

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

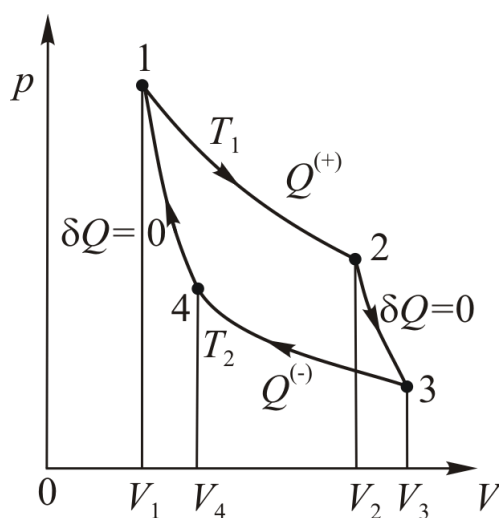


КАФЕДРА ФІЗИКИ

Лабораторний практикум з фізики

Молекулярна фізика та термодинаміка

для студентів інженерних спеціальностей денної та
заочної (дистанційної) форм навчання



Полтава 2016

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

При підготовці до виконання лабораторної роботи студент повинен: записати в робочий зошит назву роботи, мету, прилади та обладнання, виписати основні формули для обчислення, намалювати таблиці вимірювань.

На початку лабораторного заняття викладач перевіряє якість підготовки студентів. Якщо якість підготовки задовільна, студент одержує дозвіл виконувати лабораторну роботу. В протилежному випадку студент до лабораторного заняття не допускається.

Після виконання роботи результати вимірювань необхідно показати викладачеві з наведенням прикладу обчислень досліджуваної величини і одержати підпис викладача.

Якщо результати неправильні, то вимірювання або обчислення необхідно повторити, врахувавши зауваження викладача, і знову показати йому результати.

До кожної виконаної лабораторної роботи з фізики потрібно:

- скласти письмовий звіт;
- захистити його, відповівши на поставлені викладачем запитання;

Питання для захисту наведені в інструкціях до кожної лабораторної роботи.

Звіт з лабораторної роботи повинен включати:

- назву лабораторної роботи, її номер і дату виконання;
- список приладів та обладнання;
- малюнок або схема лабораторної установки;
- робочі формули;
- таблиці з результатами вимірювання та приклади розрахунків;
- графіки (за необхідності);
- відповідь з вказанням розмірності фізичної величини та похибки вимірювання;
- висновки.

Лабораторна робота № 161
ВИЗНАЧЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ГАЗОВОЇ СТАЛОЇ

Мета роботи: визначити величину універсальної газової сталої.

Прилади та обладнання: установка з вакуумметром, скляний балон з краном, терези з важками, барометр, термометр.

Теоретичні відомості

Універсальна газова стала – одна з фундаментальних фізичних сталих, що широко використовується в молекулярно-кінетичній теорії та термодинаміці, в інженерних дисциплінах, де вивчають процеси в газових середовищах (аеро- та гідродинаміка, тепломасообмін, енергетичне обладнання). Універсальна газова стала входить до багатьох фізичних формул, які використовують для обчислення процесів у газах, зокрема в **рівнянні Клапейрона-Менделєєва**:

$$pV = \frac{m}{\mu}RT, \quad (161.1)$$

де V – об'єм газу, м^3 ; m – маса газу, кг; μ – молярна маса, кг/кмоль або кг/моль; T – абсолютна температура, К; $\frac{m}{\mu}$ – кількість молей в даній масі газу, моль.

Значення універсальної газової сталої в СІ:

$$R = 8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К}) = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

В інженерних обчисленнях частіше використовують друге значення.

Для того, щоб визначити фізичний зміст універсальної газової сталої знайдемо елементарну роботу, яку виконує газ при зміні об'єму на dV :

$$\delta A = pdV. \quad (161.2)$$

Для ізобаричного процесу ($p = \text{const}$) продиференціюємо рівняння (161.1):

$$pdV = \frac{m}{\mu}RdT, \quad (161.3)$$

З формул (161.2) та (161.3) робимо висновок, що

$$\delta A = \frac{m}{\mu}RdT \quad \text{або} \quad R = \frac{\delta A}{\frac{m}{\mu}dT}, \quad (161.4)$$

Отже, **універсальна газова стала** чисельно дорівнює роботі, яку виконує один моль ідеального газу при його ізобаричному нагріванні на один градус.

Фізичний зміст універсальної газової сталої можна також встановити з рівняння Майєра:

$$C_p = C_v + R,$$

де C_p , C_v – відповідно ізобарна та ізохорна молярні теплоємності ідеального газу. Тобто R вказує, на скільки молярна теплоємність при ізобаричному нагріванні більша, ніж при ізохоричному.

Існує ще одна стала k – стала **Больцмана**:

$$k = R / N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

де $N_A = 6,23 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро.

Фізичний зміст **числа Авогадро**: це число структурних одиниць (молекул, атомів, іонів) в одному молі будь-якої речовини. Стала Больцмана входить в усі закони, які містяться в класичній або квантовій функції розподілу частинок за енергіями.

З рівняння Клапейрона-Менделєєва знаходимо основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу. Для одного моля газу рівняння (161.1) має вигляд

$$pV_\mu = RT,$$

де V_μ – об'єм одного моля газу, або

$$p = \frac{RT}{V_\mu} = \frac{N_A}{V_\mu} \frac{R}{N_A} T;$$

$$p = nkT,$$

де n – концентрація молекул – число молекул в 1 м^3 ($n = N_A/V_\mu$). Останнє рівняння є математичним записом **основного рівняння молярно-кінетичної теорії ідеального газу**.

Опис установки і методу вимірювання

Вид установки наведений на рис. 161.1. Установка складається з вакуумного насоса 1, вакуумметра 2 та з'єднувальної гумової трубки 3 з краном K . Крім того, в комплект установки входять термометр для вимірювання температури повітря, барометр і терези з важками для визначення маси балона з підставкою 4.

Запишемо рівняння Клапейрона-Менделєєва для двох станів газу – при атмосферному тиску p_A і після розрідження в балоні p_i (температуру приймаємо сталою):

$$p_A V = m_A \frac{RT}{\mu}; \quad p_i V = m_i \frac{RT}{\mu}. \quad (161.5)$$

Виміряти масу повітря в балоні неможливо, бо при атмосферному тиску $m_A = M_A - m_\sigma$, а при розрідженні $m_i = M_i - m_\sigma$, де M_A , M_i – маса балона з повітрям під тиском відповідно p_A і p_i , m_σ – маса балона без повітря.

Тоді рівняння (161.5) матимуть вигляд

$$p_A V = (M_A - m_\sigma) \frac{RT}{\mu}; \quad p_i V = (M_i - m_\sigma) \frac{RT}{\mu};$$

звідки

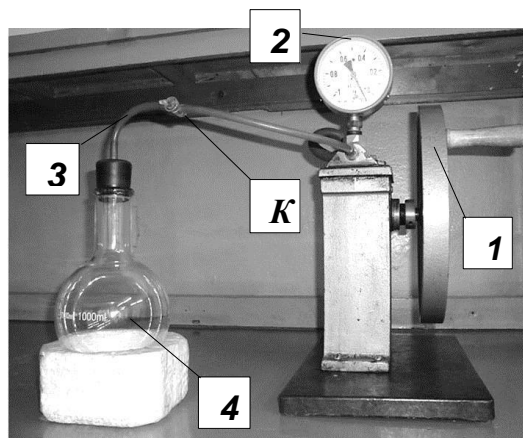


Рис. 161.1. Вид установки для визначення універсальної газової сталої.

$$R = \frac{(p_A - p_i) \cdot V \cdot \mu}{(M_A - M_i) \cdot T}, \quad (161.6)$$

де V – об'єм балона (вказаний на балоні).

