

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання **лабораторних робіт**

з розділу **«Молекулярна фізика»**

з навчальних дисциплін

«ФІЗИКА», «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей)*

Методичні рекомендації до виконання **лабораторних** робіт з розділу **«Молекулярна фізика»** з навчальних дисциплін **«Фізика»**, **«Загальна фізика»** (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел, О. М. Петченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 53 с.

Укладачі : канд. фіз.-мат. наук, доц. Г. Я. Дульфан,
канд. фіз.-мат. наук, доц. Є. І. Назаренко,
канд. фіз.-мат. наук, доц. Є. С. Орел,
д-р фіз.-мат. наук, проф. О. М. Петченко

Рецензент :

Безуглий А. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою фізики, протокол № 2 від 28 вересня 2021 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 16 Визначення термічного коефіцієнта тиску повітря за допомогою газового термометра.....	5
Лабораторна робота № 17 Визначення коефіцієнта дифузії повітря.....	9
Лабораторна робота № 18 Визначення довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря через вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя	16
Лабораторна робота № 19 Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини.....	23
Лабораторна робота № 20 Визначення показника адіабати газів γ	28
Лабораторна робота № 21 Визначення приросту ентропії при плавленні олова.....	35
Лабораторна робота № 22 Визначення зміни ентропії в реальних системах	38
Лабораторна робота № 23 Дослідження явища поверхневого натягу рідини	41
Лабораторна робота № 24 Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини і вивчення його залежності від температури методом максимального тиску в пухирці	47
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

У цих рекомендаціях наведено опис лабораторних робіт, що виконуються студентами 1 курсу всіх спеціальностей у лабораторії «Молекулярна фізика» Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. У них міститься необхідна інформація щодо підготовки, виконання та звітності про лабораторну роботу.

На відміну від механіки, що вивчає рух тіл під дією сил, молекулярна фізика вивчає будову й властивості речовини, виходячи з молекулярно-кінетичних уявлень. Згідно з цими уявленнями будь-яка речовина складається з великої кількості мікроскопічних частинок (молекул, атомів), що знаходяться у хаотичному неперервному русі. Вказана теорія описує ті властивості тіл, що проявляються в дослідах (тиск, температура, об'єм) як результат дії молекул. При цьому використовується статистичний метод, тобто вивчається поведінка не окремої молекули, а їх великої сукупності. Вивченням різних властивостей і змін стану речовини займається також термодинаміка, яка, не розглядаючи мікроскопічні процеси, дає висновки відносно їх протікання. Статистична фізика і термодинаміка взаємно доповнюють одна одну, утворюючи одне ціле.

Головною метою цих рекомендацій є намір не тільки всебічно проілюструвати фізичні явища і закони, але й навчити студента їх спостерігати й перевіряти дослідним шляхом. Вони мають сприяти оволодінню технікою фізичного експерименту, отриманню навичок самостійної дослідницької роботи і виробленню вмінь застосовувати теоретичні знання для аналізу й розв'язання в майбутньому конкретних інженерних задач.

У цих методичних рекомендаціях представлені різні варіанти вимірювань однієї і тієї ж величини, завдяки чому студент отримує уявлення про розмаїття методів фізичних досліджень.

У кожній лабораторній роботі подається короткий виклад понять, законів, явищ та фізичної основи використаного методу. При цьому передбачається самостійне вивчення підручника, оскільки лабораторна робота може виконуватися студентом ще до прочитання відповідної лекції. Особлива увага приділяється безпосереднім вимірюванням та обробці результатів. Щоб правильно оцінити їх надійність і точність, необхідно мати чітке уявлення про розмірність досліджуваної величини, знати правила користування основними обчислювальними і вимірювальними приладами, а також основи теорії похибок. При підготовці до лабораторної роботи студент повинен вивчити ці методичні рекомендації, а також відповідні теоретичні положення, користуючись навчальним посібником й конспектом лекцій, посилення на які можна знайти у списку джерел.

Методичні рекомендації узагальнюють надбання співробітників кафедри фізики ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, які протягом багатьох років робили певний внесок у створення лабораторного практикуму, що відповідає в повному обсязі програмі курсу фізики для технічних вузів. Вони написані з урахуванням досвіду методичного забезпечення лабораторного практикуму у вищих навчальних закладах України.

Лабораторна робота № 16

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТИСКУ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ГАЗОВОГО ТЕРМОМЕТРА

Мета роботи: вивчити закони для ідеальних газів; перевірити закон Шарля.

Обладнання

- 1 Газовий термометр.
- 2 Нагрівач.
- 3 Термометр кімнатний.
- 4 Барометр.

Загальні положення

Ідеальний газ – це модель газу: його молекули не взаємодіють між собою і мають розміри, якими можна знехтувати. При зіткненнях молекули ідеального газу поведуть себе як абсолютно пружні кулі з діаметром σ (*ефективний діаметр молекули*), який залежить від хімічної природи газу.

У реальних газах взаємодія між молекулами має такий характер: на відстанях порядку розміру молекули ($\sim 10^{-10}$ м) це дуже сильне відштовхування, яке при збільшенні відстані змінюється швидко спадаючим притяганням. На відстанях $\sim 10^{-9}$ м молекули практично не взаємодіють. Отже, реальні гази при малій густині можуть вважатися ідеальними.

Стан ідеального газу довільної маси m описується *рівнянням Менделєєва – Клапейрона*

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

де μ – молярна маса газу; R – універсальна газова стала; P , V , T – тиск, об'єм і температура газу, відповідно.

Розглянемо це рівняння для 1 моля газу. Вважаючи тиск постійним, беремо диференціали від обох частин:

$$P dV = R dT.$$

Але $P dV = dA$ – це робота газу при збільшенні об'єму на dV . Отже, універсальна газова стала R чисельно дорівнює роботі при ізобаричному розширенні 1 моля газу внаслідок його нагрівання на 1 К. В одиницях СІ $R = 8,31$ Дж/моль·К.

Для ідеальних газів діють такі закони:

1 *Закон Бойля – Маріотта*: при $T = \text{const}$ (ізотермічний процес) і $m = \text{const}$ добуток значень тиску й об'єму газу є сталою величиною:

$$PV = \text{const}.$$

2 Закон Гей-Люссака: при $P = const$ (ізобарний процес) об'єм даної маси газу прямо пропорційний його абсолютній температурі:

$$V = V_0 \frac{T}{T_0} = V_0 \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) = V_0 (1 + \alpha_V t),$$

де V_0 – об'єм газу при температурі $T_0 = 273,15 \text{ K}$, t – температура за шкалою Цельсія, $\alpha_V = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1}$ – термічний коефіцієнт об'ємного розширення, який вважається однаковим для всіх ідеальних газів.

3 Закон Шарля: при $V = const$ (ізохорний процес) тиск даної маси газу прямо пропорційний абсолютній температурі:

$$P = P_0 \frac{T}{T_0} = P_0 \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) = P_0 (1 + \alpha_P t),$$

де P_0 – тиск газу при температурі $T_0 = 273,15 \text{ K}$; $\alpha_P = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1}$ – термічний коефіцієнт тиску.

4 Закон Авогадро: при однакових тисках і температурах в рівних об'ємах довільного газу міститься однакова кількість молекул.

Опис установки і виведення розрахункової формули

Газовий термометр, схематично зображений на рисунку 16.1, містить скляний балон 1, наповнений сухим газом (повітрям, азотом, воднем і т.п.), з'єднаний з одним коліном ртутного манометра. Інше коліно 2 манометра здатне пересуватись за допомогою повзунка вздовж дзеркальної шкали. Коліно манометра, яке з'єднане з балоном 1, має у своїй верхній частині позначку 3, до якої необхідно підводити ртуть у коліні, щоб об'єм газу при вимірюванні залишався незмінним.

Тиск газу в балоні дорівнює

$$P = P_{атм} + h \delta g, \quad (16.1)$$

де $P_{атм}$ – атмосферний тиск; h – різниця рівнів ртуті; δ – густина ртуті; g – прискорення сили тяжіння.

Повітря в балоні нагрівають водяною парою. Воду, налиту в посудину, доводять до кипіння, а пара, піднімаючись, омиває балон 1 з повітрям. Таким чином, газ у балоні 1 через $10 \div 15$ хвилин приймає температуру пари киплячої води (100°C).

Якщо газ при $V = const$ нагрівається від температури t_1 до температури t_2 , то його тиск збільшується від P_1 до P_2 . Залежність між тиском і температурою для ідеального газу встановлюється рівнянням

$$\frac{P_1}{1 + \alpha_P t_1} = \frac{P_2}{1 + \alpha_P t_2}. \quad (16.2)$$

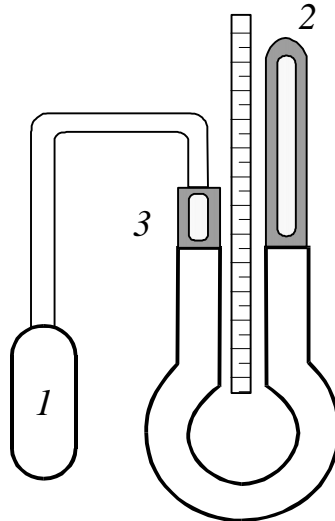


Рисунок 16.1 – Газовий термометр

Розв'язуючи рівняння (16.2) відносно α_P , одержимо

$$\alpha_P = \frac{P_2 - P_1}{P_1 t_2 - P_2 t_1}. \quad (16.3)$$

У формулі (16.3) не враховано розширення стінок балона при нагріванні. Тому не змінюється об'єм балона, в якому міститься досліджуваний газ. Урахування зміни об'єму балона при нагріванні дає більш точну формулу:

$$\alpha_P = \frac{P_2 - P_1}{P_1 t_2 - P_2 t_1} + 3 \xi \frac{P_2 t_2 - P_1 t_1}{P_1 t_2 - P_2 t_1}, \quad (16.3)$$

де 3ξ – коефіцієнт об'ємного розширення скла, що дорівнює $2,5 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Порядок виконання роботи

1 Переміщуючи праве коліно манометра, встановити рівень ртуті на рівень позначки 3. Провести підрахунок h з точністю до 0,5 МПа.

2 Розмістити балон 1 у нагрівачі. У процесі нагрівання підтримувати рівень ртуті в лівому коліні в початковому положенні. Коли газ прийме

температуру t_2 (температура пари киплячої води), виконати заміри показань манометра h_2 .

3 Вимкнути нагрівач і, пересуваючи вниз правий повзунок, опустити праве коліно манометра для того, щоб при охолодженні газу ртуть не засмоктало в балон.

4 Виміряти барометром атмосферний тиск $P_{атм}$.

5 Визначити початковий P_1 і кінцевий P_2 тиск газу за формулою (16.1) і обчислити величину α_P згідно з формулою (16.3).

6 Визначити абсолютну й відносну похибку визначення $\Delta\alpha_P$, вважаючи що $\alpha = f(P_{атм}, h_1, h_2, t_1, t_2)$. Результати записати в таблицю 16.1.

Таблиця 16.1 – Таблиця для даних

№ досл.	T_1 , $^{\circ}C$	h_1 , см	t_2 , $^{\circ}C$	h_2 , см	P_1 , кПа	P_2 , кПа	α_P , K^{-1}	$\Delta\alpha_P$, K^{-1}
1								
2								

Контрольні запитання

1 Що називається термічним коефіцієнтом тиску? Які одиниці його вимірювання в СІ?

2 Як дізнатися, що повітря в балоні нагрівають до температури кипіння води?

3 Чи є один газ кращим, ніж інший, для побудови газового термометра?

4 Чому не використовуються водяні термометри?

Лабораторна робота № 17

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ПОВІТРЯ

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя повітря, користуючись віскозиметром; обчислити коефіцієнт дифузії повітря.

Обладнання

- 1 Посудина з краном-крапельницею та капіляром.
- 2 Секундомір.
- 3 Мірна склянка.
- 4 Барометр.
- 5 Термометр.

Загальні положення

Якщо існує просторова неоднорідність густини, температури газу (рідини) або швидкості руху окремих його шарів, то виникає впорядкований перенос відповідно маси (*дифузія*), внутрішньої енергії (*теплопровідність*) і імпульсу (*внутрішнє тертя*). Ця група процесів об'єднується назвою *явища переносу*.

У результаті зіткнень між молекулами газу (рідини) відбуваються безперервні зміни їх швидкостей і енергій. Отже, тепловий рух є хаотичним. Якщо виділити напрямок вздовж осі x й обрати перпендикулярно до нього поверхню ΔS , то в разі відсутності неоднорідностей через неї вздовж і протилежно осі x проходитиме в середньому одна й та сама кількість молекул, які будуть переносити в середньому однакову енергію і імпульс. Ця *динамічна рівновага* буде зберігатися доти, доки зовнішнє втручання в систему не призведе до втрати однорідності.

Розглянемо найпростіший випадок, коли величини змінюються тільки вздовж одного напрямку x . Оберемо дві однакові перпендикулярні до x поверхні ΔS_1 і ΔS_2 , розташовані на відстані Δx одна від одної. Будемо вважати, що зліва від ΔS_1 величини більші, ніж справа від ΔS_2 (рисунок 17.1). Тепер можемо переходити до виведення дуже схожих між собою рівнянь для явищ переносу.

