, розрахуйте значення густини досліджуваної рідини ρ_2 за формулою: $\rho_2 = \rho_1 \frac{m_2}{m_1}$.

Значення густини води ρ_1 при даній температурі візьміть з таблиці (див. додаток).

Контрольні запитання

1. Яка різниця між густиною і питомою вагою? В яких одиницях вимірюються ці величини?
2. Які переваги абсолютного та відносного методів визначення густини рідин методом пікнометра? Який з цих методів точніший?
3. Як можна збільшити точність вимірювання густини?
4. Чи можна нехтувати поправкою на густину повітря у даній лабораторній роботі?
5. Як залежать густини рідини та її насиченої пари від температури? (Зобразіть графічно).
6. Напишіть формули температурної залежності для різниці та півсуми густин рідини та пари.

Література

1. Чолпан П.Ф., Гаркуша Л.Н. Экспериментальные методы определения плотности жидкостей: Методические рекомендации для студентов физических специальностей вузов. – К., 1987. – 20с.
2. Общий физический практикум / под ред. Матвеева А.Н. – М.: «МГУ», 1991. – 272с.
3. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике/под ред. Ивероновой В.И. - М.: «Гостехиздат», 1955. – с. 67-70.

Додаток

Густина води (ρ_v) та питома вага повітря (d) при різних температурах ($d = \rho_{\text{пов}} g$, Н/м³, $g = 9,8$ м/с²)

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho_v, \text{кг/м}^3$	$d, \text{Н/м}^3$
15	999,13	1,201
16	998,97	1,197
17	998,80	1,193
18	998,62	1,189
19	998,43	1,185
20	998,23	1,181
21	998,02	1,177
22	997,80	1,173
23	997,57	1,169
24	997,32	1,165
25	997,07	1,161
26	996,81	1,157

13. Визначення теплоти розчинення солі

Мета роботи: Визначити теплоту розчинення карбонату натрію $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (питна сода) та мідного купоросу $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ методом калориметрії.

Прилади та матеріали: наважки солей (карбонату натрію та мідного купоросу), дистильована вода, терези, посудина об'ємом 0,5 л, термостат, термометр ртутний, паличка для перемішування, секундомір, електричний нагрівник, штатив.

Теоретичні відомості

Розчинення твердої речовини (солі) в рідині складається з двох процесів: плавлення (руйнування кристалічної ґратки твердої речовини) та змішування двох рідин. Перший процес відбувається із поглинанням теплоти і називається ендотермічним, а другий може бути екзотермічним із виділенням теплоти, якщо в результаті взаємодії утворюються гідратовані йони, або ендотермічним, якщо розчиняються гідрати. Результуючий тепловий ефект розчинення може бути позитивним чи негативним, у залежності від того, які процеси переважають, екзотермічні чи ендотермічні.

Процес розчинення відбувається, доки не встановлюється рівновага між розчином і речовиною, що розчиняється. Розчин, у якому досягнуто такої рівноваги, називають *насиченим*.

Важливою термодинамічною характеристикою розчинів є *молярна теплота розчинення* ΔQ – кількість теплоти, що виділяється або поглинається при розчиненні одного моля речовини у такій кількості розчинника, при якій подальше збільшення його не викликає зміни температури розчину. Для ідеальних розчинів (коли теплота змішування рівна

нулеві) молярна теплота розчинення дорівнює теплоті плавлення солі $\lambda_{\text{пл}}$:

$$\Delta Q = \lambda_{\text{пл}}$$

Теплоту розчинення визначають методом калориметрії.

Із наведеного вище означення випливає, що кількість теплоти ΔQ_1 , що виділяється (поглинається) при розчиненні ν молей солі, дорівнює

$$\Delta Q_1 = \nu \Delta Q.$$

З другого боку $\Delta Q_1 = C \Delta T_1$,

де C – теплоємність калориметра з речовиною, що дорівнює кількості теплоти, яку витрачають на нагрівання калориметра з його вмістом на один градус; ΔT_1 – зміна температури розчину після розчинення.

Звідси знаходимо вираз для молярної теплоти розчинення ΔQ :

$$\Delta Q = C \frac{\Delta T_1}{\nu} = C \Delta T_1 \frac{\mu}{m}, \quad (13.1)$$

де μ – молярна маса солі, m – маса солі.