Порядок виконання роботи

1. За допомогою терезів визначити масу балона з повітрям, підставкою і краном з похибкою вимірювання до ± 10 мг; виміряти температуру і тиск повітря в приміщенні. Результати вимірювань записати у таблицю

Таблиця 161.1

$t = \underline{\hspace{2cm}}$ °С; $T = \underline{\hspace{2cm}}$ К; $p_A = \underline{\hspace{2cm}}$ мм рт. ст. = $\underline{\hspace{2cm}}$ Па; $M_A = \underline{\hspace{2cm}}$ кг; $V = \underline{\hspace{2cm}}$ м³.

Номер досліджу	Розрідження		M_i , кг	$M_A - M_i$, кг	R , Дж/(моль·К)
	$(p_A - p_i)$, атм	$(p_A - p_i)$, Па			
1					
2					
3					
Середнє	–	–	–	–	

2. З'єднати балон на підставці з вакуумним насосом і відкачати балон до розрідження 0,7 атм – це різниця між тиском у балоні і атмосферним: $p_A - p_i$. Вакуумметр проградуєований у технічних атмосферах: 1 атм = $9,81 \cdot 10^4$ Па.

3. Закрити кран, від'єднати балон від насоса і визначити за допомогою терезів масу балона із залишками повітря. Результати вимірювань записати у таблицю.

4. Повторити пункти 2 – 3 для інших розріджень (0,8 атм та 0,9 атм).

5. За формулою (161.6) обчислити величину універсальної газової сталої. За результатами обчислень знайти середнє значення $R_{сер}$.

6. Обчислити абсолютну та відносну похибки вимірювань:

$$\Delta R = |R_{сер} - R_{табл}|; \quad \varepsilon = \frac{\Delta R_{сер}}{R_{сер}} \cdot 100\%.$$

Знайти дослідне значення сталої Больцмана за формулою: $k_{сер} = \frac{R_{сер}}{N_A}$

7. Результати вимірювань записати у вигляді:

$$R_{сер} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Дж / (моль·К)}; \quad k_{сер} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Дж / К}.$$

Контрольні питання

1. Який газ називають ідеальним? Навести приклади такого газу.
2. Записати рівняння Клапейрона-Менделєєва та основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.
3. Пояснити фізичний зміст сталих R , k , N_A .
4. Записати рівняння Майєра і пояснити фізичний зміст величин.
5. Дати визначення густини та концентрації.

Лабораторна робота № 162
**ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ
МЕТОДОМ АДІАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ**

Мета роботи: на досліді визначити відношення C_p/C_v для повітря.

Прилади та обладнання: прилад для визначення C_p/C_v повітря, ручний нагнітальний насос.

Теоретичні відомості

Відношення питомих або молярних теплоємностей $\gamma = C_p / C_v$ відіграє велику роль в адіабатичних процесах або в процесах, близьких до них. За значенням γ визначають швидкість розповсюдження звуку в газах, від нього залежить течія газів по трубах зі звуковими швидкостями і досягнення надзвукових швидкостей в трубах, що розширюються.

Адіабатичним називають процес, який проходить без теплообміну із зовнішнім середовищем. Залежність між параметрами газу в адіабатичному процесі визначають за **рівнянням Пуассона:**

$$pV^\gamma = const$$

де p , V – відповідно тиск та об'єм газу; γ – **коефіцієнт Пуассона (показник адіабати)**, який дорівнює відношенню питомої (молярної) теплоємності при сталому тиску до питомої (молярної) теплоємності при сталому об'ємі, тобто

$$\gamma = C_p / C_v.$$

Питома теплоємність – це величина, яка дорівнює кількості теплоти δQ , необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на 1 К:

$$c = \delta Q / (m dT).$$

Молярна теплоємність речовини – величина, яка дорівнює кількості теплоти δQ , необхідної для нагрівання 1 моля речовини на 1 К:

$$C = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT}$$

Молярна (C) та питома (c) теплоємності пов'язані між собою співвідношенням

$$C = \mu c.$$

Теплоємність газу залежить від умов його нагрівання. Для нагрівання однієї і тієї ж маси газу до однакової температури при ізобаричному процесі треба витратити більше теплоти, ніж при ізохоричному, бо при ізобаричному процесі, крім витрати теплоти на зміну внутрішньої енергії (збільшення температури), теплота витрачається і на зовнішню механічну роботу (чого нема при ізохоричному процесі). Тому молярна теплоємність ідеального газу при сталому тиску C_p більша за його молярну теплоємність при сталому об'ємі C_v на універсальну газову сталу:

$$C_p = C_v + R.$$

Це співвідношення називають **рівнянням Майєра**. Його можна вивести з

I закону термодинаміки: кількість теплоти δQ , яку одержує система, витрачається на зміну її внутрішньої енергії dU та на виконання роботи δA проти зовнішніх сил:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (162.1)$$

При ізобаричному процесі

$$\delta A = pdV = \frac{m}{\mu} R dT \quad (162.2)$$

тоді

$$\delta Q_p = \frac{m}{\mu} C_p dT. \quad (162.3)$$

Якщо газ нагрівають при сталому об'ємі, то $\delta A=0$, і тоді згідно I закону термодинаміки:

$$\delta Q_V = C_V \frac{m}{\mu} dT = dU \quad (162.4)$$

Підставимо формули (162.2) – (162.4) в (162.1) і одержимо рівняння Майєра. Згідно з класичною молекулярно-кінетичною теорією молярна теплоємність при сталому об'ємі

$$C_V = \frac{i}{2} R,$$

а молярна теплоємність при сталому тиску

$$C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

де i – число ступенів вільності молекули (кількість незалежних координат, які визначають положення молекули у просторі). Для одноатомних молекул газу $i = 3$; для двохатомних $i = 5$; для трьох- і більше атомних $i = 6$.

Тоді **показник адіабати ідеального газу**

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (162.5)$$

За формулою (162.5) можна теоретично визначити показник адіабати, якщо повітря прийняти за двохатомний газ.

Опис установки і методу вимірювання

Основа приладу (див. рис.162.1) – великий товстостінний балон 1 , сполучений гумовими трубками з диференціальним манометром 2 і насосом 3 . Кран K у верхній частині балону сполучає балон з навколишнім повітрям.

В балон 1 , наповнений повітрям при атмосферному тиску, нагнітаємо повітря до деякого нового тиску. Тоді маса повітря в балоні, що займала певний об'єм, стиснеться до тиску P_1 і займатиме певний об'єм V_1 .

Одночасно при цьому нагрівається стиснена маса повітря. Припинимо накачування і зачекаємо декілька хвилин, доки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною T_1 (I стан повітря). Остаточну різницю рівнів, що встановились у манометрі, позначимо h_1 , тоді $P_1 = H + h_1$.