Дифузія – процес вирівнювання густини молекул газу (рідини) або встановлення рівноважного розподілу концентрацій.

Кількість молекул, які пройдуть через поверхню ΔS_1 у напрямку x , буде тим більша, чим більший час спостереження Δt , кількість молекул в одиниці об'єму n зліва від неї, а також площа цієї поверхні. Ці міркування справедливі й щодо кількості молекул, які пройдуть через поверхню ΔS_2 протилежно x . Але не всі молекули, що покидають ΔS_1 , встигнуть за час Δt досягти ΔS_2 . Припустимо, середня швидкість молекул в напрямку x дорівнює V .

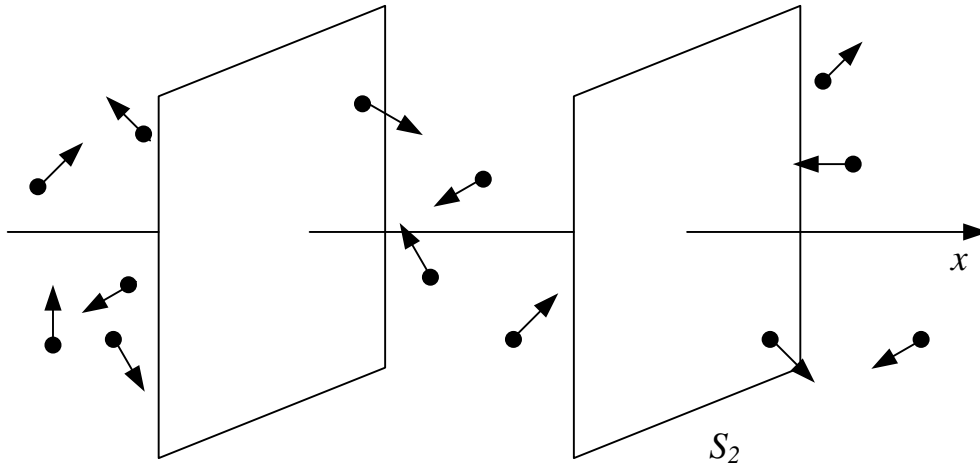


Рисунок 17.1 – Величини змінюються тільки вздовж одного напрямку x

Тоді молекула проходить відстань Δx в середньому за час $t = \frac{\Delta x}{V}$, а за час Δt цю відстань пройдуть $\frac{\Delta t}{t}$ молекул. Тепер можемо обчислити, наскільки більше маси було перенесено в область справа від ΔS_2 , ніж в область зліва від ΔS_1 :

$$\Delta m = k m_0 V ((n + \Delta n) - n) \frac{\Delta t}{\Delta x} \Delta S = k m_0 V \frac{\Delta n}{\Delta x} \Delta t \Delta S, \quad (17.1)$$

де m_0 – маса однієї молекули, k – коефіцієнт, що залежить тільки від властивостей газу чи рідини.

Густина потоку молекул j при дифузії – це кількість молекул, що проходять через одиницю поверхні за одиницю часу. Цю величину легко отримати з рівняння (17.1), якщо перейти в ньому до похідних і поділити обидві частини на m_0 :

$$j = -D \frac{dn}{dx}, \quad (17.2)$$

де мінус з'являється врахування напрямку зміни концентрації, D – коефіцієнт дифузії. Рівняння (17.2) називається *законом Фіка*.

При виведенні (17.2) ми бачили, що коефіцієнт дифузії пропорційний середній швидкості вздовж деякого напрямку. Згадаємо тепер, що молекули в рідині або газі постійно стикаються між собою, при цьому напрямки і величини швидкостей суттєво змінюються. Середня довжина, яку проходять молекули між послідовними зіткненнями, називається *середньою довжиною вільного пробігу* λ . Зрозуміло, що чим частіше стикаються молекули, тим повільніше буде йти процес дифузії. Отже, коефіцієнт дифузії має бути тим більшим, чим більше λ . У кінетичній теорії газів отримана формула

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}, \quad (17.3)$$

де \bar{v} – середня арифметична швидкість молекул речовини.

Явище теплопровідності полягає в переносі деякої кількості тепла ΔQ від більш гарячого шару до більш холодного.

Як відомо, температура газу (рідини) прямо пропорційна квадрату середньої швидкості його молекул, тобто їх середній кінетичній енергії. Знову скористаємося рисунком 17.1. Молекули з області зліва від ΔS_1 , яка є більш нагрітою, переходять в область справа від ΔS_2 . Будемо вважати, що не відбувається впорядкований рух молекул (тобто обидві поверхні в середньому перетинає однакова кількість молекул). Тоді кількість тепла, перенесена з більш нагрітої області до менш нагрітої за час Δt , дорівнює різниці перенесеної кінетичної енергії, яка, в свою чергу, дорівнює різниці температур. Отже,

$$\Delta Q = K \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t,$$

де K – коефіцієнт теплопровідності. Диференціальна форма цього рівняння

$$q = -K \frac{dT}{dx}, \quad (17.4)$$

де q – питомий тепловий потік, кількість теплоти, що передається через перпендикулярну X одиничну плоску поверхню за одиницю часу. Рівняння (17.4) називається *законом Фур'є*.

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією коефіцієнт теплопровідності

$$K = \frac{1}{3} \rho c_V \bar{v} \lambda, \quad (17.5)$$

де c_V – питома теплоємність газу (рідини) при постійному об'ємі, ρ – густина.

Внутрішнє тертя виникає між двома шарами газу або рідини, що переміщуються паралельно один одному з різними за величиною швидкостями. Причиною внутрішнього тертя є перенос молекулами кількості руху від одного шару газу або рідини до іншого.

Припустимо, що шар газу (рідини) A рухається зі швидкістю \vec{v}_1 , а шар B – зі швидкістю \vec{v}_2 . Молекули постійно переходять з одного шару до іншого в середньому в однаковій кількості. Зміна імпульсу шару A буде такою:

$$\Delta \vec{p} = \Delta m (\vec{v}_2 - \vec{v}_1),$$

де Δm – маса молекул, що перейшли з одного шару до іншого за час Δt . Згідно з другим законом Ньютона

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}.$$

Повторюючи міркування, які ми робили для явищ дифузії та теплопровідності, отримаємо формулу

$$\vec{F} = \eta \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x} \Delta S, \quad (17.6)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя. Відповідно до кінетичної теорії,

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda \bar{v}. \quad (17.7)$$

Отже, дія сил внутрішнього тертя проявляється у зменшенні відносної швидкості шарів, тобто той з них, що рухався повільніше, прискорюється, а більш швидкий уповільнюється. До того ж сумарний імпульс нашої системи весь час зменшується, бо зростає енергія хаотичного руху молекул, тобто, як відомо, тертя призводить до нагрівання.

У диференціальній формі формула (17.6) має вигляд (знову врахування напрямку зміни величини, в цьому випадку швидкості, дає знак «мінус»):

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (17.8)$$

де τ – сила, що діє на одиницю площі. Ця величина називається *напруженістю тертя*, а закон (17.8) є *законом Ньютона* для явища внутрішнього тертя.

Опис установки і виведення розрахункових формул

Пуазейль, вивчаючи ламінарну течію в'язкої рідини в капілярі з радіусом r і довжиною l , одержав формулу

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 \eta l}, \quad (17.9)$$

де V – об'єм рідини, що протікає крізь переріз капіляра за час τ , η – коефіцієнт в'язкості; ΔP – різниця значень тиску на кінцях капіляра.

Формулу (17.9) можна застосувати для газів, якщо не брати до уваги їх стисливість. Це припустимо лише при невеликих значеннях ΔP . У даній роботі

ця умова виконується, тому за допомогою формули (17.9) можна визначити коефіцієнт в'язкості η повітря:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 V l}. \quad (17.10)$$

Усі величини, що стоять у правій частині формули (17.10), можна визначити шляхом прямих вимірювань. Тому ця формула є зручною для експериментального визначення коефіцієнта внутрішнього тертя газу.

Кінетична теорія газів встановлює зв'язок між коефіцієнтами внутрішнього тертя газів η , дифузії D і теплопровідності K (порівняйте формули (17.3), (17.5) і (17.7)):

$$D = \frac{\eta}{\rho}, \quad K = \eta C_V = D C_V \rho. \quad (17.11)$$

Установка даної лабораторної роботи розташована на платформі 1, в яку вмонтовано штатив 2 з кронштейнами 3 (рисунок 17.2). Кронштейни 3 тримають віскозиметр, який складається з капіляра 4 і мірної посудини 5 зі шкалою 6 і краном 7. Посудина 5 закрита корком, в якому закріплений капіляр 4. При витіканні рідини з мірної посудини 5 тиск над рідиною зменшується і крізь капіляр 4 у посудину починає надходити повітря. При малих швидкостях надходження повітря в тонкому капілярі встановлюється його ламінарна течія. На платформі 1 знаходяться мензурка 8 і металева склянка 9.

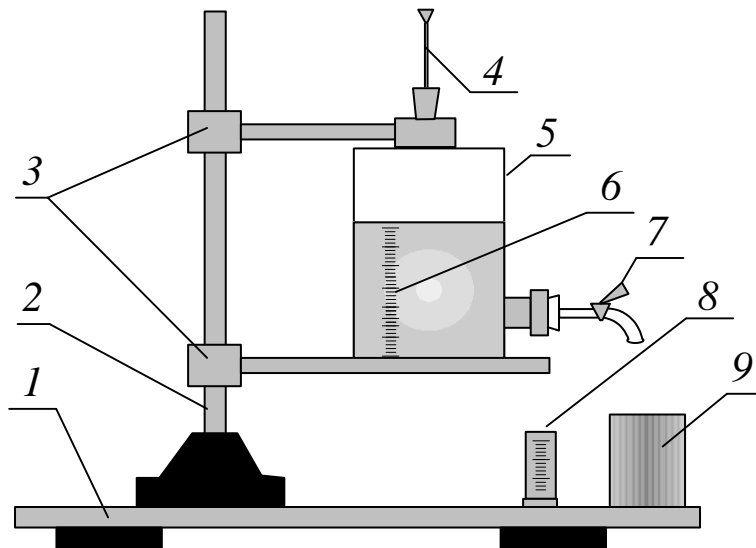


Рисунок 17.2 – Установка до лабораторної роботи № 17

При закритому крані 7 (рисунок 17.2) тиск повітря над рідиною в посудині 5 дорівнює атмосферному. При відкриванні крану рідина спочатку буде витікати неперервним струменем, а потім – краплями. Такий стан рідини

має місце, якщо сумарний тиск повітря P і стовпа рідини $\rho_0 g h$ всередині посудини дорівнюють атмосферному тиску $P_{атм}$, тобто

$$P + \rho_0 g h = P_{атм},$$

де h – висота стовпа рідини в даний момент часу; ρ_0 – густина рідини при даній температурі; g – прискорення сили тяжіння. Тоді ΔP – різниця тисків, яка спричиняє протікання повітря крізь капіляр у посудину, є

$$\Delta P = P_{атм} - P = \rho_0 g h. \quad (17.12)$$

З часом ΔP змінюється, тому що зменшується висота стовпчика рідини. Якщо об'єм рідини, що витікає, малий, то зміна висоти стовпа рідини буде незначною і, відповідно, малою буде зміна ΔP . На початку досліду $\Delta P_1 = \rho_0 g h_1$, а при його закінченні $\Delta P_2 = \rho_0 g h_2$. Середнє значення різниці тисків на кінцях капіляра

$$\Delta P = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho_0 g, \quad (17.13)$$

де h_1 – рівень рідини в посудині на початку вимірювань, h_2 – рівень рідини в посудині наприкінці вимірювань.

Об'єм газу, що проходить крізь капіляр, дорівнює об'ємові рідини V , що витікає з крана в мензурку. Якщо (17.13) підставити у (17.10), то одержимо:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho_0 g}{16 V l} (h_1 + h_2) \tau,$$

а згідно з (17.11)

$$D = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi r^4 \rho_0 g}{16 V l_0} (h_1 + h_2) \tau. \quad (17.14)$$

Послідовність виконання роботи

1 Відкрити кран 7 (рис. 17.2) і дочекатися того моменту, коли вода рівномірно краплями буде витікати з нього у склянку 9.

2 Після встановлення такого процесу замінити склянку 9 мензуркою 8, щоб вода з віскозиметра капала в мензурку. При цьому включити секундомір і визначити висоту h_1 рівня води в посудині.

3 Коли в склянці набереться $30 \div 50 \text{ см}^3$ води, закрити кран і зупинити секундомір.

4 Записати час заповнення водою мензурки, а також нову висоту h_2 і об'єм рідини, що пройшла через кран 7.

Воду з мензурки вилити у склянку 9. Дослід повторити ще двічі, виконавши п. 4.1 – 4.4.

5 Визначити з таблиці густину води ρ_0 і густину повітря ρ при температурі досліду. Радіус капіляра r і довжина капіляра l вказані на даній установці. Виміряні величини h_1 , h_2 , τ занести в таблицю 17.1.