Опис установки

Теплота розчинення ΔQ в даній роботі визначається за допомогою калориметричної установки (рис. 20), що складається із скляної посудини 1, яка поміщена для теплоізоляції у внутрішній об'єм термостату типу ЛТЖ-0-03 2, який використовується в даній роботі як посудина Дьюара. Через отвір у кришці термостата в посудину вставлено ртутний термометр 3.

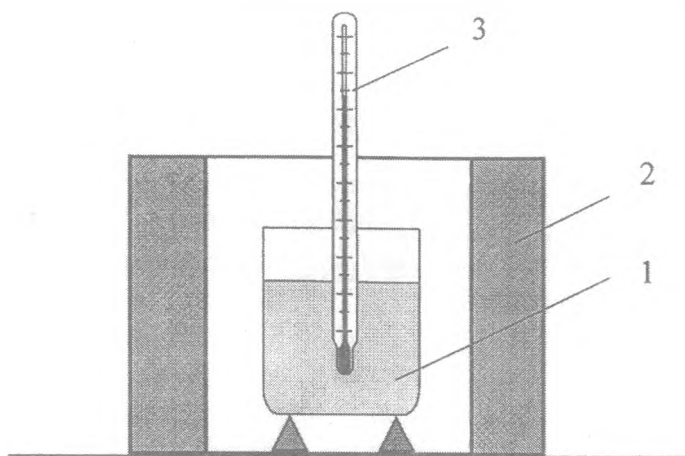


Рис.20. Калориметрична установка: 1 – скляна посудина з розчином; 2 – термостат; 3 – ртутний термометр.

Експериментальна робота складається з двох етапів.

Етап I. Підготувавши в посудині насичений розчин солі, відмічають збільшення (зменшення) температури під час і після розчинення до тих пір, поки температура не перестане збільшуватись (зменшуватись). Записують значення зміни температури ΔT_1 .

Для того, щоб визначити теплоту розчинення ΔQ за формулою (13.1), необхідно провести II етап дослідження для визначення теплоємності C калориметра з розчином.

Етап II. Посудину 1 з розчином ставлять на металевий диск 2 електричної плити 3 певної потужності N (рис. 21) Термометр 4 опускають у посудину з розчином 1 і

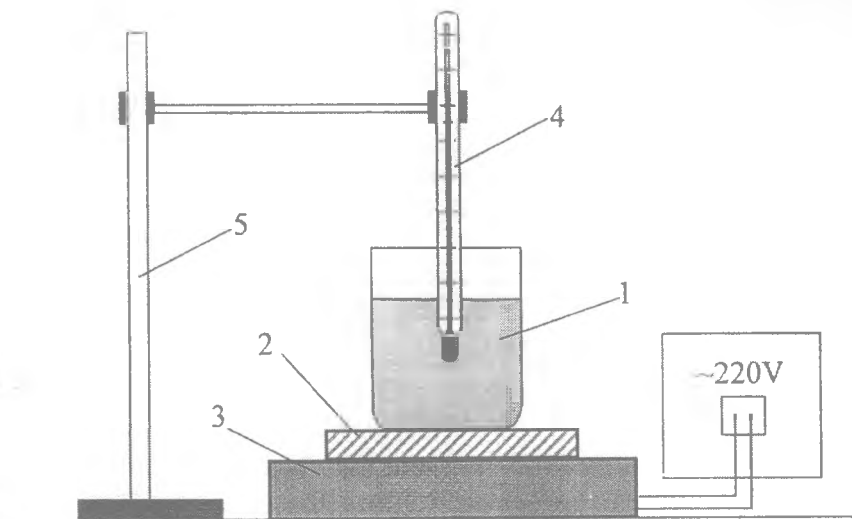


Рис. 21. Установка для визначення теплоємності системи: 1 – посудина з розчином; 2 – металевий диск; 3 – електрична плитця; 4 – термометр; 5 – штатив.

закріплюють у штативі 5. Розчин нагрівають на плитці 3 певний час Δt , а потім зберігають у термостаті до встановлення рівноваги. Записують значення зміни температури ΔT_2 .