Потім відкриємо на короткий час кран K з тим, щоб тиск у балоні зрівнявся з атмосферним $P_2 = H$ (при цьому рівні рідини у манометрі зрівнюються). Після цього закриємо кран K . Повітря у балоні швидко розшириться до об'єму V_2 (при цьому, зважаючи на малий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона і навколишнім повітрям не буде). Температура повітря в балоні зменшиться до T_2 (II стан повітря).

Далі чекаємо, доки температура повітря в балоні зрівняється з кімнатною температурою T_1 . Об'єм V_2 залишиться незмінним, а тиск при нагріванні повітря збільшиться до P_3 . Різниця рівнів рідини в манометрі нехай буде h_2 і тоді $P_3 = H + h_2$ (III стан повітря), де H – атмосферний тиск.

Перехід повітря з I стану в II – адіабатичний. Отже за рівнянням Пуассона

$$(p_1 V_1)^\gamma = (p_2 V_2)^\gamma. \quad (162.6)$$

Температури повітря в станах I та III дорівнюють одна одній, тому за законом Бойля–Маріотта

$$p_1 V_1 = p_3 V_2 \quad (162.7)$$

Розв'язавши (162.6) і (162.7) відносно γ одержимо:

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3} \quad (162.8)$$

Розклавши $\lg p_1$ і $\lg p_3$ в ряд Тейлора і обмежившись двома першими членами, матимемо:

$$\begin{aligned} \lg p_1 &= \lg(H+h_1) = \lg H + \frac{h_1}{H} + \dots; \\ \lg p_3 &= \lg(H+h_2) = \lg H + \frac{h_2}{H} + \dots \end{aligned}$$

Підставивши одержані результати в (162.8), остаточно матимемо

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (162.9)$$

Всі розглянуті процеси в балоні віднесено до певної маси повітря, яке залишається під час досліду в балоні.

Порядок виконання роботи

1. При закритому крані K накачати в балон повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідини (100 – 160 мм). Зафіксувати різницю рівнів h_1 , що остаточно встановилася в манометрі після охолодження нагрітого газу до температури навколишнього середовища при стисненні повітря.

2. Відкрити кран K і, коли рівні манометричної рідини зрівняються, швидко закрити його. Через 2-3 хв. зафіксувати різницю рівнів h_2 . За формулою

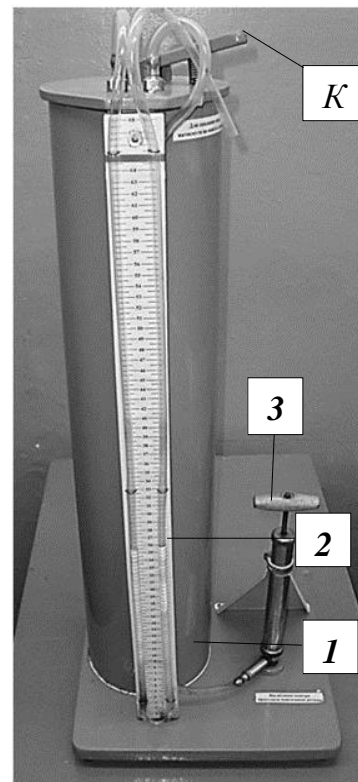


Рис. 162.1. Вид установки для визначення показника адіабати

(162.9) обчислити відношення C_p/C_v для повітря і порівняти з теоретично знайденим, вважаючи повітря двохатомним газом.

3. Дослід повторити не менш, як 6 разів при різних показаннях манометра. Отримані результати занести в таблицю. Обчислити середнє значення шуканої величини і похибки її вимірювань.

Таблиця 162.1

Номер досліджу	h_1 , см	h_2 , см	γ	$\Delta\gamma$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
Середнє	–	–		

4. Шукане значення показника адіабати записати у вигляді $\gamma = \gamma_{\text{сер}} + \Delta\gamma$.

5. Зробити висновок, порівнявши дослідне значення γ з обчисленим теоретично за формулою 162.5.

Контрольні питання

1. Які величини називають молярною, питомою теплоємностями? Назвати їх одиниці вимірювання.
2. Чому $C_p > C_v$?
3. Записати I закон термодинаміки для різних ізопроцесів.
4. Як теоретично визначити γ ?
5. Яку величину називають ступенем вільності? Чому дорівнює число ступенів вільності для різних молекул?

Лабораторна робота № 181
**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИН
МЕТОДОМ СТОКСА**

Мета роботи: ознайомитись з одним із методів вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості рідин та визначити коефіцієнт динамічної в'язкості заданої рідини.

Прилади і матеріали: скляний циліндр висотою 70 см, діаметром 3...6 см, закріплений на підставці; досліджувана рідина (гліцерин, машинне масло чи ін.); сталеві кульки різного діаметру; штангенциркуль, секундомір.

Теоретичні відомості

В'язкість – явище виникнення опору між шарами рідини (газу), які рухаються паралельно один одному з різними швидкостями.

У потоках реальних рідин поблизу поверхонь змочуваних твердих тіл різні шари рідин мають неоднакову швидкість. Швидкість шару, який безпосередньо прилягає до поверхні твердого тіла, дорівнює нулю; а в міру віддалення від поверхні твердого тіла швидкість шарів рідини збільшується. Інакше кажучи, в таких потоках спостерігається рух одних шарів рідини або газу відносно інших (в напрямку, перпендикулярному до потоку, існує градієнт швидкості).

Явище внутрішнього тертя (в'язкості) при ламінарній течії підлягає **закону Ньютона:**

$$\Delta F = -\eta \frac{d\mathcal{V}}{dx} S \quad (181.1)$$

де ΔF – сила внутрішнього тертя, що діє між шарами; η – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; $d\mathcal{V}/dx$ – зміна швидкості руху шарів на одиницю довжини x в напрямі внутрішньої нормалі до поверхні шару – градієнт швидкості.

Фізичний зміст коефіцієнта динамічної в'язкості η видно з формули (181.1). Коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкості) чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що діє на одиницю площі поверхні шару при градієнті швидкості, який дорівнює одиниці.

Крім динамічної в'язкості, використовують також **кінематичну в'язкість** $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, м²/с; де ρ – густина речовини.

В'язкість рідин і газів зумовлена перенесенням імпульсу напрямленого руху їх частинок при переході останніх з шару в шар за рахунок хаотичного руху.

Найбільш поширений метод визначення коефіцієнта в'язкості рідин – **метод Стокса**, який ґрунтується на вимірюванні швидкості рівномірного руху тіла сферичної форми (кульки) в досліджуваній рідині. За законом Стокса сила в'язкості рідини пропорційна коефіцієнту в'язкості η , радіусу кульки r і швидкості її руху \mathcal{V} :

$$F = 6\pi\eta \cdot r \cdot g \quad (181.2)$$

При падінні кульки в рідині ця сила спочатку зростає. Потім при зрівноваженні сили в'язкості, архімедової сили F_A та сили тяжіння P ($P = F + F_A$) рух кульки стає рівномірним згідно I закону Ньютона (див. рис. 181.1). Підставимо значення цих сил і дістанемо

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g + 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot g;$$

Звідки

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_1}{g} \cdot g \cdot r^2, \quad (181.3)$$

де ρ , ρ_1 – густина відповідно тіла та рідини, в якій воно падає; g – прискорення вільного падіння.

