

Лабораторна робота № Т7

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ ЗА СТАЛИХ ТИСКУ ТА ОБ'ЄМУ

Мета роботи – вивчення процесів в ідеальних газах, визначення відношення теплоємностей $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$.

Теорія методу

Питома теплоємність речовини називається величина, що дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси речовини для підвищення її температури на один Кельвін,

$$c = \frac{dQ}{m dT} \quad (3.1)$$

Теплоємність одного моля речовини називається **молярною теплоємністю**:

$$\mu c = \frac{dQ}{\frac{m}{\mu} dT} \quad (7.2)$$

де m – маса; μ – молярна маса речовини.

Теплоємність газів залежить від умов, за яких відбувається їх нагрівання. Згідно з першим законом термодинаміки кількість теплоти dQ , надана системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU та на виконання системою роботи dA проти зовнішніх сил:

$$dQ = dU + dA \quad (3.3)$$

Приріст внутрішньої енергії ідеального газу при зміні його температури на dT

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT \quad (3.4)$$

де i – число ступенів вільності молекули, під яким розуміється число незалежних координат, які визначають положення молекули в просторі: $i = 3$ для одноатомної молекули; $i = 5$ для двоатомної молекули; $i = 6$ для трьох- та багатоатомних молекул; $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова стала.

При розширенні газу система виконує роботу

$$dA = p dV \quad (3.5)$$

Якщо газ нагрівається за сталого об'єму $V = \text{const}$, то $dA = 0$ і відповідно до (3.3) вся отримана газом кількість теплоти витрачається тільки на збільшення його внутрішньої енергії $dQ = dU$ і, отже, враховуючи (3.5), молярна теплоємність ідеального газу за сталого об'єму

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R \quad (3.6)$$

Якщо газ нагрівається за сталого тиску $P = \text{const}$ то отримана газом кількість теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU та виконання роботи dA :

$$dQ_P = dU + dA$$

Тоді молярна теплоємність ідеального газу за сталого тиску

$$C_p = \frac{dU}{dT} + P\left(\frac{dV}{dT}\right)_P . \quad (3.7)$$

Використовуючи рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клапейрона),

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

можна довести, що для моля газу

$$P\left(\frac{dV}{dT}\right)_P = R$$

і, отже,

$$C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R \quad (3.8)$$

Відношення теплоємностей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} \quad (3.9)$$

Адіабатичний процес відбувається без теплообміну із зовнішнім середовищем ($dQ = 0$). Практично він може бути здійсненим у системі, що оточена теплоізолюючою оболонкою, але оскільки для теплообміну потрібен деякий час, то адіабатичним можна вважати також процес, який відбувається досить швидко, так, що система не встигає вступити в теплообмін із навколишнім середовищем. Перший закон термодинаміки з урахуванням (3.4), (3.5) та (3.6) для адіабатичного процесу має вигляд

$$\frac{m}{\mu} C_v dT = P \cdot dV \quad (3.10)$$

Продиференціювавши рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$PdV + V dP = \frac{m}{\mu} R dT$$

і підставивши dT до формули (7.10), дістанемо:

$$(C_v + R)PdV + C_v V dP = 0$$

Враховуючи співвідношення між молярними теплоємностями ідеального газу за сталих тиску та об'єму, яке описується формулою Майєра (7.8), а також (7.9), маємо

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0.$$

Розв'язок записаного диференціального рівняння має вигляд

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (3.11)$$

Рівняти (3.11) називається рівнянням адіабати (рівнянням Пуассона), а введена в (3.9) величина γ – показником адіабати.