На II етапі калориметр отримує кількість теплоти $\Delta q = C\Delta T_2$, звідки

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta T_2}.$$

Для електричного нагрівання $\Delta q = N\Delta t$, де Δt – час нагрівання. Звідси

$$C = \frac{N\Delta\tau}{\Delta T_2}. \quad (13.2)$$

Підставивши (13.2) в (13.1), отримуємо шукану формулу для розрахунків молярної теплоти розчинення ΔQ :

$$\Delta Q = N\Delta\tau \frac{\mu}{m} \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}. \quad (13.3)$$

На рис. 22 подано типовий графік часової залежності температури розчину солі, який має одержатись у результаті виконання роботи з солями, які знижують температуру розчину під час розчинення.

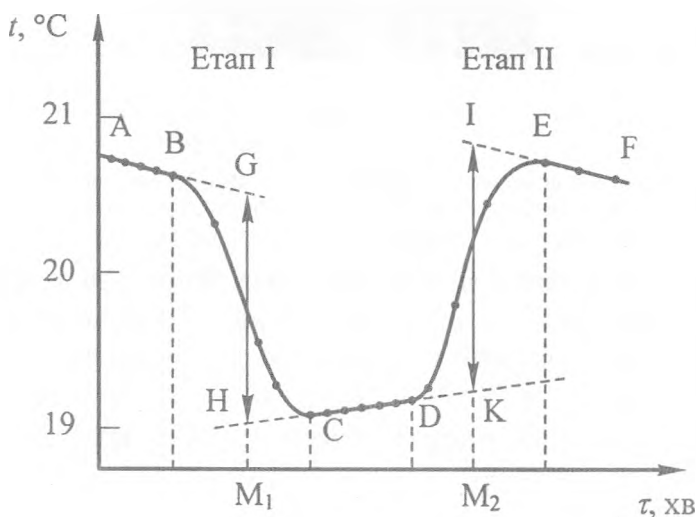


Рис. 22. Часова залежність температури калориметра: АВ – ділянка зміни температури води; ВС – зміна температури при розчиненні солі; CD – ділянка завершення процесу розчинення; DE – етап II розчинення.

Порядок виконання роботи

Етап I.

1. В скляну посудину налейте 250 мл дистильованої води, й помістіть її в термостат. Закрийте кришкою термостат і вставте термометра. Ввімкніть секундомір. Через кожну хвилину записуйте температуру води.

***Важливо:** Секундомір не вимикати до закінчення експерименту! Слід лише відмічати час, який минув від початку експерименту, і значення температури, що відповідає даному часу. Вимірювання часу провадять з точністю 5-10 сек.*

2. Якщо протягом 5 хвилин суттєвих температурних відхилень не спостерігається, то відкрийте кришку термостата і насипте в калориметр певну кількість солі. Для мідного купоросу вона становить 9 г, для карбонату натрію – 10 г. Швидко перемішайте розчин і закрийте кришку термостата. Температура розчину буде знижуватися. Слід записувати значення температури щохвилини, поки не встановиться якесь постійне значення температури або воно не почне підвищуватись. Підвищення температури свідчить про недостатню ізольованість системи.

Етап II.

3. Ввімкніть електричний нагрівач та прогрійте його протягом 2-3 хвилин. Вийміть посудину з розчином із термостату (рис. 20) та поставте її на нагрівач (рис. 21). Відмітьте точно на діючому секундомірі час початку нагрівання розчину. Опустіть у посудину термометр так, щоб він не торкався дна, і закріпіть його в цьому положенні за допомогою штативу.

Нагрівайте розчин протягом 5 хвилин ($\Delta\tau=5\text{хв.}$) Під час нагрівання розчин слід ретельно перемішувати.

4. Зніміть посудину з нагрівача (рис. 21) та помістіть її в термостат (рис. 20). Вставте термометр та записуйте значення температури, поки вона не почне знижуватися. Якщо зниження відбулося відразу, то достатньо зняти 2-3 значення з інтервалом у 1 хвилину, й припинити експеримент.
5. Дані експерименту занести в таблиці:

Таблиця 1. Експериментальні дані.

Етапи дослідів			
Етап I. Розчинення солі		Етап II. Нагрівання розчину	
t, °C	τ , хв	t, °C	τ , хв.

Таблиця 2. Вихідні дані.