Формула (181.3) для визначення в'язкості рідини справедлива для випадку твердої кульки, яка рухається рівномірно без обертання при відсутності турбулентності, та якщо рідина гідродинамічно нестислива, гомогенна і має необмежену протяжність у всіх напрямках (радіус кульки не перевищує 1/10 радіуса циліндра, в якому знаходиться досліджувана рідина).

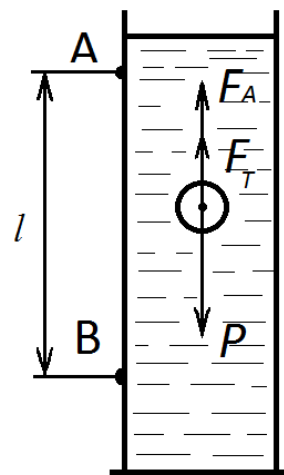


Рис.181.1

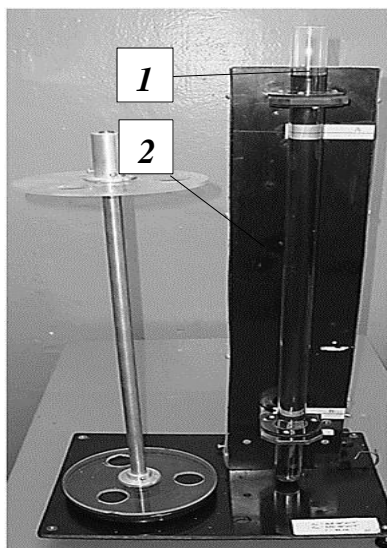


Рис.181.2. Вид установки для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості

Опис приладу

Прилад для визначення в'язкості рідини складається з високого скляного циліндра 1, що закріплений на стійці 2 (див. рис. 181.2), і наповнений досліджуваною рідиною. На стійці зроблені дві позначки: одна A (початок рівномірного руху кульки) на відстані 10...12 см від верхнього рівня рідини, друга B (відмежовує дію дна посудини) на відстані 6...8 см від дна циліндра. Далі визначають час рівномірного падіння кульки в рідині між цими позначками.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти штангенциркулем діаметри трьох-п'яти кульок для проведення дослідів. Дані вимірювань записати у таблицю.

2. Зорієнтувати щодо осі циліндра кульку і опустити її у рідину. Секундоміром визначити проміжок часу, протягом якого кулька проходить відстань між позначками A і B. Щоб уникнути похибки на паралакс, око спостерігача має бути на рівні верхньої позначки і в момент проходження кулькою даної позначки слід включити секундомір. Після цього погляд переміщують на рівень нижньої позначки і в момент проходження кульки через неї необхідно зупинити секундомір, а час руху записати у таблицю.

3. Дослід повторити 3-5 разів з іншими кульками, і результати вимірювань записати в таблицю.

4. Обчислити коефіцієнт в'язкості за формулою

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_1}{l} \cdot g \cdot r^2 \cdot t,$$

де l – відстань між позначками A і B ; t – час руху кульки між позначками A і B .

Таблиця 181.1

$l =$ _____ м; $\rho =$ _____ кг/м³; $\rho_1 =$ _____ кг/м³.

Номер дослідів	d , м	r , м	t , с	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с
1					
2					
3					
4					
5					
Середнє	–	–	–		

5. Записати визначену величину в'язкості досліджуваної рідини у вигляді

$$\eta = \eta_{\text{сер}} + \Delta\eta_{\text{сер}}$$

6. Зробити висновок.

Контрольні питання

1. Дайте визначення явищу внутрішнього тертя.
2. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?
3. Записати математично закони в'язкості Ньютона і Стокса.
4. Чому кулька в рідині рухається рівномірно?

Лабораторна робота № 182
**ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ
ПОВІТРЯ ЗА ЗНАЧЕННЯМ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ**

Мета роботи: вивчити явище переносу в газах, визначити довжину вільного пробігу молекул повітря.

Прилади і матеріали: циліндрична посудина з капіляром; термометр; барометр; секундомір; мензурка; хімічний стакан.

Теоретичні відомості

Молекули газу рухаються хаотично, співударяючись між собою. Між двома послідовними зіткненнями молекули рухаються прямолінійно і рівномірно. Відстань, яку проходять молекули між двома послідовними зіткненнями, називається **довжиною вільного пробігу молекул**. Ці відстані можуть бути різними. Тому вводять поняття про **середню довжину вільного пробігу $\bar{\lambda}$** :

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

де N – число молекул; λ_i – довжина вільного пробігу i -ї молекули, або

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{g}}{z}$$

де \bar{g} – середня швидкість переміщення молекул; z – число зіткнень молекул за 1с;

Оскільки середнє число зіткнень молекули за 1 с

$$z = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \bar{g} \cdot n,$$

то середню довжину вільного пробігу обчислимо за формулою

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

де d – ефективний діаметр молекули (відстань, на яку наближаються дві молекули при співударі); n – концентрація молекул газу.

Знайдемо концентрацію молекул газу з основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії ($p = nkT$):

$$n = \frac{p}{kT}$$

де k -стала Больцмана, p , T – відповідно тиск і температура газу.

Підставимо значення концентрації n в формулу довжини вільного пробігу і одержимо

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

Середня довжина вільного пробігу при сталій температурі обернено пропорційна тиску газу.

Якщо в газі існує просторова неоднорідність густини, температури, швидкості впорядкованого переміщення окремих шарів газу, то хаотичний рух молекул вирівнює ці неоднорідності. При цьому в газах виявляються особливі процеси, які об'єднують під загальною назвою **явища переносу**. До них належать теплопровідність, внутрішнє тертя і дифузія.

Дифузія – це самовільне взаємне проникнення і переміщення частинок однієї речовини у міжмолекулярний простір іншої речовини. Тобто за рахунок переносу маси речовини зрівнюються концентрації молекул речовин в різних частинах посуду.

Перенос маси речовини при дифузії підлягає дослідному **закону Фіка**: маса газу ΔM , яка переноситься за одиницю часу через взятий в середині газу елемент поверхні, прямо пропорційна площі цієї поверхні та швидкості зміни густини газу на одиницю довжини в напрямі нормалі до поверхні, яку розглядають:

$$\Delta M = -D \frac{d\rho}{dx} S$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\frac{d\rho}{dx}$ – градієнт густини; S – площа поверхні; знак «-»

вказує на те, що маса переноситься в напрямі зменшення густини.

Явище теплопровідності виникає, якщо стикаються речовини з різною температурою, тобто молекули мають різну кінетичну енергію. Перенос внутрішньої енергії у формі теплоти підлягає **закону Фур'є**: кількість теплоти ΔQ , що переноситься за одиницю часу через будь-яку поверхню, прямо пропорційна площі поверхні та градієнту температури (швидкості зміни температури на одиницю довжини в напрямі нормалі до цієї площадки):

$$\Delta Q = -\chi \frac{dT}{dx} S,$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури; S – площа

поверхні.