6 За формулою (17.14) визначити коефіцієнт дифузії D .

7 Обчислити абсолютну й відносну похибки визначення D , вважаючи, що $D = f(\tau, h_1, h_2, V)$.

Таблиця 17.1 – Таблиця для даних

№	ρ_0 , кг/м ³	ρ , кг/м ³	r , мм	l , см	V , мл	h_1 , см	h_2 , см	τ , с	D , м ² /с	ΔD , м ² /с
1										
2										
3										

Контрольні запитання

1 Які явища і чому називаються явищами переносу?

2 Запишіть і поясніть рівняння дифузії і внутрішнього тертя.

3 Поясніть фізичний зміст коефіцієнта дифузії і коефіцієнта внутрішнього тертя. Назвіть їхні одиниці вимірювання в СІ.

4 Виведіть коефіцієнти D і η згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів.

5 Поясніть формулу Пуазейля. За яких умов вона застосовується до газів?

6 Питома теплоємність повітря при нормальних умовах $C_V = 715,7$ Дж/кг·К. Визначте коефіцієнт теплопровідності повітря K .

7 За яких умов можна застосовувати рівняння теплопровідності (17.4)?

Лабораторна робота № 18

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ І ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ ЧЕРЕЗ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя методом Пуазейля і розрахувати середню довжину вільного пробігу й ефективний діаметр молекул повітря.

Обладнання

- 1 Посудина з краном-крапельницею і капіляром, наповнена водою.
- 2 Мензурка.
- 3 Склянка для збирання води, що витікає з посудини.
- 4 Секундомір.
- 5 Барометр.
- 6 Термометр.*

Загальні положення

Модуль сили внутрішнього тертя, прикладеної до площі S поверхні шару газу (рідини), визначається формулою

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S,$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя, який залежить від природи і стану речовини (наприклад, температури); $\frac{dv}{dz}$ – градієнт швидкості вздовж напрямку z , перпендикулярному до площини S . У разі руху газу (рідини) вздовж круглої трубки, замість $\frac{dv}{dz}$ можна написати $\frac{dv}{dr}$, де r – відстань від осі трубки вздовж радіуса.

Виведення розрахункових формул

Розглянемо випадок, коли речовина в трубці рухається з постійною швидкістю. Це означає, що загальна сума всіх сил, діючих на обраний циліндричний об'єм, дорівнює нулю. Таких сил буде тільки дві: сила, обумовлена різницею тисків на різних кінцях трубки, що викликає рух речовини, і сила внутрішнього тертя, що цьому рухові протидіє.

Модуль першої сили має вигляд

$$F_{\text{тиск}} = (p_1 - p_2) \pi r^2, \quad (18.1)$$

де p_1 і p_2 – тиск на різних кінцях трубки. Ця сила повинна дорівнювати силі внутрішнього тертя:

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| 2\pi r l = -2\pi r l \eta \frac{dv}{dr}, \quad (18.2)$$

де $2\pi r l$ – площа бокової поверхні обраного циліндру; знак “–” у правій частині з’явився за рахунок того, що похідна $\frac{dv}{dr} < 0$, тобто швидкість зменшується при збільшенні відстані від осі трубки.

Прирівнявши (18.1) і (18.2), отримаємо диференціальне рівняння:

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 = -2\pi r l \eta \frac{dv}{dr}. \quad (18.3)$$

Інтегруючи (18.3), одержимо

$$v = -\frac{p_1 - p_2}{4\eta l} r^2 + C. \quad (18.4)$$

Постійну інтегрування C треба обирати так, щоб на стінках трубки ($r = r_0$) швидкість дорівнювала нулю. Ця вимога виконується при

$$C = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} r_0^2. \quad (18.5)$$

Підставимо (18.5) у (18.4) і отримаємо формулу для швидкості:

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right), \quad (18.6)$$

де

$$v_0 = v(0) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} r_0^2 \quad (18.7)$$

– швидкість на осі трубки.

Застосовуючи (18.6), можна розрахувати об’єм V речовини, що проходить через поперечний переріз трубки за час t . Якщо розбити переріз трубки на кільця шириною dr , то через кільце радіусу r за час t пройде об’єм рідини (газу):

$$dV = 2\pi r v_0 t \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) dr. \quad (18.8)$$

Проінтегруємо (18.8) по r в межах від 0 до r_0 :

$$V = \int_0^{r_0} v_0 t \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) 2\pi r dr = \frac{1}{2} \pi r_0^2 v_0 t. \quad (18.9)$$

Підставимо (18.7) у (18.9) і отримаємо формулу для об'єму:

$$V = \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} \pi r_0^4 t, \quad (18.10)$$

яка називається формулою Пуазейля.

Формулу Пуазейля використовують для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя (в'язкості) рідин і газів. Пропускаючи рідину або газ через трубку визначеного радіуса, вимірюють перепад тиску і об'єм V . Потім за отриманими даними розраховують η .

Формулу (18.10) можна використовувати для газів, коли не брати до уваги їх стисливість. Ця умова виконується для невеликих значень різниці тисків на кінцях трубки: $\frac{P_1 - P_2}{P_2} \ll 1$, що і має місце в даній роботі.

З формули (18.10) маємо:

$$\eta = \frac{\Delta p}{8Vl} \pi r_0^4 t, \quad (18.11)$$

де $\Delta p = p_1 - p_2$ – різниця тисків на кінцях капіляра; r_0 – радіус капіляра; l – довжина капіляра, V – об'єм рідини; t – час витікання рідини.

Оскільки всі величини в правій частині формули (18.11) можна виміряти, то цією формулою можна користуватись для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя для будь-якого газу або суміші газів.

З другого боку, кінетична теорія ідеального газу встановлює певне співвідношення між коефіцієнтом внутрішнього тертя η , середньою довжиною вільного пробігу молекул газу $\bar{\lambda}$, середньою арифметичною швидкістю їх руху \bar{v} і густиною газу ρ :

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} \rho. \quad (18.12)$$

Для реальних газів у це співвідношення вводиться додатковий коефіцієнт (приблизно рівний 1,5), що залежить від сили взаємодії між молекулами газу.

Тому формула (18.12) для реальних газів матиме такий вигляд:

$$\eta = 0,5 \bar{\lambda} \bar{v} \rho. \quad (18.13)$$

Густина газу ρ за даних умов може бути визначена з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho = \frac{m}{\mu} = \frac{p\mu}{RT}, \quad (18.14)$$

де $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – універсальна газова стала; μ – молярна маса газу; p – тиск; T – абсолютна температура; m – маса газу.

Середня арифметична швидкість молекул газу

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (18.15)$$

Підставляючи в рівняння (18.13) значення ρ з (18.14) і \bar{v} з (18.15), знайдемо середню довжину вільного пробігу молекул газу:

$$\bar{\lambda} = \frac{\eta_{cp}}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}. \quad (18.16)$$

Середня довжина вільного пробігу $\bar{\lambda}$ і ефективний діаметр молекул газу σ зв'язані співвідношенням

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}, \quad (18.17)$$

де σ – ефективний діаметр молекули; n – число молекул в 1 м^3 за даних умов (температури і тиску) – знаходять з рівняння

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (18.18)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана.

Розв'язуючи спільно (18.17) і (18.18), одержимо:

$$\sigma = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\bar{\lambda}p}}. \quad (18.19)$$

Все викладене вище стосується однорідного газу. Повітря ж є сумішшю газів, в основному азоту (75,7 % за масою) і кисню (23 % за масою). Оскільки ці гази двоатомні й близькі за молярними масами ($\mu_{N_2} = 0,028 \text{ кг/моль}$; $\mu_{O_2} = 0,032 \text{ кг/моль}$) і за багатьма іншими властивостями, то наведеними тут

формулами можна користуватися і для повітря, вважаючи його однорідним газом з $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$.

Опис установки й методики вимірювань

Установка цієї лабораторної роботи розташована на платформі 1, в яку вмонтовано штатив 2 з кронштейнами 3 (рисунок 18.1). Кронштейни 3 тримають віскозиметр, що складається з капіляра 4, радіус і довжина якого відомі, й мірної посудини 5 зі шкалою 6 і краном 7. Посудина 5 закрита корком, в якому закріплений капіляр 4, який не повинен торкатися до поверхні води. При витіканні рідини з мірної посудини 5 тиск над рідиною зменшується і крізь капіляр 4 у посудину починає надходити повітря. При малих швидкостях надходження повітря в тонкому капілярі встановлюється його ламінарна течія. На платформі 1 знаходяться мензурка 8 і металева склянка 9.

Отвір крана значно більший за переріз капіляра. При закритому крані 7 тиск повітря над рідиною в середині посудини 5 дорівнює атмосферному, оскільки посудина сполучається з атмосферою через капіляр. Як тільки кран 7 відкривається, рідина під дією її гідростатичного тиску починає виливатися. Доти, доки сумарний тиск газу і рідини в середині посудини на рівні отвору не стане рівним атмосферному, це витікання буде нерівномірним. Тобто умовою рівномірного витікання є:

$$p_1 + \rho_g g h_1 = p_{\text{атм}},$$

де p_1 – тиск газу в посудині; h_1 – висота стовпчика рідини в даний момент часу; ρ_g – густина рідини (води); g – прискорення сили тяжіння.

При цьому на кінцях капіляра встановиться різниця тисків

$$\Delta p = p_{\text{атм}} - p_1 = \rho_g g h_1,$$

яка спричиняє протікання повітря крізь капіляр у посудину.

Різниця тисків на кінцях капіляра, що дорівнює $\rho_g g h_1$, з часом змінюється, тому що зменшується висота стовпа рідини. Оскільки площа перерізу посудини велика, а об'єм рідини, що витікає, порівняно малий, то зміна тиску Δp буде мала. Тому в формулі (18.11) за Δp можна взяти середню різницю тисків на кінцях капіляра на початку і в кінці досліду, тобто

$$\Delta p = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho_g g. \quad (18.20)$$

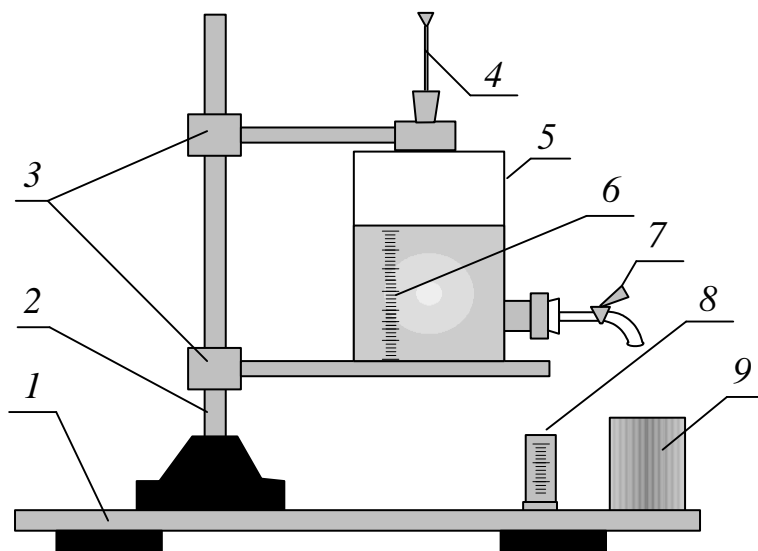


Рисунок 18.1 – Установка до лабораторної роботи № 18

Об'єм газу V , який проходить крізь капіляр, дорівнюватиме об'єму рідини, що витікає через кран у мензурку.

Послідовність виконання роботи

1 Відкрити кран і почекати, поки вода почне витікати з крана краплями; з цього моменту підставити мірну склянку, відмітити на шкалі висоту h_1 стовпа води в посудині і включити секундомір.

2 Коли в склянці буде $30-60 \text{ см}^3$ води, закрити кран і одночасно зупинити секундомір.

3 Записати нову висоту h_2 стовпа води в посудині, час t і об'єм V води, що витекла з посудини.

4 Записати параметри капіляра (r_0 , l), температуру і атмосферний тиск в лабораторії (T , p). Виміряні величини (t , h_1 , h_2 , V), табличні дані внести в таблицю 18.1.

Таблиця 18.1 – Таблиця для даних

Номер досліджу	h_1 , м	h_2 , м	V , м^3	t , с	\bar{v} , м/с	η , Па·с	$\eta_{\text{сер}}$, Па·с	n , м^{-3}	$\bar{\lambda}$, м	σ , м
1										
2										
3										
4										

5 Обчислити: різницю тисків на кінцях капіляру Δp за формулою (18.20); коефіцієнт внутрішнього тертя η за формулою (18.11); густину повітря ρ за формулою (18.14); середню арифметичну швидкість молекул повітря \bar{v} за

формулою (18.15); середню довжину вільного пробігу молекул повітря $\bar{\lambda}$ за формулою (18.16); концентрацію молекул повітря n за формулою (18.18); ефективний діаметр молекул повітря σ за формулою (18.19).