Маса солі, г		Час нагрівання розчину, хв	
Маса води, г		Похибка термометра, К	
Молярна маса солі, г/моль		Похибка вимірювань маси солі, г	
Потужність нагрівника, Вт		Похибка вимірювання часу, с	

6. Побудуйте графік зміни температури з часом протягом експерименту $t=t(\tau)$. За графіком визначте зміну температури ΔT_1 та ΔT_2 так, як це показано на рис. 22.

Оскільки повністю ізолювати систему не вдається, то температура на стадіях АВ, CD та EF (рис. 22) все-таки змінюється, тому для врахування теплообміну слід екстраполювати відрізок АВ вправо, а CD – вліво. Проміжок часу ВС ділять навпіл, з точки M_1 проводять

перпендикуляр до осі часу. Відрізок НГ відповідатиме зміні температури ΔT_1 .

Аналогічно визначте зміну температури ΔT_2 (відрізок ІК).

7. За формулою (13.3) обрахуйте молярну теплоту розчинення солі ΔQ .
8. Визначте абсолютну та відносну похибку вимірювань.
9. Повторіть пункти 1-8 для другої солі.

Контрольні запитання

1. Чому розчинення солей викликає зміну температури розчину?
2. Від чого залежить тепловий ефект розчинення солі?
3. Що таке молярна теплота розчинення?
4. Суть методу експериментального визначення молярної теплоти розчинення.

Література

1. Гапчин Б. М., Дутчак Я. Й., Френчко В. С. Молекулярна фізика: Лабораторний практикум. – Львів: «Світ», 1990.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с. 515-522.
3. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 285-289.

14. Спостереження броунівського руху та визначення числа Авогадро

Мета роботи: спостереження молекулярно-кінетичної дії молекул та визначення числа Авогадро.

Прилади та матеріали: мікроскоп 400-800 кратного збільшення, плівка з ґраткою, предметні скельця, суспензії.

Теоретичні відомості.

Безпосереднім експериментальним наочним підтвердженням молекулярного руху та його залежності від температури є броунівський рух.

У 1827 р. англійський ботанік Р. Броун спостерігав у мікроскоп безладні неперервні рухи дрібних частинок (спори папороті, що зависли у воді), які не затухають з часом. Інтенсивність броунівського руху зростає з підвищенням температури рідини і зменшенням її в'язкості, а також зі зменшенням діаметра частинки. Дві частинки рухаються в тій самій рідині однаково, якщо форма і розміри їх однакові. Цей рух не залежить ні від густини, ні від природи речовини частинок.

Спочатку це явище пов'язувалось з життєвими процесами, але вже сам Броун встановив, що воно властиве частинкам, що мають як органічне, так і неорганічне походження. Це вказує на те, що броунівський рух є проявом теплового руху молекул. Броунівський рух – самодовільний. Він існує не потребуючи ніяких зовнішніх двигунів, і тому вічний. Важко підшукати більш виразний приклад незнищуваності, вічності руху. Броунівський рух зумовлений поштовхами, яких зазнають завислі частинки з боку оточуючих молекул, що перебувають у тепловому русі. Оскільки поштовхи ніколи не зрівноважуються, то завислі

частинки здійснюють рухи по складних ламаних лініях (рис. 23). Броунівський рух є рухом хаотичним.

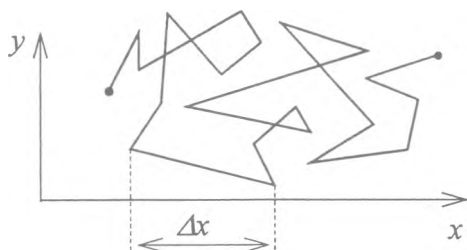


Рис. 23. Зміщення броунівської частинки.

Незважаючи на випадковий характер величини і напрямку сили, що діє на броунівську частинку, хаотичному броунівському руху притаманна певна закономірність, що виража-

ється законом Ейнштейна: якщо спостерігати положення частинки через певні проміжки часу, то *середньоквадратичне зміщення броунівської частинки пропорційне часові, за який відбувається це зміщення*; при цьому коефіцієнт пропорційності залежить від абсолютної температури, в'язкості рідини, радіуса частинки, величин газової постійної R та числа Авогадро N_A .