Явище внутрішнього тертя (в'язкості) пов'язане з виникненням сил тертя між шарами газу або рідини, що переміщуються з різними швидкостями. Це явище підлягає **закону Ньютона**: сила внутрішнього тертя F_T , яка виникає між двома паралельними шарами, що рухаються з різними швидкостями, прямо пропорційна площі цих шарів та градієнту швидкості:

$$F_T = -\eta \frac{d\vartheta}{dx} S,$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості; $\frac{d\vartheta}{dx}$ – градієнт швидкості – зміна

швидкості руху шарів на одиницю довжини в напрямі внутрішньої нормалі до поверхні шару.

Коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає між паралельними шарами газу (рідини) одиничної площини при

градієнті швидкості, який дорівнює одиниці.

Для ідеального газу згідно з молекулярно-кінетичною теорією коефіцієнти переносу дорівнюють:

$$D = \frac{1}{3} \cdot \bar{g} \cdot \bar{\lambda}; \quad \eta = \frac{1}{3} \cdot \bar{g} \cdot \bar{\lambda} \cdot \rho; \quad \lambda = \frac{1}{3} \cdot \bar{g} \cdot \bar{\lambda} \cdot \rho \cdot c_V,$$

де \bar{g} – середня швидкість руху молекул; $\bar{\lambda}$ – середня довжина вільного пробігу молекул; ρ – густина речовини; c_V – питома теплоємність при сталому об'ємі.

Явище переносу використовують для обчислення коефіцієнта в'язкості та довжини вільного пробігу молекул.

Опис установки та методу вимірювань

Для газів, як і для рідини, коефіцієнт внутрішнього тертя для стаціонарної ламінарної течії визначають за формулою Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4 \cdot t}{8 \cdot l \cdot V} \quad (182.1)$$

а згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів коефіцієнт η визначають за формулою

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \bar{g} \cdot \bar{\lambda} \cdot \rho \quad (182.2)$$

З рівнянь (182.1) та (182.2) знаходимо

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot l \cdot V} \quad (182.3)$$

де r , l – відповідно радіус капіляра та його довжина; Δp – різниця тисків на кінцях капілярної трубки; V – об'єм газу, який протікає через капіляр за деякий час t .

З рівняння Клапейрона – Менделєєва $pV = \frac{m}{\mu} RT$ знайдемо густину газу:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} \quad (182.4)$$

де p , T – відповідно тиск газу та його температура;

$\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярна маса повітря;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала.

Середню арифметичну швидкість молекул газу визначають за формулою

$$\bar{g} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (182.5)$$

З формули (182.2), враховуючи формули (182.4), (182.5) та значення сталих величин, одержимо формулу для обчислень величини $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \frac{32\eta\sqrt{T}}{p},$$

де η – в'язкість повітря, T – абсолютна температура в аудиторії, p – атмосферний тиск.

Установка для визначення довжини вільного пробігу молекул складається зі скляної посудини *1* з краном *К* (див. рис. 182.1). Посудина закрита гумовою пробкою *2*, в яку вставлена капілярна трубка *3*, через яку засмоктуються повітря тоді, коли через кран витікає вода. Гумовою трубкою посудина з'єднана з водяним манометром *4*, який вимірює різницю тиску: $\Delta p = p_A - p_i$, де p_A, p_i – відповідно атмосферний тиск та тиск повітря в посудині.

$$\Delta p = p_A - p_i = \rho g h = 9,8 \cdot 10^3 h \text{ [Па]},$$

де h – різниця рівнів рідини в манометрі *4*.

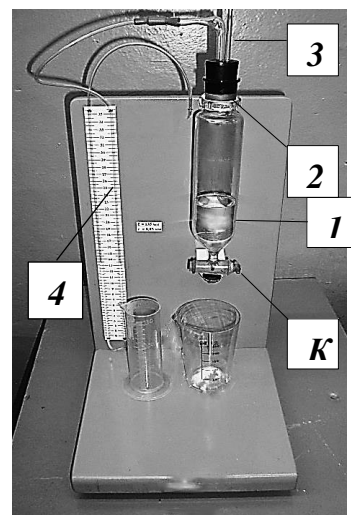


Рис. 182.1. Вид установки для визначення довжини вільного пробігу молекул повітря

Порядок виконання роботи

1. Виміряти і записати атмосферний тиск p_A і температуру повітря T в кімнаті за показами барометра і термометра.

2. Підставити стакан під посудину і відкрити кран *К*. Вода спочатку витікає неперервною струминою. Потім встановлюється стаціонарне протікання повітря через капіляр, що фіксується відсутністю змін в показках манометра, і в цьому стані вода витікає краплями.

3. Підставити мензурку замість стакана при відкритому крані і виміряти об'єм води, що витекла за час, який задає викладач.

4. Виміряти різницю рівнів рідини h в манометрі під час стаціонарної течії повітря через капіляр. Дані вимірювань записати в таблицю:

Таблиця 182.1

$p_A = \underline{\hspace{2cm}}$ Па; $T = \underline{\hspace{2cm}}$ К; $l = \underline{\hspace{2cm}}$ м; $r = \underline{\hspace{2cm}}$ м.

Номер досліджу	$h, \text{м}$	$\Delta p = 9,8 \cdot 10^3 \cdot h$	$t, \text{с}$	$V, \text{м}^3$	$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\bar{\lambda}, \text{м}$	$\Delta \bar{\lambda}, \text{м}$
1							
2							
3							
Середнє	–	–	–	–			

5. Обчислити коефіцієнт внутрішнього тертя за формулою:

$$\eta = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4 \cdot t}{8 \cdot l \cdot V}$$

6. Обчислити середню довжину вільного пробігу за формулою:

$$\lambda = \frac{32\eta \cdot \sqrt{T}}{\rho}$$

7. Дослід (пункти 3–4) повторити ще 2 рази при різному часі натікання і обчислити довжину вільного пробігу молекул повітря.

8. Обчислити абсолютну похибку вимірювань:

$$\Delta\bar{\lambda} = |\bar{\lambda}_{сер} - \bar{\lambda}_i|;$$

та відносну похибку:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} \cdot 100\%.$$

9. Зробити висновок.

Контрольні питання

1. Як залежить середня довжина вільного пробігу молекул газу від тиску та температури?
2. Сформулювати закони, які описують явища переносу.
3. Як зв'язані коефіцієнти переносу маси, імпульсу та енергії зі швидкістю і довжиною вільного пробігу молекул газу?
4. Записати зв'язок між коефіцієнтами переносу.
5. Визначити за результатами досліду ефективний діаметр молекул повітря.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН

Мета роботи: виміряти коефіцієнт поверхневого натягу рідин методом відриву крапель.

Прилади і обладнання: бюретка, посудини з дистильованою водою та досліджуваною рідиною, хімічні стакани, таблиця значень коефіцієнта поверхневого натягу та густини для води та спирту при різних температурах.

Теоретичні відомості

У рідинах середні відстані між молекулами значно менші, ніж у газах. Тому сили взаємодії між молекулами відіграють у рідинах істотну роль. У поверхневому шарі рідини виявляється некомпенсованість міжмолекулярних сил; молекули рідини, що перебувають у цьому шарі, зазнають дії, направленої в середину сили притягання з боку основної частини рідини. Тому поверхневий шар рідини спричиняє великий внутрішній тиск на неї.