Контрольні запитання

- 1 Які явища і чому називаються явищами переносу?
- 2 Поясніть молекулярно-кінетичний механізм в'язкості.
- 3 Поясніть фізичний зміст коефіцієнта в'язкості. Назвіть одиниці його вимірювання.
- 4 Запишіть формулу Пуазейля і поясніть метод визначення коефіцієнта в'язкості η .
- 5 Що таке довжина вільного пробігу?
- 6 Що таке ефективний діаметр молекул? Від чого він залежить?
- 7 Від чого залежить середня арифметична швидкість молекул газу?
- 8 Як визначається концентрація молекул газу?

Лабораторна робота № 19

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ

Мета роботи: експериментальне визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини методами Стокса і Оствальда.

Обладнання

- 1 Прилад Стокса.
- 2 Свинцева кулька.
- 3 Мікрометр.
- 4 Масштабна лінійка.
- 5 Секундомір.
- 6 Прилад Оствальда.
- 7 Термометр.
- 8 Ареометр.
- 9 Гумова груша.

Метод Стокса

Течія рідини, при якому шари рідини (газу) ковзають упорядковано й плавно уздовж так званих ліній струму, називається *ламінарною*. Якщо ж течія є неупорядкованою і містить завихрення, вона називається *турбулентною*. *В'язкість* визначає внутрішнє тертя, що перешкоджає вільному плину рідини. В'язке тертя можна уявити собі як тертя між суміжними шарами рідини, що рухаються відносно один одного.

На тіло, що рухається рівномірно у в'язкій рідині, діє сила внутрішнього тертя. Потік, що обтікає тіло, є ламінарним; дослідним шляхом було з'ясовано, що сила *внутрішнього тертя* \vec{f} прямо пропорційна швидкості об'єкта:

$$f = k v.$$

Значення коефіцієнта k залежить від розмірів і форми тіла, а також від в'язкості рідини (газу). Зокрема Стокс теоретично показав, що при падінні кульки в безмежній рідині, якщо при цьому не виникає завихрень (падіння маленької кульки з малою швидкістю), сила тертя, яка діє на неї, виражається формулою

$$f = 6 \pi r \eta v.$$

На тверду кульку у в'язкій рідині діють три сили: сила тяжіння \vec{P} , виштовхувальна сила Архімеда \vec{P}_1 , сила опору рухові \vec{f} (рисунок 19.1):

$$P = m g = \rho V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g;$$

$$P_1 = m_1 g = \rho_1 V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g,$$

де ρ_1 – густина рідини; ρ – густина кульки.

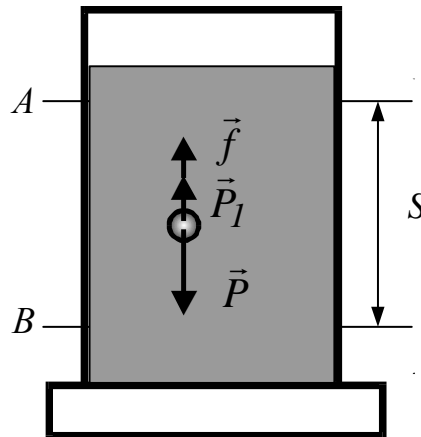


Рисунок 19.1 – Рух кульки у в'язкій рідині

При русі кульки шар рідини, що межує з її поверхнею, прилипає до неї і рухається із швидкістю кульки. Найближчі суміжні шари рідини також починають рухатися. Одержувана ними швидкість тим менша, чим далі вони знаходяться від кульки. Таким чином, при обчисленні опору середовища необхідно враховувати тертя окремих шарів рідини між собою, а не тертя між кулькою і рідиною.

У випадку падіння кульки всі сили спрямовані по вертикалі: сила тяжіння – донизу; виштовхувальна сила й сила опору – догори. Сила опору \vec{f} через велику початкову швидкість кульки спочатку є максимальною. З часом рух кульки сповільнюється і досягає такої швидкості, при якій всі три сили будуть врівноважені. Такий рух називається стаціонарним. При цьому кулька рухається за інерцією з постійною швидкістю v_0 . Для цього випадку маємо:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g - 6\pi r \eta v_0 = 0. \quad (19.1)$$

Розв'язуючи рівняння (19.1) відносно коефіцієнта внутрішнього тертя η , одержуємо:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_1}{v_0} g r^2 = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_1}{S} g r^2 \tau,$$

де S – шлях, який кулька пройшла за τ секунд.

Реалізувати падіння кульки в безмежному середовищі в лабораторних умовах практично неможливо, оскільки рідина завжди міститься в якій-небудь посудині, що має стінки. Урахування наявності стінок при русі кульки вздовж осі циліндра приводить до виразу

$$\eta = \frac{1}{18} g d^2 \frac{(\rho - \rho_l) \tau}{S \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}, \quad (19.2)$$

де D – діаметр поперечного перерізу циліндра; d – діаметр кульки.

Коефіцієнт внутрішнього тертя залежить від температури. У зв'язку з цим, записуючи значення коефіцієнта внутрішнього тертя досліджуваної рідини, необхідно вказувати температуру. Значення температури вимірюють за допомогою лабораторного термометра.

Послідовність виконання роботи

1 За допомогою мікрометра виміряти діаметр кульки в трьох місцях і визначити середнє значення d .

2 Виміряти діаметр кульки і занурити її в рідину. Око спостерігача повинно знаходитися навпроти верхньої риски A . За допомогою секундоміра визначити час τ , протягом якого кулька, рухаючись рівномірно, проходить відрізок S між рисками A і B (рисунок 19.1).

3 Масштабною лінійкою виміряти відстань S між рисками. Дослід повторити з п'ятьма кульками.

4 Виміряні величини (S , τ , d) занести до таблиці 19.1, записати табличні дані ρ , ρ_l .

5 За формулою (19.2) обчислити η .

6 Обчислити абсолютну $\Delta\eta$ й відносну похибки $\Delta\eta/\eta$.

Таблиця 19.1 – Таблиця для даних

№	$d, \text{мм}$	$d_{\text{сер}}, \text{мм}$	$\Delta d, \text{мм}$	$S, \text{см}$	$\Delta S, \text{см}$	$\tau, \text{с}$	$\Delta \tau, \text{с}$	$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\eta_{\text{сер}}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\frac{\Delta \eta}{\eta}, \%$	$\Delta \eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	
1												
2												
3												
4												

Виведення формули для похибки методом логарифмування і обчислення відносної та абсолютної похибок

1 Запишемо ще раз робочу формулу (19.2):

$$\eta = \frac{1}{18} g d^2 \frac{(\rho - \rho_I) \tau}{S \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}. \quad (19.3)$$

2 Знайдемо натуральний логарифм від лівої та правої частин (19.3):

$$\eta = -\ln 18 + \ln g + 2 \ln d + \ln(\rho - \rho_I) + \ln \tau - \ln S - \ln \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right). \quad (19.4)$$

3 Знайдемо диференціал лівої та правої частин рівняння (19.4):

$$\frac{d\eta}{\eta} = 0 + \frac{dg}{g} + 2 \frac{d(d)}{d} + \frac{d\rho - d\rho_I}{\rho - \rho_I} + \frac{d\tau}{\tau} - \frac{dS}{S} - \frac{d \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}{\left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}. \quad (19.5)$$

Останній доданок у правій частині виразу (19.5) перетворимо, використавши формулу диференціювання частки двох функцій:

$$\frac{d \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}{\left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)} = 2,4 \frac{\frac{D \cdot d(d) - d \cdot dD}{D^2}}{\left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)} = 2,4 \frac{D \cdot d(d) - d \cdot dD}{D^2 \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}. \quad (19.6)$$

З урахуванням (19.6) остаточно отримаємо результат диференціювання:

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dg}{g} + 2 \frac{d(d)}{d} + \frac{d\rho - d\rho_I}{\rho - \rho_I} + \frac{d\tau}{\tau} - \frac{dS}{S} - 2,4 \frac{D \cdot d(d) - d \cdot dD}{D^2 \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}. \quad (19.7)$$

4 Замінімо знак диференціала d на знак похибки Δ у рівнянні (19.7) і скрізь у чисельнику поставимо знак плюс:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta g}{g} + 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \rho + \Delta \rho_I}{\rho - \rho_I} + \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta S}{S} + 2,4 \frac{D \cdot \Delta d + d \cdot \Delta D}{D^2 \left(1 + 2,4 \frac{d}{D} \right)}. \quad (19.8)$$

Формула (19.8) визначає відносну похибку для коефіцієнта в'язкості.

5 Обчислити випадкову похибку Δd за формулою:

$$\Delta d = \frac{1}{3} (|\bar{d} - d_1| + |\bar{d} - d_2| + |\bar{d} - d_3|),$$

де \bar{d} – середнє арифметичне значення діаметра кульки з трьох значень.

6 Прийняти значення абсолютної похибки часу руху кульки таким:

$$\Delta \tau = 0,5 \text{ с.}$$

7 Прийняти значення абсолютної похибки прискорення вільного падіння таким:

$$\Delta g = 0,5 \text{ м/с}^2, \Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2, \Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2,$$

якщо значення прискорення вільного падіння під час обчислень брали таким:

$$g = 10 \text{ м/с}^2, g = 9,8 \text{ м/с}^2, g = 9,81 \text{ м/с}^2,$$

відповідно. Отже, принцип визначення абсолютної похибки величини, заданої таблично, такий: **замість усіх значущих цифр величини, заданої таблично, пишемо 0, а у наступному десятковому розряді праворуч пишемо 5.**

8 Визначити значення абсолютної похибки для інших величин: ρ , ρ_l і D , користуючись принципом з п. 4.7.

9 Обчислити абсолютну похибку за формулою (19.8) один раз, наприклад за першим дослідом.

10 Обчислити один раз абсолютну похибку за формулою:

$$\Delta \eta = \frac{\Delta \eta}{\eta} \cdot \eta_{\text{сер}},$$

де $\frac{\Delta \eta}{\eta}$ – є однією величиною – відносною похибкою, яку обчислюють за формулою (19.8).

Контрольні запитання

- 1 Назвіть явища переносу й охарактеризуйте їх фізичний зміст.
- 2 Дайте визначення і фізичний зміст коефіцієнта внутрішнього тертя.
- 3 Від чого залежить коефіцієнт в'язкості?
- 4 Які сили діють на кульку, що падає в рідині?
- 5 Як змінюється швидкість руху кульки при збільшенні її діаметра?
- 6 Назвіть одиниці вимірювання коефіцієнта в'язкості в СІ.
- 7 Який з методів вимірювання коефіцієнта в'язкості абсолютний, а який – відносний?

Лабораторна робота № 20

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ГАЗІВ

Мета роботи: експериментально визначити відношення теплоємності газу при постійному тиску C_p до теплоємності газу при постійному об'ємі C_v ; визначити зміну ентропії ідеального газу при ізохоричному процесі.

Обладнання:

- 1 Скляний балон.
- 2 Водяний манометр.
- 3 Насос.

Загальні положення

Поряд з ізохорним, ізобарним й ізотермічним процесами в термодинаміці часто розглядаються процеси, що протікають під час відсутності теплообміну з навколишніми тілами. Посудини з теплонепроникними стінками називаються *адіабатичними оболонками*, а процеси розширення або стиску газу в таких посудинах – *адіабатичними*.

В *адіабатичному процесі* $\Delta Q = 0$, тому перший закон термодинаміки набуває вигляд

$$A = - \Delta U ,$$

тобто газ виконує роботу за рахунок зменшення його внутрішньої енергії.

На діаграмі (p, V) процес адіабатичного розширення (або стиску) газу зображується кривою, що називається *адіабатою*. При адіабатичному розширенні газ здійснює позитивну роботу ($A > 0$); тому його внутрішня енергія зменшується ($\Delta U < 0$). Це приводить до зниження температури газу. Внаслідок цього тиск газу при адіабатичному розширенні зменшується швидше, ніж при ізотермічному.

Відношення

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (20.1)$$

входить в рівняння Пуассона, яке описує стан газу при адіабатичним процесі. Величина γ має назву показника адіабати.

У цій роботі відношення (20.1) визначається методом Клемана – Дезорма, що ґрунтується на використанні рівнянь, які описують адіабатичний і ізотермічний переходи між станами газів.

Розглянемо суть методу. Скляний балон 1 (рисунок 20.1), який сполучається з атмосферою через трубку з краном 2, заповнюють повітрям при кімнатній температурі T_1 й атмосферному тиску P_0 . Величину тиску в балоні 1 можна контролювати за допомогою манометра 3. За допомогою насоса в балон закачують невелику порцію повітря, що спричиняє збільшення тиску в балоні.

Якщо накачку проводити швидко, то за цей час не встигає відбутися теплообмін газу в балоні з навколишнім середовищем.