Отримаємо формулу, що описує цю залежність. Розглянемо проекцію зміщення цієї частинки на довільний напрямок x . Рівняння руху частинки на цьому напрямку, згідно з другим законом Ньютона, буде мати вигляд:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = F_1 + F_2, \quad (14.1)$$

де m - маса частинки, F_1 - проекція на вісь x результуючої сили від ударів молекул, що перебувають у тепловому русі, F_2 - проекція на цей же напрямок сили опору середовища, обумовленої в'язкістю рідини. За законом Стокса:

$$F_2 = -6\pi\eta \left(\frac{dx}{dt} \right),$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини, r – радіус частинки. Знак $-$ означає, що сила F_2 спрямована проти напрямку руху частинки.

Введемо позначення $b = 6\pi r \eta$ і підставимо значення F_2 в (14.1):

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = F_1 - b \left(\frac{dx}{dt} \right), \quad (14.2)$$

Помноживши рівність (14.2) на x , одержимо:

$$mx \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = F_1 x - bx \left(\frac{dx}{dt} \right). \quad (14.3)$$

Враховуючи тотожності

$$x \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2 x^2}{dt^2} - \left(\frac{dx}{dt} \right)^2, \quad x \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dx^2}{dt}$$

і підставляючи їх в (14.3), одержимо:

$$\frac{m}{2} \frac{d^2 x^2}{dt^2} - m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = F_1 x - \frac{1}{2} b \frac{dx^2}{dt}. \quad (14.4)$$

Сила F_1 змінюється як за величиною, так і за напрямом, тому запишемо рівняння руху частинки через середні характеристики цього руху: $\langle x^2 \rangle$, $\left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle$, $\langle F_1 x \rangle$.

Середні значення цих величин, які характеризують рух даної частинки, можна знайти, якщо n разів (n – велике число разів) виміряти відповідні величини однієї і тієї ж частинки через рівні інтервали часу.

При усередненні формули (14.4) враховуємо, що $\langle F_1 \rangle = 0$, $\langle x \rangle = 0$, $\langle F_1 x \rangle = 0$, тому що знаки проєкції сили (а також зміщення) в довільний момент часу рівномірні. З рівностей $\langle F_1 \rangle = 0$, $\langle x \rangle = 0$ ще не випливає, що $\langle F_1 x \rangle = 0$. Однак, якщо при цьому F_1 і x – незалежні випадкові величини, то $\langle F_1 \rangle = 0$. В результаті розглянутого усереднення формула (14.4) матиме вигляд:

$$\frac{m}{2} \frac{dl}{dt} - m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = -\frac{bl}{2}, \quad (14.5)$$

де $l = \frac{d \langle x^2 \rangle}{dt}$.

Другий член лівої частини рівності (14.5) дорівнює подвоєному значенню середньої кінетичної енергії, що припадає на одну ступінь вільності броунівської частинки, тобто при

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{1}{2} kT, \text{ де } k = \frac{R}{N_A},$$

$$m \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \frac{RT}{N_A}, \quad (14.6)$$

де T – абсолютна температура середовища, k – стала Больцмана, R – універсальна газова стала, N_A – число Авогадро.

Підставляючи (14.6) в (14.5), отримуємо:

$$\frac{m}{2} \frac{dl}{dt} - \frac{RT}{N} = -\frac{bl}{2}, \quad (14.7)$$

звідки:

$$\frac{dl}{\left(l - \frac{2RT}{N_A b}\right)} = -\frac{bdt}{m}.$$

Інтегруючи це рівняння в межах від 0 до t , одержимо:

$$l - \frac{2RT}{bN_A} = C e^{-\frac{b}{m}t}, \quad (14.8)$$

де C – стала інтегрування.

Якщо час послідовного фіксування частинки досить великий ($t \gg \frac{m}{b}$), то можна знехтувати членом, що стоїть в правій частині рівняння (14.8). Тоді:

$$l = \frac{2RT}{bN}, \quad (14.9)$$

або :

$$\frac{d\langle x^2 \rangle}{dt} = \frac{RT}{3\pi r \eta N_A}. \quad (14.10)$$

Інтегруючи рівняння (14.10) (стала інтегрування рівна нулеві, бо при $t = 0$ значення $\langle x \rangle = 0$), одержимо вираз для середнього квадратичного зміщення броунівської частинки:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{RTt}{3\pi r\eta N}, \quad (14.11)$$

Звідки значення числа Авогадро буде рівним:

$$N_A = \frac{RTt}{3\pi r\eta \langle x^2 \rangle}. \quad (14.12)$$

Таким чином, знаючи радіус броунівської частинки r , а також середнє значення квадрата зміщення за відповідний інтервал часу t , за формулою (14.12) можна обчислити число Авогадро N_A .