Молекули поверхневого шару мають кінетичну енергію теплового руху і потенціальну енергію, обумовлену силами міжмолекулярної взаємодії. Середню кінетичну енергію молекул визначають за температурою рідини. У рівноважному стані температура стала в усьому об'ємі рідини, тому кінетична енергія усіх молекул рідини однакова, хоча потенціальна енергія їх різна. Це обумовлено тим, що на молекулу діють сили взаємодії, результуюча яких дорівнює нулю, якщо молекула знаходиться в рідині. На молекулу ж в поверхневому шарі діють, в основному, сили взаємодії з молекулами рідини, результуюча яких направлена у бік рідини. Тому при переході молекул з внутрішніх частин рідини на її поверхню вони повинні виконувати роботу проти направлених в середину рідини сил притягання з боку інших молекул рідини. Ця робота витрачається на збільшення потенціальної енергії молекул, які переходять у поверхневий шар.

В стані стійкої рівноваги поверхнева потенціальна енергія рідини має бути мінімальною. Тому рідина, на яку не діють зовнішні сили, при умові її практичної нестисливості повинна набирати форму сфери. Отже, сили поверхневого шару повинні зумовлювати тенденцію рідини зменшувати свою поверхню. Зрозуміло, що ці сили мають бути направленими по дотичних до поверхні рідини.

Поверхневим натягом σ (коефіцієнтом поверхневого натягу) називають величину, яка чисельно дорівнює відношенню сили ΔF , що діє на ділянку контуру поверхні рідини, до довжини Δl цієї ділянки.

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (190.1)$$

Якщо $\Delta F = 1\text{Н}$, а $\Delta l = 1\text{м}$, із формули (190.1) дістанемо одиницю поверхневого натягу $[\sigma] = 1\text{Н/м}$.

Можливий також енергетичний підхід до тлумачення поверхневого натягу на межі двох фаз. Для збільшення поверхні рідини потрібно виконати

роботу проти сил поверхневого натягу, яку при оборотному ізотермічному процесі можна виразити формулою:

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

де σ – питома поверхнева енергія.

Отже σ – **коефіцієнт поверхневого натягу** – чисельно дорівнює роботі ізотермічного утворення одиниці площі поверхні рідини.

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від хімічного складу рідини та від її температури: з підвищенням температури він зменшується і перетворюється в нуль при критичній температурі.

Опис приладів та методу вимірювань

Існує ряд експериментальних методів визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини. Найбільш простий з них – це метод відриву крапель. Далі теоретично обґрунтуємо його. При порівняно невеликій швидкості витікання рідин з вузької трубки утворюються краплі майже сферичної форми. Крапля зростає в розмірі і відривається тоді, коли її вага дорівнює силі поверхневого натягу. Перед відривом краплі виникає «нитка», по якій і відбувається розрив (див. рис. 190.1); тоді справедлива наступна рівність

$$2\pi r\sigma = P,$$

звідки

$$\sigma = \frac{P}{2\pi \cdot r}$$

де P – вага краплі, r – її радіус, σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Вагу краплі можна виміряти, але вимірювання радіуса краплі пов'язане з деякими труднощами.

Відносний спосіб вимірювання σ дозволяє не вимірювати безпосередньо радіус краплі. Він полягає у порівнянні відомого значення коефіцієнта поверхневого натягу рідини із невідомим. Тоді можна записати для еталонної рідини (дистильована вода)

$$2\pi R\sigma_e = P_e;$$

для невідомої рідини

$$2\pi R\sigma = P$$

де P_e, P – вага краплі відповідно еталонної і досліджуваної рідин, звідки

$$\frac{\sigma_e}{\sigma} = \frac{P_e}{P} \quad (190.2)$$

Щоб не визначати вагу краплі, замінюють у цій формулі вагу краплі P її значенням через об'єм, визначений за шкалою бюретки V , густину рідини ρ і кількість крапель.

Тобто: для досліджуваної рідини

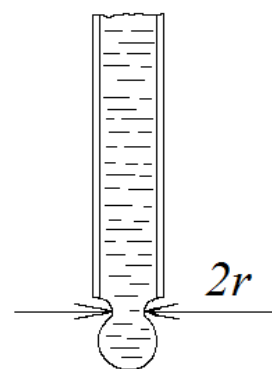


Рис. 190.1.

$$P = mg = \frac{V}{n} \rho \cdot g ;$$

для еталонної рідини

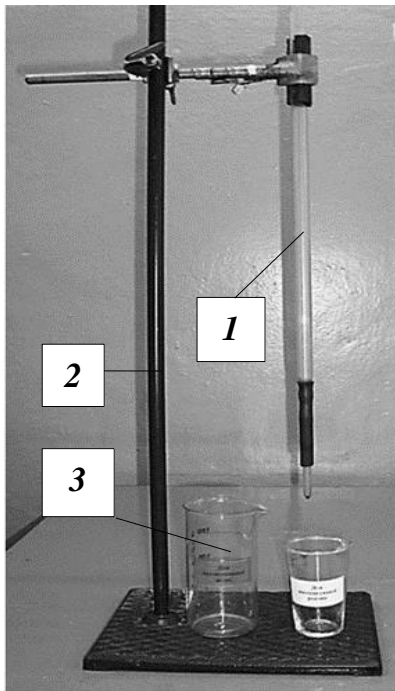


Рис. 190.2. Вид установки для визначення коефіцієнту поверхневого натягу

$$P_e = m_e g = \frac{V}{n_e} \rho_e \cdot g ;$$

де m , m_e – маса крапель; $\frac{V_i}{n_i}$ – об'єм крапель; g – прискорення вільного падіння; ρ - густина рідини.

Підставимо значення P та P_e в формулу (190.2) і одержимо формулу для обчислювання коефіцієнта поверхневого натягу досліджуваної рідини:

$$\sigma = \sigma_e \frac{n_e \rho}{n \rho_e} \quad (190.3)$$

де σ_e – коефіцієнт поверхневого натягу еталонної рідини;

n_e – кількість крапель еталонної рідини;

ρ_e – густина еталонної рідини;

n – кількість крапель досліджуваної рідини;

ρ – густина досліджуваної рідини.

За еталонну рідину рекомендують брати дистильовану воду.

Прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу складається з бюретки 1, закріпленої на штативі 2. Рідину, що витікає з бюретки, збирають у скляні хімічні стакани 3.

Порядок виконання роботи

1. Промити бюретку дистильованою водою (2 - 3 см³).
2. Налити у бюретку 15...20 см³ дистильованої води, підставити під бюретку хімічний стакан і відрегулювати швидкість витікання води так, щоб можна було рахувати краплі.
3. Обчислити число крапель в одному і тому ж об'ємі рідини, що витікає. Для вимірювання досить 2 см³. Вимірювання повторити 5 разів, їх результати записати у таблицю та обчислити середнє значення числа крапель у взятому об'ємі рідин.
4. Після вимірювань воду злити у посудину з дистильованою водою.
5. Налити у бюретку досліджувану рідину об'ємом 15...20 см³ і виміряти число крапель у тому ж об'ємі рідини (2 см³). Вимірювання повторити 5 разів, дані вимірювань записати у таблицю та обчислити середнє значення числа крапель у взятому об'ємі рідин.
6. Взяти з таблиці (див. ДОДАТОК I) значення σ_e і ρ_e при кімнатній температурі. За середнім значенням числа крапель обчислити коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини за формулою (190.3).