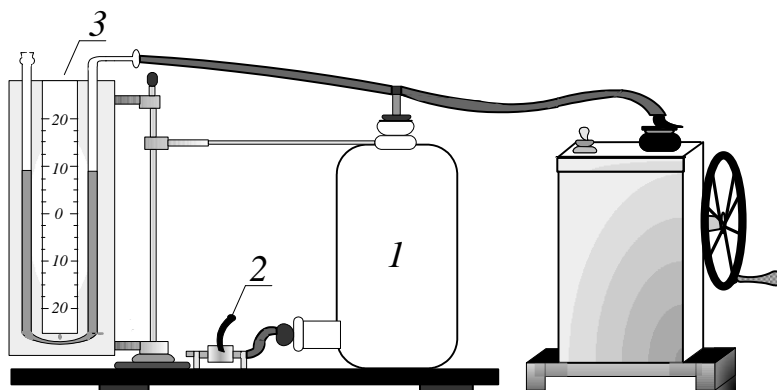


Рисунок 20.1 – Установка до лабораторної роботи № 20

За деякий час (2-3 хв) температура в балоні зрівняється з температурою навколишнього середовища T_1 . При цьому тиск у балоні дещо знизиться:

$$P_1 = P_0 + \rho g h_1,$$

де h_1 – різниця рівнів рідини в манометрі; ρ – густина рідини.

Для того щоб в ході експерименту можна було використовувати рівняння, які описують різні процеси (адіабатичний, ізохоричний, ізотермічний) в газі, розмірковують таким чином. Виділимо в середині балону довільну, достатньо велику порцію повітря, що займає трохи менший об'єм, ніж весь балон з трубками. При незначній зміні загальної кількості повітря при випуску його через кран К кількість повітря у виділеній порції залишається незмінною.

У різних процесах газ, що міститься всередині замкнутої поверхні, буде розширюватися і стискатися, виконуючи роботу і обмінюючись теплом з навколишнім газом. Оскільки кінетична енергія виникаючого макроскопічного руху мала, ці процеси можна вважати квазістатичними. Графіки процесів зображені на рисунку 20.2.

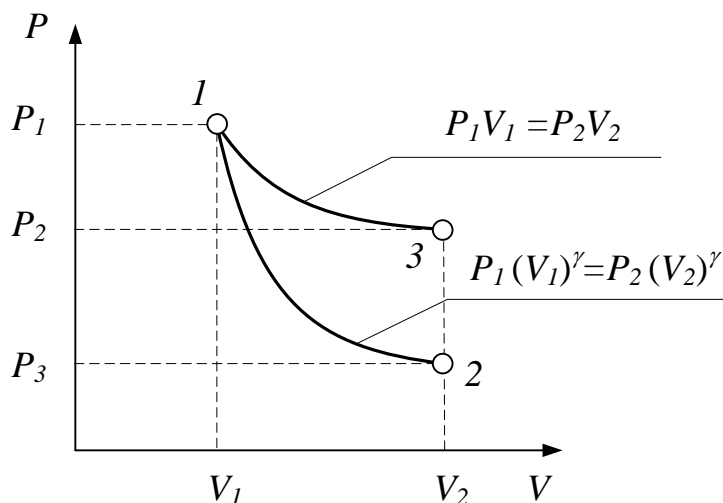


Рисунок 20.2 – Графік процесів

Нехай перший стан виділеної порції газу характеризується параметрами P_1 , T_1 , V_1 (рисунок 20.3, а). Для адіабатичного переходу до другого стану на короткий час відкривають кран 2 і випускають незначну кількість повітря (його величина визначається різницею рівнів h_1 , і перерізом трубки манометра), поки тиск у балоні не зрівняється з атмосферним. Це буде другий стан (рисунок 20.3, б).

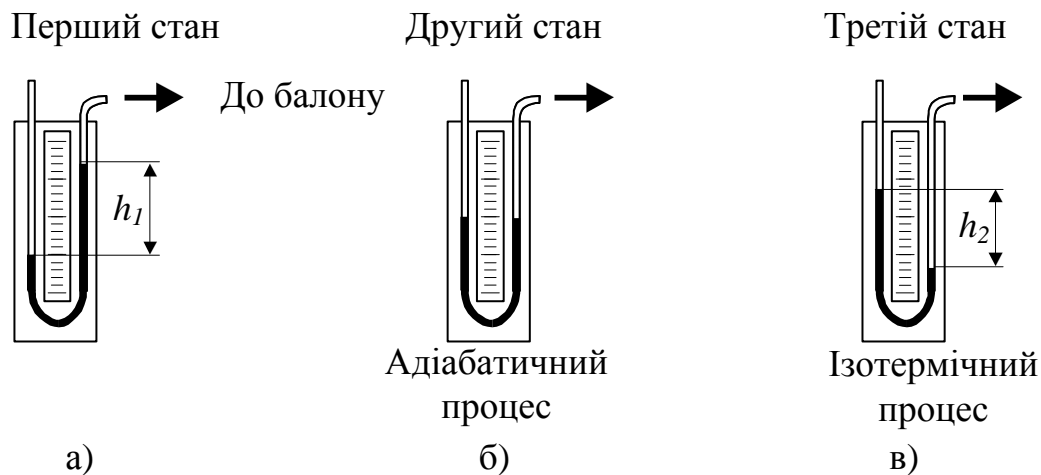


Рисунок 20.3 – Термодинамічні процеси під час виконання лабораторної роботи

Його параметри $P_2 = P_0$, V_2 , T_2 . Адіабатичне розширення зі зменшенням температури і тиску при переході $1 \rightarrow 2$ можна описати рівнянням

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (20.2)$$

Потім уже спонтанно, без впливу експериментатора, відбувається теплообмін з навколишнім середовищем доти, поки температура в балоні не стане рівною температурі навколишнього середовища, а тиск не перестане змінюватись і дійде до максимального значення. Це визначиться різницею рівнів рідини в манометрі h_2 .

Таким чином система перейшла у третій стан, що описується такими параметрами (рисунок 20.3, в):

$$P_3 = P_0 + \rho g h_2.$$

При досить великому об'ємі балона і малому перерізі трубки манометра можна знехтувати його об'ємом при переході із стану 2 у стан 3 ($V_3 = V_2$) і вважати, що нагрівання приводить тільки до збільшення тиску, а перехід $2 \rightarrow 3$ є ізохорним. Дамо оцінку такого припущення.

Тепер можна перейти до безпосереднього визначення величини γ . Зважаючи на те, що газ в першому і третьому станах має однакову температуру T_1 , параметри цих станів запишемо згідно із законом Бойля – Маріотта

$$\frac{P_1}{P_3} = \frac{V_3}{V_1}. \quad (20.3)$$

Враховуючи, що $V_3 = V_2$, піднесемо вираз (20.3) в ступінь γ :

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^\gamma. \quad (20.4)$$

З виразу (20.2) виходить

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_2}. \quad (20.5)$$

Прирівнюючи праві частини виразів (20.4) і (20.5), одержимо:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^\gamma,$$

а з урахуванням того, що $P_1 = P_0 + \rho g h_1$, $P_2 = P_0$, $P_3 = P_0 + \rho g h_2$, маємо:

$$\frac{P_0 + \rho g h_1}{P_0} = \left(\frac{P_0 + \rho g h_1}{P_0 + \rho g h_2}\right)^\gamma. \quad (20.6)$$

Перетворимо праву частину виразу (20.6), вважаючи $\rho g h_1$ і $\rho g h_2$ значно меншими порівняно з P_0 :

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_0 + \rho g h_1}{P_0 + \rho g h_2}\right) &= \frac{(P_0 + \rho g h_2 + \rho g h_1 - \rho g h_2)^\gamma}{(P_0 + \rho g h_2)} = \\ &= \left[1 + \frac{\rho g (h_1 - h_2)}{P_0 + \rho g h_2}\right]^\gamma = 1 + \gamma \frac{\rho g (h_1 - h_2)}{P_0}. \end{aligned} \quad (20.7)$$

Підставляючи останній вираз у праву частину рівняння (20.6), одержуємо:

$$1 + \frac{\rho g h_1}{P_0} = 1 + \gamma \frac{\rho g (h_1 - h_2)}{P_0},$$

або

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (20.8)$$

Зазначимо, що у виразі (20.7) ми знехтували в знаменнику величиною $\rho g h_2$ порівняно з P_0 і використали розкладення функцій $(1+x)^n$ в ряд:

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

При малих x можна використовувати лише лінійну частину рівняння. Таким чином, експериментальне визначення $\gamma = C_p/C_v$, зводиться до вимірювання h_1 і h_2 .

Проведемо оцінку наближення $V_3 = V_2$. Оскільки зміна температури, тиску і об'єму повітря дуже мала, для спрощення можна з ними поводитись як з нескінченно малими величинами, тобто диференціальними. З рівняння Менделєєва – Клапейрона виходить:

$$PdV + VdP = \frac{m}{\mu} R dT, \quad (20.9)$$

де $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ – універсальна газова стала.

У випадку переходу $2 \rightarrow 3$ замінімо dV на $V_3 - V_2 = \Delta V$, а dP на

$$\Delta P = P_3 - P_2 = \rho g h_2.$$

Для того, щоб вважати процес переходу $2 \rightarrow 3$ ізохоричним, в рівнянні (20.9) необхідно знехтувати складовими $P\Delta V$ порівняно з $V\Delta P$. Їхнє відношення

$$\frac{P\Delta V}{V\Delta P} \approx \frac{\frac{1}{2}P_0 h_2 S}{V \rho g h_2} = \frac{\rho g h_0 h_2 S}{2V \rho g h_2} = \frac{h_0 S}{2V}, \quad (20.10)$$

де h_0 – різниця рівнів рідини в манометрі, яка була б при атмосферному тиску; V – об'єм повітря в балоні; S – площа перерізу трубки манометра.

Як видно з виразу (20.10), наближення буде тим більш вірогідним, чим більша густина рідини (h_0 при цьому зменшується), менший переріз трубки і чим більший об'єм балону. Так, для $h_1 = 10 \text{ м}$ (для рідини, густина якої близька до густини води) $S = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$, $V = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ обчислимо: $\frac{h_0 S}{2V} = 0,1$.

Визначимо зміну ентропії при ізохоричному нагріванні повітря в балоні (перехід $2 \rightarrow 3$):

$$\Delta S = C_V \frac{m}{\mu} \ln \frac{T_3}{T_2},$$

де m – маса повітря в балоні; $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$ – молярна маса повітря, $C_V = \frac{i}{2}R$, $i = 5$.

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_0 + \rho g h_2}{P_0} = 1 + \frac{\rho g h_2}{P_0}; \Delta S = C_V \frac{m}{\mu} \ln \left(1 + \frac{\rho g h_2}{P_0} \right).$$

Зважаючи на малу величину h_2 , при обчисленні ΔS можна зробити такі спрощення. Будемо вважати, що P_0 – нормальний атмосферний тиск ($P_0 = \rho g h_0$, де $h_0 = 10,33 \text{ м}$), тоді

$$\frac{m}{\mu} = \frac{\rho_{\text{нов}} V}{\rho_{\text{нов}} V_0} = \frac{V}{V_0}, \ln \left(1 + \frac{h_2}{h_0} \right) \approx \frac{h_2}{h_0}.$$

Прийнявши це до уваги, одержимо робочу формулу для визначення ΔS :

$$\Delta S = \frac{i}{2} R \frac{V}{V_0} \frac{h_2}{h_0}, \quad (20.11)$$

де V – об'єм повітря в балоні; $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ – об'єм 1 моля газу за нормальних умов.

Послідовність виконання роботи

1 Провести за допомогою насоса нагнітання повітря у балон до тиску, що відповідає різниці рівнів у манометрі 20-25 см (нагнітати повітря обережно, щоб не виплескати рідину з манометра).

2 Почекати, поки температура повітря в балоні досягне температури T_1 навколишнього середовища. Виміряти різницю рівнів h_1 , що встановилась.

3 Відкрити кран 2 (рисунок 20.1) на короткий час. Швидкість зняття затискача повинна бути такою, щоб в перший момент, коли рівні рідини в манометрі зупиняться, сполучення з атмосферним повітрям було припинено. У момент відкриття крана повітря розширюється, тиск його в балоні стає рівним атмосферному P_2 (при відкритті крана від різкої зміни тиску повітря в балоні можливе виникнення коливань рідини, що швидко припиняється і не впливає на хід досліду).

4 Почекати, поки повітря в балоні, яке охолонуло при адіабатичному розширенні, нагріється до кімнатної температури T_1 . Виміряти різницю рівнів манометра h_2 , що встановилася.

5 Пункти 1 – 4 повторити ще 7 разів.

6 Обчислити коефіцієнт Пуассона γ за формулою (20.8).

7 Обчислити зміну ентропії ΔS за формулою (20.11), попередньо взявши значення параметрів i , V , V_0 і h_0 з тексту на сторінках 32–33.

8 Знайти середнє арифметичне значення показника адіабати γ і зміни ентропії ΔS .

9. Вивести формули для абсолютних похибок показника адіабати $\Delta\gamma$ і зміни ентропії $\Delta(\Delta S)$ за зразком, як було виведено формулу для абсолютної похибки коефіцієнта в'язкості $\Delta\eta$ у лабораторній роботі № 19. Зробити обчислення за виведеними формулами, визначивши значення абсолютних похибок усіх величин, які стоять у правих частинах вказаних формул (слід використовувати з лабораторної роботи № 19 метод визначення абсолютної похибки величини, заданої таблично).

Результати вимірювань занести до таблиці 20.1.