Порядок виконання роботи.

1. На старанно протерте предметне скло нанесіть 1 – 2 краплі води і накладіть прозору плівку з дифракційною ґраткою з шириною смуг приблизно 16 мкм (спосіб отримання термоплівки, на яку “записана” голограма дифракційної ґратки розглядатиметься в оптичному практикумі). Ширина смуг буде вказана під час виконання роботи. Зверху на плівку наносять краплю суспензії і накривають покривним склом. Предметне скло з препаратом покладіть на столик мікроскопа перед об’єктивом і освітіть його за допомогою дзеркала мікроскопа. Сфокусуйте об’єктив так, щоб були чітко видні броунівські частинки.
2. Вибравши для дослідів певну частинку, відмітьте початкове положення її відносно прямих ліній ґратки і вибравши за вісь x уявну пряму, перпендикулярну лініям ґратки, оцінюйте величину проекції зміщення відносно осі x кожні 30 с за допомогою секундоміра. Подібні спостереження можна проводити за різними, але однаковими за розмірами частинками, знаходячи

$\langle x^2 \rangle$. Для визначення діаметра частинки оцініть, яку долю поділки займає частинка. Температура препарату дорівнює кімнатній і визначається термометром з ціною поділки 0,5 К. Коефіцієнт внутрішнього тертя знайдіть із таблиць.

3. За формулою (14.12) розрахуйте число Авогадро N_A .
4. Оцініть абсолютну та відносну похибки визначення числа Авогадро N_A , вважаючи абсолютні похибки визначення r і $\langle x^2 \rangle$ однаковими і рівними 5 мкм.
5. Оцініть величину m/b , вважаючи, що радіус броунівської частинки $r = 0,01$ мм, а густина речовини, з якої виготовлена суспензія, рівна густині води (насправді густина цієї речовини трохи більша за густину води).

Примітка. Слід мати на увазі, що отримані результати можуть значно відрізнятися від істинних. Це зумовлене тим, що при притисканні скельцями суспензії, створюється течія, і рух частинок зумовлюється не поштовхами молекул, а течією. Тому значення числа Авогадро, отримане експериментально, може відрізнятися від істинного на порядок. Великі похибки можуть бути пов'язані також з вимірюванням радіуса частинки і проекції довжини шляху, який проходить ця частинка. У даній роботі для спостереження броунівського руху бажано використовувати тверді, зважені у рідині частинки (при використанні жирних речовин похибка може збільшуватись).

При визначенні величини $\langle x^2 \rangle$ намагайтесь більш уважно спостерігати за рухом частинки. Бажано виконати велику кількість вимірів цієї величини, щоб зменшити похибку. Крім того, суспензія може

нагріватись при освітленні її лампою, тому температуру потрібно вимірювати безпосередньо біля суспензії.

Контрольні запитання

1. Що є причиною броунівського руху?
2. Запишіть рівняння руху броунівської частинки.
3. Що таке число Авогадро? Виведіть робочу формулу для визначення числа Авогадро N_A в даній лабораторній роботі.
4. Як зміниться рух броунівської частинки при: а) зміні її розміру і сталій масі; б) зміні маси і незмінному розмірі частинки?
5. Розкажіть про досліди Перрена по визначенню числа Авогадро.
6. В яких фізичних законах фігурує число Авогадро?
7. Що швидше рухається: молекули чи броунівські частинки? Чим це пояснити?

Література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: «Наука», 1990, с. 220-226.
2. Матвеев Ф.Н. Молекулярная физика. – М.: «Высшая школа», 1981, с. 110-115.
3. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. Ивероновой В.И. – М.: «ГИТТЛ», 1955, с. 177-184.
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальна фізика. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: «Техніка», 1999, с. 296-317, 337-339.

Найважливіші фізичні сталі.