Таблиця 190.1

Величина	Речовина					
	Дистильована вода			Досліджувана рідина		
Число крапель, n						
Середнє значення числа крапель						
Густина ρ , кг/м ³						
Коефіцієнт поверхневого натягу σ , Н/м						

7. Зробити висновок.

Контрольні запитання

1. Яка величина називається коефіцієнтом поверхневого натягу?
2. Чому при відсутності зовнішніх сил крапля рідини набуває сферичної форми?
3. Від чого залежить коефіцієнт поверхневого натягу?
4. За яких умов відбувається відрив краплі від капіляра?

Лабораторна робота № 191
МАКСВЕЛЛІВСЬКИЙ РОЗПОДІЛ МОЛЕКУЛ ГАЗУ ЗА ШВИДКОСТЯМИ

Мета роботи: ознайомитись з методикою обчислень та побудовою функції Максвелла для розподілу молекул за швидкостями. Визначити частку молекул, швидкості яких лежать в заданому інтервалі швидкостей.

Прилади і матеріали: аркуш міліметрового паперу розміром 200×200 мм, таблиці зі значеннями залежності функції розподілу за швидкостями при заданій температурі.

Теоретичні відомості

У довільному макроскопічному об'ємі молекули газу рухаються з різними швидкостями (від 0 до ∞ м/с). Оскільки молекули мають скінченні розміри і безперервно стикаються одна з одною (за нормальних умов молекула робить 10^9 зіткнень за 1 с), неможливо підрахувати число молекул, які мають задане значення швидкості. Але можна обчислити число молекул, швидкості яких лежать в інтервалі від \mathcal{V} до $\mathcal{V} + d\mathcal{V}$.

Вперше Максвелл теоретично розв'язав задачу про розподіл молекул ідеального газу за швидкостями. Вчений розглядав газ як сукупність великої кількості однакових молекул в умовах термодинамічної рівноваги (p , V , T постійні) за відсутності зовнішнього силового поля. **Функцію розподілу молекул газу за швидкостями** Максвелл одержав за допомогою методів теорії ймовірностей. Вона має вигляд:

$$F_M = \frac{dn}{nd\mathcal{V}_x d\mathcal{V}_y d\mathcal{V}_z} = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m(\mathcal{V}_x^2 + \mathcal{V}_y^2 + \mathcal{V}_z^2)}{2kT}} \quad (191.1)$$

Ця функція визначає ймовірне число молекул масою m , які при заданій температурі T мають проекції швидкості на осі координат, що лежать в інтервалі від \mathcal{V}_x до $\mathcal{V}_x + d\mathcal{V}_x$; \mathcal{V}_y до $\mathcal{V}_y + d\mathcal{V}_y$; \mathcal{V}_z до $\mathcal{V}_z + d\mathcal{V}_z$.

Тоді число молекул dn , абсолютне значення швидкостей яких лежить в інтервалі від \mathcal{V} до $\mathcal{V} + d\mathcal{V}$ визначають за формулою

$$dn = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m\mathcal{V}^2}{2kT}} \cdot 4\pi\mathcal{V}^2 d\mathcal{V} \quad (191.2)$$

Оскільки

$$d\mathcal{V}_x d\mathcal{V}_y d\mathcal{V}_z = 4\pi\mathcal{V}^2 d\mathcal{V}; \quad m = \frac{\mu}{N_A}; \quad R = kN_A,$$

де μ – молярна маса; N_A – число Авогадро; R – універсальна газова стала; k – стала Больцмана; m – маса однієї молекули, то рівняння (191.1) запишемо у вигляді:

$$F_M = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\mathcal{G}} = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m\mathcal{G}^2}{2RT}} \cdot 4\pi \mathcal{G}^2 \quad (191.2)$$

З цієї формули видно, що конкретний вид функції залежить від природи газу (від його молярної маси) та від параметра його стану (температури).

Із статистичного розподілу молекул за швидкостями були встановлені наступні висновки:

1) Який би не був розподіл молекул за швидкостями, в термодинамічно рівноважній системі завжди встановлюється розподіл Максвелла.

2) Якщо в системі вже встановився розподіл Максвелла, то він буде існувати нескінченно довго.

Максимум функції розподілу досягається при найбільш ймовірній швидкості руху молекул. Для визначення значення **ймовірної швидкості** треба використати умову для максимуму виразу F_M , формули (191.2) тобто

$$\frac{dF_M}{d\mathcal{G}} = 4\pi \left(\frac{\mu}{2\pi RT} \right)^{3/2} \cdot 2\mathcal{G} \left(1 - \frac{\mu\mathcal{G}^2}{2RT} \right) = 0$$

Звідки

$$\mathcal{G}_{\text{ім}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (191.3)$$

Крім найбільш ймовірної швидкості, з функції розподілу можна обчислити **середню арифметичну швидкість** поступального руху молекул:

$$\bar{\mathcal{G}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}},$$

та **середню квадратичну швидкість** молекул:

$$\bar{\mathcal{G}}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

На рис. 191.1 наведено криві закону розподілу молекул за швидкостями при T_1 та T_2 . Частина молекул dn газу, швидкості яких лежать в інтервалі від \mathcal{G} до $\mathcal{G} + d\mathcal{G}$ чисельно дорівнює площі dS криволінійної трапеції (заштрихована ділянка на рис. 191.1). Вся площа, обмежена кривою розподілу і віссю абсцис, чисельно дорівнює числу молекул, швидкості яких мають різні значення від 0 до ∞ .

Якщо ввести відносну швидкість руху молекул u , то функція Максвелла матиме вигляд:

$$F_M = \frac{dn}{nd\mathcal{G}} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2} \cdot u^2 \quad (191.4)$$

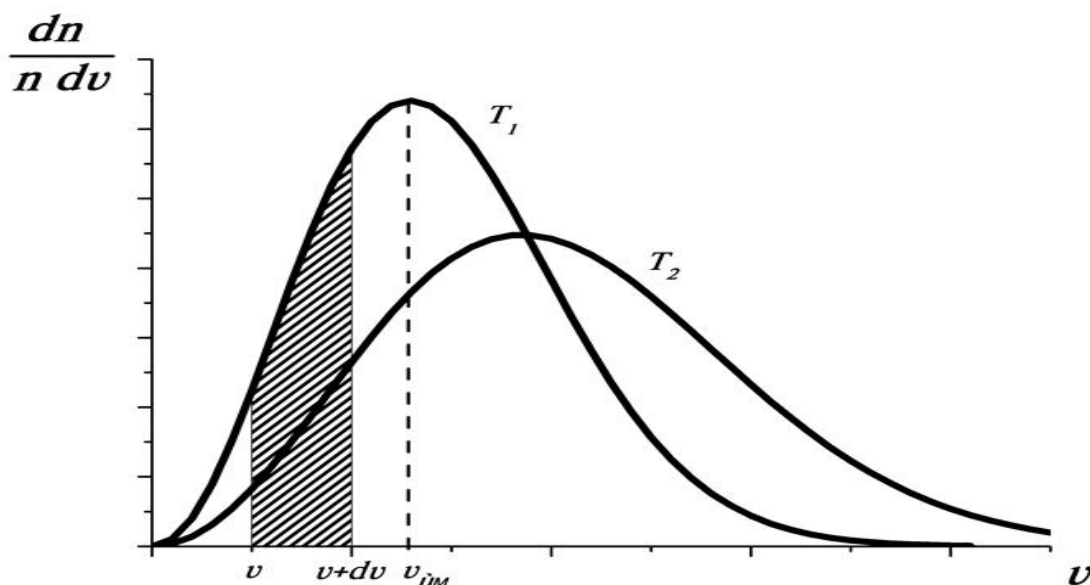


Рис. 191.1. Графік закону розподілу молекул газу за швидкостями

Відносне число молекул, швидкості яких мають значення від 0 до u_i , буде:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\int_0^{u_s} dn}{n} = \int_0^{u_s} \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 du \quad (191.5)$$