Таблиця 20.1 – Таблиця для даних

№ досліду	h_1 , см	h_2 , см	γ	$\gamma_{сер}$	ΔS , Дж/К	$\Delta S_{сер}$	Похибка			
							Δh_1 , см	Δh_2 , см	$\Delta\gamma$	$\Delta(\Delta S)$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

Контрольні запитання

1. Якими параметрами характеризується стан даної маси газу?
2. Що називається тиском? Яка одиниця вимірювання тиску?
3. Який процес називається ізобаричним, ізохоричним, ізотермічним? Які закони визначають стан газу при цих процесах?
4. Запишіть рівняння Менделєєва–Клапейрона для 1 моля і для довільної маси газу.
5. Який процес називається адіабатичним?
6. Як і чому змінюється температура газу в балоні при проведенні дослідів?
7. Поясніть фізичний зміст теплоємності.
8. Яка теплоємність більша – C_p або C_v ? Чому?
9. Який існує зв'язок між C_p і C_v ?
10. Поясніть відміну молярної теплоємності від питомої. В яких одиницях вони вимірюються?
11. Поясніть, що таке число ступенів вільності? Як це число пов'язане з показником γ ? Знаючи γ (з дослідів), підрахуйте число ступенів вільності молекул повітря.
12. Дайте визначення першого закону термодинаміки. Запишіть його математичне вираження. Поясніть, як трансформується це вираження для різних процесів у газах.

Лабораторна робота № 21

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИРОСТУ ЕНТРОПІЇ ПРИ ПЛАВЛЕННІ ОЛОВА

Мета роботи: визначити зміну ентропії при нагріванні й плавленні олова.

Обладнання

1. Піч.
2. Тигель з оловом.
3. Термометр.
4. Термопара.
5. Технічні терези.
6. Мілівольтметр.
7. Секундомір.

Загальні положення

Відношення кількості теплоти, отриманої тілом в ізотермічному процесі, до температури тіла, що віддає тепло, називається *приведеною кількістю теплоти*:

$$Q^* = \frac{\Delta Q}{T}.$$

Приведена кількість теплоти, отримана тілом в будь-якому круговому процесі, дорівнює нулю:

$$Q_{обр}^* = \int_{обр} \frac{\Delta Q}{T} = 0.$$

Тут T – температура, при якій тіло отримує елементарну кількість тепла ΔQ . Для того, щоб інтеграл з попередньої формули дорівнював нулю, під інтегралом повинен стояти повний диференціал деякої функції (само ΔQ не є повним диференціалом):

$$dS = \frac{\Delta Q}{T}.$$

Функція S є *функцією стану* (тобто фізичною величиною, що характеризує стан системи і її зміна при термодинамічних процесах не залежить від виду цих процесів) і називається *ентропією*. Одним з формулювань другого закону термодинаміки є наступне: ентропія замкненої системи при будь-яких процесах у ній не зменшується. У необоротних процесах ентропія завжди збільшується і тільки в оборотних є константою.

Твердження другого закону термодинаміки можна розуміти також з позицій статистики. У молекулярно-кінетичній теорії існує формула Больцмана:

$$S = k \ln P + \text{const},$$

де k – стала Больцмана, P – *термодинамічна ймовірність стану*, яка дорівнює числу можливих розподілів частинок за координатами і швидкостями, що відповідають даному термодинамічному стану. З цього визначення випливає, що P – ціле число, не менше за одиницю.

Отже, факт, що ентропія замкненої системи не може зменшуватися, говорить про те, що система може переходити тільки або до станів з такою ж термодинамічною ймовірністю (при оборотних процесах), або з більшою (при необоротних).

Опис установки і виведення розрахункової формули

Кількість тепла, яку необхідно витратити, щоби нагріти олово від кімнатної (початкової) температури T_k до кінцевої температури плавлення T_n дорівнює

$$Q = \int_{T_k}^{T_n} cm dT,$$

де c – питома теплоємність олова; m – маса олова.

При цьому зміна ентропії

$$\Delta S_1 = \int_{T_k}^{T_n} cm \frac{dT}{T} = cm \ln \frac{T_n}{T_k}.$$

Процес плавлення олова відбувається при сталій температурі T_n , тому є ізотермічним. У такому разі зміна ентропії

$$\Delta S_2 = \int_1^2 \frac{dQ}{T_n} = \frac{1}{T_n} \int_1^2 dQ.$$

Кількість теплоти, потрібної для плавлення маси олова m , взятої при температурі плавлення T_n ,

$$\int_1^2 dQ = \lambda m,$$

де λ – питома теплота плавлення олова. Тому зміна ентропії

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda m}{T_n}.$$

Загальна зміна ентропії при нагріванні й плавленні олова є

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{T_n}{T_k} + \frac{\lambda m}{T_n}. \quad (21.1)$$

Послідовність виконання роботи

- 1 Визначити масу олова, зваживши тигель з оловом на технічних терезах. Маса тигля відома.
- 2 Розмістити всередині печі тигель з оловом таким чином, щоби спай термopари торкався олова. Після цього увімкнути піч.
- 3 Розпочати вимірювання зміни температури олова. Для цього через кожні $\Delta \tau = 30$ секунд послідовно записувати показники мілівольтметра, а потім – відповідні їм значення температури, користуючись градууювальним графіком.
- 4 Після закінчення вимірів витягти з розплавленого олова спай термopари і вимкнути піч.
- 5 Побудувати графік залежності температури олова від часу.
- 6 За допомогою одержаного графіка визначити температуру плавлення олова T_n .
- 7 Виписати з довідника значення величин c і λ . Визначити кімнатну температуру за допомогою термометра.
- 8 Величини m , T_k , T_n , c , λ занести до таблиці 21.1.
- 9 За формулою (21.1) визначити зміну ентропії при нагріванні й плавленні олова.
- 10 Обчислити абсолютну й відносну похибки визначення ΔS , вважаючи, що $\Delta S = f(m, t_k)$.

Таблиця 21.1 – Таблиця для даних

№	m , кг	c , Дж/кг·К	λ , Дж/кг	τ , с	T , К	T_k , К	T_n , К	ΔS , Дж/К
1								
2								
3								

Контрольні запитання

1. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
2. Що називається ентропією? В яких одиницях вимірюється ентропія?
3. Які процеси називаються оборотними й необоротними?
4. Назвіть найважливіші функції стану системи, дайте їх визначення.
5. Який процес називається коловим?
6. Виведіть робочу формулу для приросту ентропії при плавленні олова.
7. Знайдіть зміну ентропії при всіх ізопроцесах.

Лабораторна робота № 22

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В РЕАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Мета роботи: визначити зміни ентропії декількох тіл з різними теплоємностями методом вирівнювання температури системи тіл.

Обладнання

1. Калориметр з мішалкою.
2. Нагрівач.
3. Термометр.
4. Водомірна склянка.
5. Технічні терези, різноваги.
6. Набір досліджуваних тіл (алюмінієві, мідні, сталеві).

Загальні положення

Процес вирівнювання температури системи тіл залежить від їх розмірів, кількості й розподілу температур в усьому об'ємі змішуваних тіл. У реальному нерівноважному процесі швидкість зрівнювання температур тіл, що стикаються, обчислена на одиницю об'єму, залежить від їх теплоємності.

Якщо в калориметр, який містить деяку кількість води при фіксованій температурі, занурити тіло, нагріте до більш високої температури, відбудеться теплообмін, по закінченні якого встановиться загальна температура. Якщо ми повторимо дослід з тими ж вихідними даними, зменшивши теплоємність зануреного тіла, то одержимо процес, більш близький до оборотного. Ступінь його оборотності в ізольованій системі можна встановити, визначивши зміну ентропії.

У такому процесі для твердого тіла й рідини роботою розширення можна знехтувати, тому

$$c_p = c_v = c,$$

де c_p – питома теплоємність тіла при постійному тиску, c – питома теплоємність тіла при постійному об'ємі, c – питома теплоємність тіла.

Зміну ентропії при переході з першого стану до другого можна виразити так:

$$\Delta S_I = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Зважаючи на те, що ентропія системи – є адитивною величиною, для системи тіл

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i ,$$

де ΔS – зміна ентропії системи тіл; ΔS_i – зміна ентропії для одного тіла; n – кількість тіл, що складають систему.

Опис установки й виведення розрахункової формули

До складу системи (рисунок 22.1) входять такі тіла: досліджуване тіло масою m_T з питомою теплоємністю c_T і початковою температурою T_1 (температура пари води за шкалою Кельвіна); калориметрична склянка масою m_K з питомою теплоємністю c_K і початковою температурою T_0 , вода в калориметрі масою m_B і питомою теплоємністю c_B з початковою температурою T_0 . До цієї ж системи входить мішалка масою m_M з питомою теплоємністю c_M і початковою температурою T_0 .

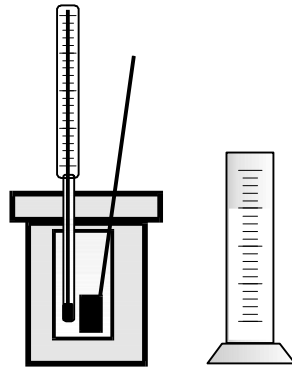


Рисунок 22.1 – Калориметрична склянка і калориметр

Після закінчення процесу теплообміну в указаній системі встановиться кінцева температура T . При вирівнюванні температури ентропія кожного з тіл змінюється таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= c_T m_T \ln \frac{T}{T_1} \text{ (тіло);} & \Delta S_2 &= c_K m_K \ln \frac{T}{T_0} \text{ (калориметр);} \\ \Delta S_3 &= c_M m_M \ln \frac{T}{T_0} \text{ (мішалка);} & \Delta S_4 &= c_B m_B \ln \frac{T}{T_0} \text{ (вода).} \end{aligned}$$

Звідси знайдемо зміну ентропії всієї системи:

$$\Delta S = (c_K m_K + c_M m_M + c_B m_B) \ln \frac{T}{T_0} + c_T m_T \ln \frac{T}{T_1}. \quad (22.1)$$

Послідовність виконання роботи

1 Визначити на технічних терезах масу m_T будь-якого з досліджуваних тіл. Після цього опустити тіло в нагрівач.

2 Налити воду в нагрівач і увімкнути його.

3 Поки вода нагрівається разом з досліджуваним тілом в нагрівачі, підготуйте калориметр для наступних вимірювань. У водомірну склянку налейте $30 \div 50 \text{ см}^3$ води. Визначте за довідковою таблицею густину води при кімнатній температурі й обчисліть масу води за формулою $m_B = \rho_B V_B$. Після цього вилийте воду в калориметричну склянку і виміряйте температуру t_0 води в ній за допомогою термометра.

4 Після того, як у нагрівачі закипить вода, запишіть температуру t_1 киплячої води і, почекавши 2 – 3 хв, вимкніть нагрівач. Витягніть нагріте тіло з нагрівача і швидко опустіть його в калориметричну склянку. При цьому за допомогою термометра необхідно якомога точніше зафіксувати максимальне значення температури t . Питомі теплоємності калориметра c_K , води c_B , досліджуваного тіла c_T і маса m_K калориметричної склянки вказані на робочому місці.

5 Величини m_T , V_B , ρ_B , t_0 , t_1 , t а також величини, які вказані на установці, занести до таблиці 22.1.

6 За формулою (22.1) обчислити зміну ентропії системи.

7 Обчислити абсолютну й відносну похибки визначення ΔS , вважаючи, що $\Delta S = f(t_0, t_1, t, m_T)$.

Примітка: Питому теплоємність c_M і масу мішалки m_M можна не враховувати.

Таблиця 22.1 – Таблиця для даних

№	m_T , г	V_B , мл	ρ_B , кг/см ³	m_B , г	t_0 , °C	t_1 , °C	t , °C	m_K , г	c_K , $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$	c_B , $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$	c_T , $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$	ΔS , $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
1												
2												

Контрольні запитання

1. Поясніть, у чому полягає різниця між оборотним і необоротним процесами?

2. Чому всі реальні процеси є необоротними?

3. У чому полягає другий закон термодинаміки ?

4. Поясніть фізичний зміст ентропії й вільної енергії.

5. Який процес називається рівноважним (нерівноважним)?

6. Як обчислити зміну ентропії в реальних процесах?

7. Виведіть робочу формулу для обчислення ΔS .

Лабораторна робота № 23

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ

Мета роботи – вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини методами відриву кільця і відриву крапель.

Прилади й обладнання

1. Терези Жолі.
2. Кільця на підвісі.
3. Рівноваги.
4. Бюретки з кранами.
5. Досліджувана рідина.
6. Посудина для крапель.

Загальні положення

На молекулу, розташовану всередині рідини, діють сили міжмолекулярної взаємодії з боку молекул, які її оточують. У середньому цей вплив скомпенсований і молекула, знаходячись в полі молекулярних сил, не має будь-якого певного напрямку діючої на неї сили. Інша справа, коли молекула розташована біля поверхні рідини. Густина пари і газу над поверхнею набагато менша за густину рідини, тому вплив з боку молекул газу на молекулу поверхневого шару майже відсутній. Таким чином, на молекулу починає діяти некомпенсована сила, спрямована всередину рідини. Така сила називається силою поверхневого натягу і завжди спрямована по нормалі до поверхні всередину рідини. Наявність цієї сили призводить до появи додаткової потенціальної енергії поверхневого шару. Стану рівноваги відповідає мінімум потенціальної енергії, тому при відсутності зовнішніх сил рідина приймає форму з мінімальною поверхнею, тобто форму кулі.