Назва величини	Символ	Числове значення	Назва одиниці	Відомих значимих цифр
Швидкість світла у вакуумі	c	$2,99 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	9
Стала Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$	7
Елементарний електричний заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$	Кл	8
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$	4
Маса спокою електрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$	Кг	7
Електрична стала вакууму	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$	8
Магнітна стала вакууму	μ_0	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$	8
Стала Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$	Моль^{-1}	7
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$	7
Молярна газова стала	R	8,31	$\text{Дж/моль} \cdot \text{К}$	6
Об'єм моля ідеального газу при нормальних умовах	V_m	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$	7
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,76 \cdot 10^{11}$	$\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$	7
Магнетон Бора	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24}$	$\text{Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	5
Стала Стеффана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$	6
Стала Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4$	$\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$	7
Нормальний атмосферний тиск	p_0	$1,01 \cdot 10^5$	Па	6

**Одиниці теплових величин і величин
молекулярної фізики.**

Величина		Одиниця	
Назва	Позна-чення	Назва	Позна-чення
Термодинамічна (абсолютна) температура	T	кельвін	К
Температура Цельсія	t	градус Цельсія	$^{\circ}\text{C}$
Температурний коефіцієнт лінійного розширення	α, λ	кельвін в мінус першому степені	K^{-1}
Температурний коефіцієнт об'ємного розширення	α, β, γ		
Температурний коефіцієнт тиску	β		
Кількість теплоти	Q	джоуль	Дж
Внутрішня енергія	U, E		
Ентальпія	H		
Вільна енергія	F, A		
Теплоємність системи	C	джоуль на кельвін	Дж/К
Питома теплоємність	c	джоуль на кілограм-кельвін	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Молярна теплоємність при сталому об'ємі	C_V	джоуль на моль-кельвін	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$
Молярна теплоємність при сталому тиску	C_P		
Ентропія системи	S	джоуль на кельвін	Дж/К
Теплопровідність	λ, k	ват на метр-кельвін	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$

Величина		Одиниця	
Назва	Позначення	Назва	Позначення
Коефіцієнт теплопередачі	K	ват на квадратний метр-кельвін	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Теплота фазового перетворення	L	джоуль	Дж
Питома теплота фазового перетворення	l, r	джоуль на кілограм	Дж/кг
Коефіцієнт дифузії	D	квадратний метр на секунду	$\text{м}^2/\text{с}$
Поверхневий натяг	σ	ньютон на метр	Н/м
Модуль повздовжньої пружності (Модуль Юнга)	E	паскаль	Па
Кількість речовини	n, ν	моль	моль
Молярна маса	M	кілограм на моль	кг/моль
Стала Авогадро	N_A	моль у мінус першому степені	моль^{-1}
Молярний об'єм	V_m	кубічний метр на моль	$\text{м}^3/\text{моль}$
Молярна газова стала (універсальна газова стала)	R	джоуль на моль-кельвін	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Стала Больцмана	k	джоуль на кельвін	Дж/К
Стала Фарадея	F	кулон на моль	Кл/моль

Передмова	3
Лабораторні роботи	6
✓1. Визначення відношення теплоємностей газу $\gamma = C_p/C_v$ за методом Клемана-Дезорма	6
✓2. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя та середньої довжини вільного пробігу молекул повітря	13
✓3. Вимірювання відносної вологості повітря	17
✓4. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом відриву краплі	23
✓5. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин капілярним методом	31
✓6. Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса.	37
✓7. Дослідження температурної та концентраційної залежності коефіцієнта внутрішнього тертя рідин за допомогою капілярного віскозиметра	45
8. Визначення питомої теплоти плавлення та розрахунок зміни ентропії льоду	55
✓9. Визначення ізохорного температурного (термічного) коефіцієнта тиску повітря	64
10. Визначення сталої Больцмана k	70
11. Визначення механічного еквівалента теплоти	75
12. Визначення густини рідин методом пікнометра	80
13. Визначення теплоти розчинення солі	88
✓14. Спостереження броунівського руху та визначення числа Авогадро	96
Додаток	104

ПРАКТИКУМ З МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

Навчальний посібник

Підписано до друку 10.06.2003. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$.
Гарнітура «Times». Папір офсетний № 1. Друк офсетний.
Умов. друк. арк. 6,28. Наклад 100 прим.
Зам. 3-80.

Друкарня НаУКМА.

04070, Київ, вул. Сковороди, 2.

Тел./факс: (044) 416-60-92. 38-48-26

E-mail: vd_naukma@ukr.net

Державна бібліотека
Університету
"Києво-Могилянська
академія"