Обчислення інтегралу (191.5) за частинами дає наступну формулу:

$$\frac{\Delta n}{n} = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} u_i e^{-u_i^2} + \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_i \sqrt{2}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (191.6)$$

Інтеграл в (191.6) є інтегралом ймовірності, значення якого наведені у ДОДАТКУ II до лабораторної роботи для значень верхньої межі інтегрування $\sqrt{2} u_i$.

Порядок виконання роботи

1. На міліметровці за наданими в таблиці значеннями $F_M = f(\vartheta)$ побудувати на одних і тих же осях координат дві криві розподілу молекул.

Масштаб:

для ϑ : 1 мм – 10 м/с;

для $F_M = \frac{dn}{nd\vartheta}$: 10 мм – $1 \cdot 10^{-3}$.

2. За формулою (191.3) обчислити для двох температур ймовірну швидкість і визначити її значення графічно за положенням максимуму на кривих розподілу. Зробити висновок.

3. Визначити відносне число молекул $\frac{\Delta n}{n}$, які мають швидкість в інтервалі від $\vartheta_1 = 200$ м/с до $\vartheta_2 = 300$ м/с для заданої температури. Для цього необхідно:

а) визначити площу S_0 , що лежить під кривою розподілу для заданої температури.

б) визначити площу S_1 , обмежену швидкостями \mathcal{V}_1 і \mathcal{V}_2 та кривою розподілу при T_1 .

в) відношення S_1 до S_0 визначає відносне число молекул, швидкості яких лежать в межах від \mathcal{V}_1 до \mathcal{V}_2 при T_1 .

г) повторити пункти б), в) для температури T_2 .

4. Обчислити відносні швидкості u_1 і u_2 як відношення швидкостей $\mathcal{V}_1 = 200$ м/с і $\mathcal{V}_2 = 300$ м/с до ймовірної швидкості при даній температурі.

5. За формулою (191.6) підрахувати відносне число молекул зі швидкостями від 0 до u_1 і від 0 до u_2 . Різниця між цими величинами і дає значення відносного числа молекул зі швидкостями від u_1 до u_2 тобто від \mathcal{V}_1 до \mathcal{V}_2 :

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta n_2}{n} - \frac{\Delta n_1}{n}$$

6. Порівняти результати обчислень в пунктах 3 і 5 і зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Поясніть суть розподілу Максвелла молекул газу за швидкостями.
2. Які висновки були встановлені з розподілу Максвелла?
3. Запишіть формули для визначення середньої арифметичної, середньої квадратичної та ймовірної швидкостей молекул газу.
4. Яким чином можна обчислити долю молекул, що мають швидкості від \mathcal{V}_1 до \mathcal{V}_2 ?
5. Поясніть, чому площа під кривими розподілу при T_1 і T_2 однакова?

ДОДАТОК І. Таблиця значень поверхневого натягу і густини для води і етилового спирту при різних температурах

T, К	t ⁰ , С	Вода		Етиловий спирт	
		σ, Н/м	ρ, кг/м ³	σ, Н/м	ρ, кг/м ³
287	14 ⁰	73,4·10 ⁻³	999,27	22,9·10 ⁻³	
288	15 ⁰	73,3·10 ⁻³	999,13	22,8·10 ⁻³	
289	16 ⁰	73,1·10 ⁻³	998,97	22,7·10 ⁻³	
290	17 ⁰	73,0·10 ⁻³	998,80	22,6·10 ⁻³	
291	18 ⁰	72,8·10 ⁻³	998,62	22,5·10 ⁻³	
292	19 ⁰	72,7·10 ⁻³	998,43	22,4·10 ⁻³	
293	20 ⁰	72,5·10 ⁻³	998,32	22,3·10 ⁻³	
294	21 ⁰	72,4·10 ⁻³	998,02	22,1·10 ⁻³	
295	22⁰	72,2·10⁻³	997,80	22,0·10⁻³	790
296	23 ⁰	72,0·10 ⁻³	997,57	21,9·10 ⁻³	
297	24 ⁰	71,9·10 ⁻³	997,32	21,8·10 ⁻³	
298	25 ⁰	71,8·10 ⁻³	997,07	21,7·10 ⁻³	
299	26 ⁰	71,6·10 ⁻³	996,81		
300	27 ⁰	71,5·10 ⁻³	996,54		
301	28 ⁰	71,3·10 ⁻³	996,26		

ДОДАТОК II. Значення інтегралу ймовірності
для значень верхньої межі інтегрування $\sqrt{2} u_i$

u_i	Значення інтегралу ймовірності	u_i	Значення інтегралу ймовірності
0,00	0	1,05	0,7062
0,05	0,0398	1,10	0,7287
0,10	0,0797	1,15	0,7498
0,15	0,1192	1,20	0,7699
0,20	0,1585	1,25	0,7888
0,25	0,1974	1,30	0,8064
0,30	0,2358	1,35	0,8230
0,35	0,2736	1,40	0,8385
0,40	0,3108	1,45	0,8530
0,45	0,3472	1,50	0,8664
0,50	0,3829	1,55	0,8788
0,55	0,4176	1,60	0,8904
0,60	0,4515	1,65	0,9010
0,65	0,4844	1,70	0,9109
0,70	0,5161	1,75	0,9198
0,75	0,5468	1,80	0,9281
0,80	0,5763	1,85	0,9356
0,85	0,6046	1,90	0,9426
0,90	0,6319	1,95	0,9488
0,95	0,6578	2,00	0,9645
1,00	0,6827	2,05	0,9596
		2,10	0,9642
		2,20	0,9720
		2,25	0,9756
		2,50	0,9876
		2,75	0,9940
		3,00	0,9973
		3,20	0,9986
		3,50	0,99953

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	3
Лабораторна робота № 161.	
ВИЗНАЧЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ГАЗОВОЇ СТАЛОЇ	4
Лабораторна робота № 162.	
ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ МЕТОДОМ АДАБАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ	7
Лабораторна робота № 181.	
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИН МЕТОДОМ СТОКСА	11
Лабораторна робота № 182.	
ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБИГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ ЗА ЗНАЧЕННЯМ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ	14
Лабораторна робота № 190.	
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН.	19
Лабораторна робота № 191.	
МАКСВЕЛЛІВСЬКИЙ РОЗПОДІЛ МОЛЕКУЛ ГАЗУ ЗА ШВИДКОСТЯМИ	23
ДОДАТОК I	27
ДОДАТОК II	28