Коефіцієнт поверхневого натягу рідини α визначається роботою, яку треба здійснити силам поверхневого натягу, щоб утворити поверхню на межі рідини і газу

$$\alpha = \frac{dA}{dS}$$

і вимірюється в Дж/м².

Коефіцієнт поверхневого натягу можна також визначити як силу, що діє на будь-який елемент лінії поверхні рідини:

$$\alpha = \frac{F}{L}.$$

Метод відриву кільця

Установка для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води методом відриву кільця, зображена на рисунку 23.1 (терези Жолі), закріплена на платформі 1. Тонкостінне кільце 2 (виготовлене з матеріалу, що добре змочується досліджуваною рідиною) підвішується на пружині 3. Підвіску кільця виконують таким чином, щоб його вісь була вертикальною. Пружина 3 прикріплена до кронштейна 4, жорстко з'єданого зі штангою 5. Видовження пружини 3 (і тим самим силу її натягу) можна виміряти за міліметровою шкалою 6, якщо заздалегідь проградувати пружину.

Підведемо знизу посудину з водою 7 до кільця, яке нерухомо висить на пружині, й піднінемо посудину 8, яка може вертикально рухатися вздовж штанги 9 так, щоб кільце трохи доторкнулося поверхні води. При цьому вода почне підніматися по стінках кільця, а кільце трохи втягнеться всередину рідини. Цей ефект можна помітити при невеликому розтяганні пружини у момент, коли кільце торкнеться поверхні води.

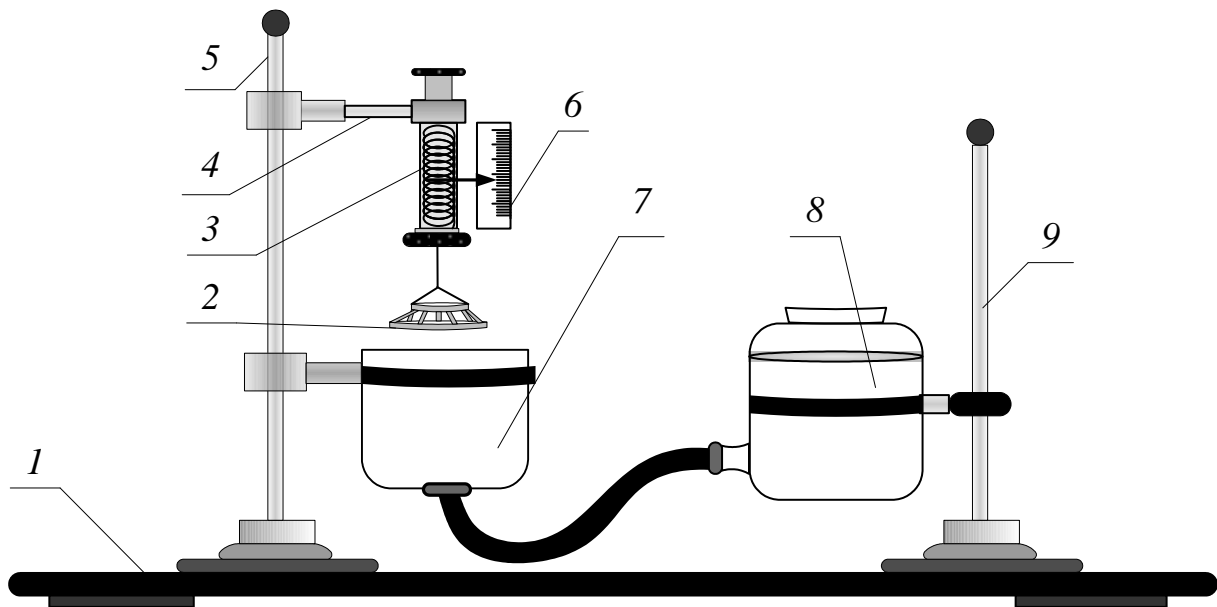


Рисунок 23.1 – Установка до лабораторної роботи № 20 для методу відриву кільця

Якщо після цього почнемо повільно опускати посудину з водою, пружина буде поступово розтягуватись, аж поки кільце 2 не відірветься від поверхні води. При цьому відбудеться розрив поверхневої плівки по обидві сторони контуру кільця. Якщо виміряти силу F_B , яку необхідно прикласти до кільця, щоб розірвати поверхневу плівку, й обчислити внутрішні й зовнішні контури кільця πD_1 й πD_2 (вони ж і є контурами розриву), то визначимо коефіцієнт поверхневого натягу води α_1 за формулою

$$\alpha_1 = \frac{F_B}{\pi D_1 + \pi D_2} = \frac{F_B}{\pi(D_1 + D_2)}, \quad (23.1)$$

де D_1 і D_2 – є внутрішній і зовнішній діаметри кільця.

Позначимо через h товщину стінки кільця, тоді $D_1 = D_2 - 2h$ і

$$\pi(D_1 + D_2) = \pi(D_2 - 2h + D_2) = 2\pi(D_2 - h).$$

Підставляючи ці перетворення в (23.1), отримаємо:

$$\alpha_1 = \frac{F_B}{2\pi(D_2 - h)}.$$

У випадку двох і більше кілець вираз для коефіцієнта поверхневого натягу матиме вигляд

$$\alpha_1 = \frac{F_B}{2\pi \left[\sum_{i=1}^n D_i - nh \right]}, \quad (23.2)$$

де n – кількість кілець.

Так, для чотирьох кілець, що встановлені на діючому лабораторному обладнанні, формула (23.2) переходить в:

$$\alpha_1 = \frac{F_B}{2\pi(D_1 + D_2 + D_3 + D_4 - 4h)}, \quad (23.3)$$

де D_1, D_2, D_3, D_4 – зовнішні діаметри кілець.

У момент відриву сила відриву кілець F_B дорівнює силі F_{np} , з якою пружина терезів діє на кільця: $F_B = F_{np}$. Останню можна визначити шляхом градування пружини, яку розтягують стандартними важками P . Сила F_{np} дорівнює вазі P , яка розтягує пружину на таку саме величину, що і F_B . В умовах рівноваги $F_{np} = P$.

Порядок виконання роботи

1 Виконати градування пружини. Для цього насамперед визначити й записати нульове положення x_0 візира відлікової шкали. Надалі, використовуючи важки від 1 до 13 г (через 1 г) і навантажуючи ними терези, визначати відліки, що відповідають видовженню пружини. Результати занести до таблиці 23.1.

2 За даними таблиці 23.1 побудувати графік так, як це наведено на рисунку 23.2: по осі абсцис відкладають навантаження P , а по осі ординат – абсолютне видовження пружини Δx .

Таблиця 23.1 – Таблиця для даних

$P, 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x, \text{ мм}$														
$\Delta x = x - x_0, \text{ мм}$														

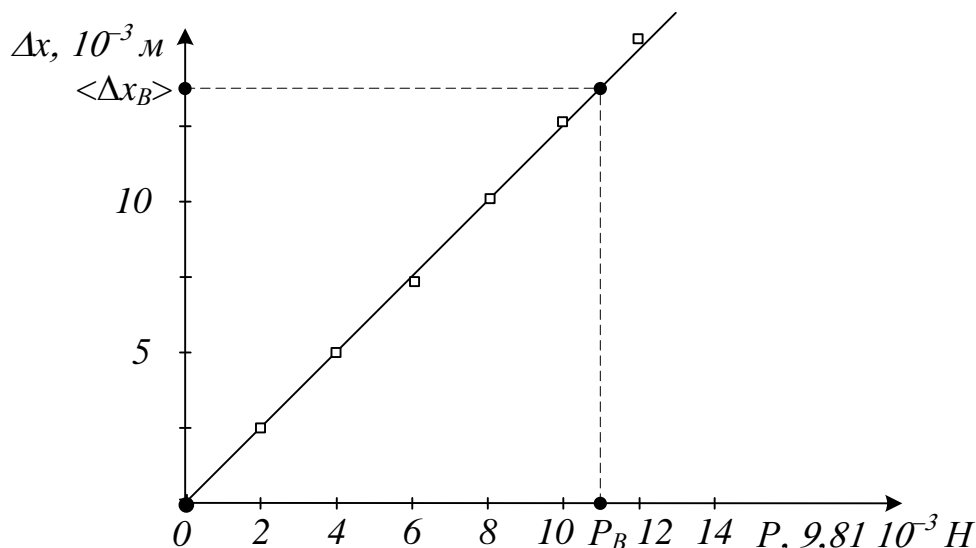


Рисунок 23.2 – Градувальний графік

3 Підняти посудину 8 так, щоб забезпечити дотик нижнього краю кільця 2 з поверхнею рідини (води) в посудині. Оскільки металеве кільце утримується силами поверхневого натягу рідини, то воно буде тягнутися рідиною при опусканні посудини 8, а пружина почне розтягуватися. Коли стала поверхневого натягу рідини і сила розтягу пружини стануть однаковими за величиною, при подальшому зниженні рівня рідини відбудеться відрив кільця від її поверхні. У момент відриву треба відмітити положення візира на шкалі. Цей дослід треба повторити кілька разів. Результати вимірювань занести в таблицю 23.2. Знайшовши середнє арифметичне значення величини розтягу пружини $\langle \Delta x_B \rangle$, за градувальним графіком (рисунок 23.2 – пунктирна лінія) знайти силу P , що за своєю дією є рівною F_B . Користуючись формулою (23.3), обчислити коефіцієнт поверхневого натягу води α_l .

Таблиця 23.2 – Таблиця для даних

№ досл.	$x_0,$ мм	$x_B,$ мм	$\Delta x_B = x_B - x_0,$ мм	$\langle \Delta x_B \rangle,$ мм	$F,$ Н	$\alpha_l,$ Н/м	$\Delta \alpha_l,$ Н/м	$\Delta \alpha_l / \alpha_l,$ %
1								
2								
3								
4								
5								

4 Обчислити абсолютну й відносну похибки при визначенні α_1 .

Метод відриву крапель

Сутність методу відриву крапель полягає в дослідженні процесу утворення поверхні краплі рідини з невідомим коефіцієнтом поверхневого натягу і порівнянні його з аналогічним процесом для рідини з відомим коефіцієнтом поверхневого натягу (води).

У момент відриву краплі сила поверхневого натягу врівноважується силою тяжіння краплі:

$$m g = 2 \pi r \alpha,$$

де r – радіус шийки краплі у момент її відриву.

Отже,

$$\alpha = \frac{\rho V g}{2 \pi r}, \quad (23.4)$$

де ρ – густина рідини; V – об'єм краплі досліджуваної рідини; g – прискорення сили тяжіння.

Установку методу відриву крапель показано на рисунку 23.3. На платформі 1 розташовані склянки 2 і закріплена колона 3, до якої за допомогою кронштейнів 4 кріпляться дві бюретки 5 з однаковими діаметрами крапельниць 6. У бюретки 5 наливають дві різні рідини. Можна вважати, що за таких умов радіуси шийки крапель у момент відриву однакові для обох рідин. Коефіцієнт поверхневого натягу однієї рідини (води) відомий з першого методу. Відкривають крани 6 на крапельницях і рахують кількість крапель, поки об'єми рідин в обох бюретках зменшаться на $2 - 5 \text{ см}^3$.

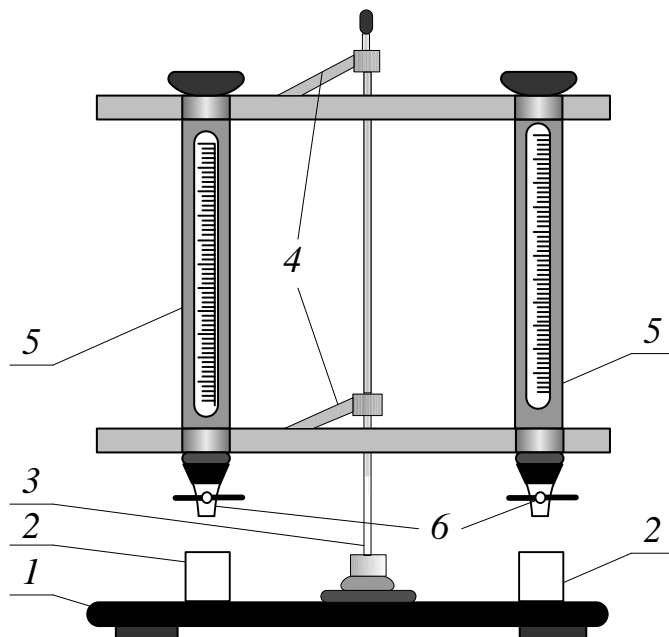


Рисунок 23.3 – Установка до лабораторної роботи № 23 для методу відриву крапель

Об'єм однієї краплі дорівнює відношенню об'єму рідини, що витекла, до кількості крапель. Тому якщо перша рідина (вода) дає n_1 крапель, друга рідина (гас) – n_2 крапель, з рівняння (23.4)

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\rho_1 n_2}{\rho_2 n_1}.$$

Отже,

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{\rho_2 n_1}{\rho_1 n_2}, \quad (23.5)$$

де α_1 , α_2 – коефіцієнти поверхневого натягу води й гасу відповідно.

Послідовність виконання роботи

1 При закритих кранах 6 (рисунок 23.3) налити у бюретки 5 досліджувану і відому рідини не менш ніж на 10 см^3 .

2 Відкрити кран бюретки з відомою рідиною і відрахувати кількість крапель n_1 , що містяться в заданому викладачем об'ємі. Так само визначити кількість крапель n_2 для досліджуваної рідини. Відлік починати при дуже повільному витіканні крапель – не більше 5 – 10 за хвилину.

3 Дослід повторити три рази з кожною рідиною.

4 Виміряні величини занести до таблиці 23.3.

5 За формулою (23.5) обчислити α_2 для кожного досліду, знайти середнє значення $\langle \alpha_2 \rangle$ і занести до таблиці 23.3. Густини рідин ρ_1 і ρ_2 відомі.

6 Обчислити абсолютну й відносну похибки визначення коефіцієнта поверхневого натягу α_2 .

Таблиця 23.3 – Таблиця для даних

Номер досліду	n_1	n_2	α_2 , Дж/м ²	$\langle \alpha_2 \rangle$, Дж/м ²	$\Delta \alpha_2 / \alpha_2$	$\Delta \alpha_2$ Дж/м ²
1						
2						
3						

Контрольні запитання

1. Пояснити причини виникнення сил поверхневого натягу, спираючись на молекулярно-кінетичну теорію.

2. Пояснити фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу.

3. В яких одиницях СІ вимірюється α ?

4. Виведіть робочі формули для визначення α_1 методом відриву кільця і α_2 методом відриву крапель.

5. Поясніть, від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?

Лабораторна робота № 24

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИНИ І ВИВЧЕННЯ ЙОГО ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ТИСКУ В ПУХИРЦІ

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини і вивчити його залежність від температури.

Обладнання

1. Обладнання для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу.
2. Водяний манометр.
3. Електропіч.
4. Термометр.

Загальні положення

Для вивчення залежності коефіцієнта поверхневого натягу α від температури t необхідно виміряти його значення при декількох температурах і побудувати графік залежності α від t .

Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу в даній роботі проводять за методом, що базується на вимірюванні максимального тиску, необхідного для виштовхування пухирця повітря з отвору капіляра в рідину.

Опис установки і виведення розрахункової формули

Установка для вимірювання поверхневого натягу рідини (рисунок 24.1) складається з посудини 1 з досліджуваною рідиною. Через пробку в посудині проходить скляна трубка 2 з відтягнутим нижнім кінцем, так що вихід крапель з трубки є капіляром. Трубку 2 встановлюють так, щоб її нижній канал не торкався поверхні рідини. Для утримання сталої температури досліджуваної рідини посудину 1 розмішують у склянці 3, заповненій водою, яка може розігріватись електропіччю 4. Температуру води вимірюють термометром 5. Посудину 1 за допомогою системи трубок з'єднують з водяним манометром 6 і аспіратором 7. Коли з аспілятора витікає вода, тиск у посудині 1 знижується, а при деякому його значенні P , під дією атмосферного тиску P_0 , через капіляр в рідину протискується пухирець повітря.

Різницю $P_0 - P = \Delta P$ вимірюють водяним манометром 6. Четвертий кінець хрестовини 8 з'єднує всю систему з атмосферою і може бути закритим від атмосфери затискачем 9.

Тиск всередині повітряного пухирця в рідині у момент відриву дорівнює атмосферному P_0 . Цей тиск врівноважується тиском P над поверхнею рідини в посудині 1 і тиском P_1 , зумовленим поверхневим натягом. Гідростатичним тиском $P_2 = \rho g h$, можна знехтувати, оскільки глибина занурення пухирця в рідину є малою. Тому

$$P_0 = P + P_l.$$

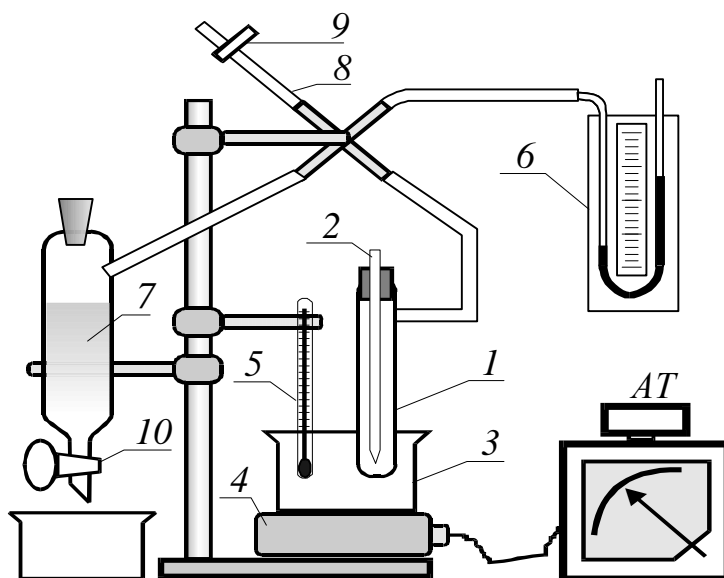


Рисунок 24.1 – Установка до лабораторної роботи № 24

Теоретично доведено, що тиск у довільній точці пухирця

$$P_l = \frac{2\alpha}{R}.$$

Тиск у пухирці буде максимальним, якщо його радіус R буде мінімальним і дорівнюватиме радіусу капіляра r , тоді

$$\alpha = \frac{P_l R}{2} = \frac{P_0 - P}{2} r,$$

або, враховуючи, що $\Delta P = P_0 - P$:

$$\alpha = \Delta P \frac{r}{2}. \quad (24.1)$$

Послідовність виконання роботи

- 1 Закрити затискач 9.
- 2 Визначити за допомогою термометра температуру досліджуваної рідини t_l .
- 3 Перевірити наявність дотику між капіляром і рідиною.
- 4 Відкрити кран аспіратора 10 так, щоб зміна тиску відбувалася достатньо повільно (вода повинна капати). Пухирці повітря повинні відриватися через кожні 5 – 10 с.
- 5 Коли частота виникнення пухирців встановиться, визначити ΔP за максимальною різницею рівнів у колінах манометра для десяти пухирців (в мм вод. ст.).
- 6 Закрити кран аспіратора і відкрити затискач 9.

7 Знайти середнє значення ΔP (в мм. вод. ст.) і перевести одержані величини в систему СІ.

8 За формулою (24.1) визначити коефіцієнт поверхневого натягу рідини α при даній кімнатній температурі t_1 , (радіус капіляра r вказується на установці).

9 Закрити затискач 9.

10 Увімкнути піч і через кожні 10°C виконувати вимірювання різниці тисків до тих пір, поки температура не досягне 90°C .

11 Результати вимірювань занести до таблиці 24.1.

12 За формулою (24.1) обчислити α для різних температур.

13 Побудувати графік залежності α від температури $\alpha = f(t)$.

14 Продовжити пряму $\alpha(t)$ до перетину з віссю температур (в бік високих температур) і визначити критичну температуру, при якій $\alpha = 0$.

15 Знайти абсолютну й відносну похибки визначення α , вважаючи, що $\alpha = f(\Delta P)$.

Таблиця 24.1 – Таблиця для даних

№ досл.	$t, ^\circ\text{C}$	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\alpha, \text{Н/м}$	$\Delta\alpha, \text{Н/м}$
1						
2						
3						
4						
5						

Контрольні запитання

1. Поясніть причину виникнення сил поверхневого натягу (з погляду молекулярно-кінетичної теорії).

2. Дайте визначення коефіцієнта поверхневого натягу. В яких одиницях вимірюється α ?

3. Поясніть, чому змочування рідини в капілярі має ввігнутий меніск, а незмочування – опуклий?

4. Чим зумовлений додатковий тиск під викривленою поверхнею рідини? Виведіть формулу додаткового тиску під сферичною поверхнею.

5. Виведіть формулу Лапласа.

6. Поясніть, чому із збільшенням температури рідини коефіцієнт поверхневого натягу зменшується.

7. При якій температурі коефіцієнт поверхневого натягу дорівнює нулю, як називається такий стан рідини?

8. Поясніть, як відбувається процес видудання пухирця у випадку, коли капіляр торкається поверхні змочуваної рідини.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курс фізики : навч. посіб. [Електрон. ресурс] / [Є. С. Орел, А. В. Безуглий, О. М. Петченко, Є. І. Назаренко] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 191 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/51767/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.
2. Дульфан Г. Я. Фізика. Загальна фізика : конспект лекцій (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 103 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/62960/>, вільний (дата звернення 01.03.2023). – Назва з екрана.
3. Methodical guidelines for performance laboratory works on the subject “General Physics” and “Physics”, part 1 “Mechanics” (for 1-st year of full-time and part-time students education level “bachelor” all specialties) [Electron. resource] / O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; com. : A. V. Bezugliy, O. M. Petchenko. – Electronic text data. – Kharkiv, O. M. Beketov NUUE, 2019. – 42 p. – Regime of access: <http://eprints.kname.edu.ua/52896/>, free (date of the application: 23.02.2023). – Header from the screen.
4. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із розділу «Механіка» з навчальних дисциплін «Фізика», «Загальна фізика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад : О. М. Петченко, Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 59 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/63166/>, вільний (дата звернення 29.03.2023). – Назва з екрана.
5. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з розділу «Механіка» з навчальних дисциплін «Фізика», «Загальна фізика» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Г. Я. Дульфан, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел, О. М. Петченко. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 34 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/63167/>, вільний (дата звернення 29.03.2023). – Назва з екрана.
6. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт із розділу «Молекулярна фізика і термодинаміка» з дисциплін «Фізика» та «Загальна фізика» (для студентів 1 курсу денної та 1 – 2 курсів заочної форм навчання бакалаврів за спеціальностями: 101 – Екологія, 122 – Комп’ютерні науки та інформаційні технології, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології,

183 – Технології захисту навколишнього середовища, 185 – Нафтогазова інженерія та технології, 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 193 – Геодезія та землеустрій, 206 – Садово-паркове господарство, 263 – Цивільна безпека, 275 – Транспортні технології) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. М. Петченко, Є. І. Назаренко, Є. С. Орел. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 35 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/52096/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Фізики» розділу «Електрика і магнетизм» (для студентів 1-го курсу денної форми та 1-2 курсів заочної форми навчання бакалаврів за напрямками 6.170202 – Охорона праці, 6.070101 – Транспортні технології (за видами транспорту), 6.060101 – Будівництво, 6.060103 – Гідротехніка (водні ресурси), 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування, 6.080101 – Геодезія, картографія та землеустрій, 6.050201 – Системна інженерія, 6.090103 – Лісове і садово-паркове господарство) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : О. М. Петченко, К. Ю. Аксьонова, Є. С. Орел, А. В. Безуглий. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 73 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/40495/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

8. Методичні вказівки до практичних занять з курсу загальної фізики, розділ «Електрика і магнетизм» (для студентів 1 курсу всіх форм навчання за напрямками підготовки 6.050701, «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 «Електромеханіка») [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 46 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/35829/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

9. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із розділу «Оптика» дисциплін «Фізика» та «Загальна фізика» (для студентів 1 курсу денної форми та 1–2 курсів заочної форми навчання бакалаврів спеціальностей 101 – Екологія, 122 – Комп’ютерні науки та інформаційні технології, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, 183 – Технології захисту навколишнього середовища, 185 – Нафтогазова інженерія та технології, 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 193 – Геодезія та землеустрій, 206 – Садово-паркове господарство, 263 – Цивільна безпека, 275 – Транспортні технології) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. М. Петченко, А. С. Сисоев. – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 55 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/45643/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

10. Методичні вказівки до організації самостійної роботи з дисциплін «Фізика» та «Загальна фізика» (для студентів 1 курсу денної форми та 1–2

курсів заочної форми навчання бакалаврів усіх спеціальностей) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : А. В. Безуглий, Є. С. Орел; – Електрон. текст. дані. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 12 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/45802/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

11. Методичні рекомендації до проведення комп'ютерних лабораторних робіт із навчальної дисциплін «Загальна фізика», «Фізика»; розділ «Електрика і магнетизм» (для студентів 1 курсу денної і заочної форм навчання за всіма спеціальностями) [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. М. Петченко, А. В. Безуглий. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 43 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/55382/>, вільний (дата звернення 23.02.2023). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт

із розділу

«Молекулярна Фізика»

з навчальних дисциплін

«ФІЗИКА», «ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей)*

Укладачі : **ДУЛЬФАН** Ганна Яківна,
НАЗАРЕНКО Євгеній Іванович,
ОРЕЛ Євгеній Станіславович,
ПЕТЧЕНКО Олександр Матвійович

Відповідальний за випуск *Є. І. Назаренко*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *Є. І. Назаренко*

План 2021, поз.591М

Підп. до друку 19.01.2022.

Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 3,0

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.