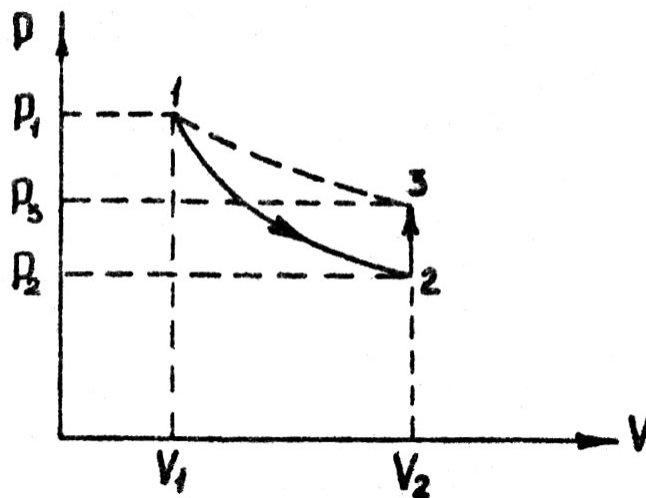


Рис.3.1

Метод визначення показника адиабати, запропонований Клеманом і Дезормом (1819 р.), ґрунтується на вивченні параметрів деякої маси газу, яка переходить з одного стану в інший двома послідовними процесами – адиабатичним та ізохоричним. Ці процеси на діаграмі $P \sim V$ (рис.3.1) зображені відповідно кривими 1-2 та 2-3. Якщо в балон, з'єднаний з відкритим водяним манометром, накачати повітря і почекати до встановлення теплової рівноваги з навколишнім середовищем, то в цьому початковому стані (1) газ має параметри P_1, V_1, T_1 , причому температура газу в балоні дорівнює температурі навколишнього середовища $T_1 = T_0$, а тиск $P = P_0 + P'$ трохи більший від атмосферного тиску.

Якщо тепер на короткий час з'єднати балон з атмосферою, то станеться адиабатичне розширення повітря. При цьому стан повітря в балоні відповідає стану 2, а тиск газу знижується до атмосферного $P_2 = P_0$. Маса повітря, що залишається у балоні, яка в стані 1 займала частину об'єму балона, розширюючись, займає весь об'єм V_2 . При цьому температура повітря, що залишається у балоні, знижується до T_2 . Оскільки процес 1-2 є адиабатичним, до нього можна застосувати рівняння Пуассона (7.11):

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad \text{або} \quad \frac{T_1^\gamma}{P_1^{(\gamma-1)}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{(\gamma-1)}}$$

Звідки

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_0}{V_2}\right)^\gamma \quad (3.12)$$

Після короткочасного з'єднання балона з атмосферою охолоджене адиабатичним розширенням повітря в балоні буде нагріватись (процес 2-3) до температури навколишнього середовища $T_3 = T_0$ за сталого об'єму ($V_3 = V_2$). При цьому тиск у балоні підвищиться до $P_3 = P_2 + P''$. Оскільки процес 2-3 є ізохоричним, то для нього можна застосувати закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

звідки

$$\frac{P_0 + P'''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2} \quad (3.13)$$

З рівнянь (3.12) та (3.13) маємо:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{(\gamma-1)} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0}\right)^\gamma$$

Логарифмуємо останній вираз:

$$(\gamma - 1) \ln\left(1 + \frac{P'}{P_0}\right) = \gamma \ln\left(1 + \frac{P''}{P_0}\right)$$

Оскільки надлишкові тиски P' та P'' дуже малі в порівнянні з атмосферним тиском P_0 , то враховуючи, що при $x \ll 1$ $\ln(1 + x) = x$, отримуємо:

$$(\gamma - 1) P' = \gamma P''$$

звідки

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''} \quad (3.14)$$

Надлишкові тиски повітря P' та P'' вимірюють за допомогою U -подібного манометра за різницею рівнів рідини з густиною ρ :

$$P' = \rho g H, \quad P'' = \rho g h \quad (3.15)$$

З (3.14) та (3.15) дістанемо розрахункову формулу для визначення γ .

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \quad (3.16)$$

Експериментальна установка

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ призначена

експериментальна установка ФПТ 1-6, загальний вигляд якої показаний на рис .3.2

Установка складається із скляної колби (2), з'єднаної з відкритим водяним манометром (1). Повітря нагнітається в колбу мікрокомпресором (9), розміщеним у блоці приладів (5). Вмикається мікрокомпресор тумблером "ВОЗДУХ", який знаходиться на передній панелі блока приладів. Кран (4), що приводиться в дію за допомогою рукоятки, виведеної на передню панель блока приладів, дозволяє з'єднувати колбу з атмосферою при переведенні рукоятки в положення "Открыто".

Решта позицій на рис.3.2 означає: 3 – блок робочого елемента; 6 – блок живлення; 7 – рукоятка крана; 8 – трансформатор; 10 – стояк.

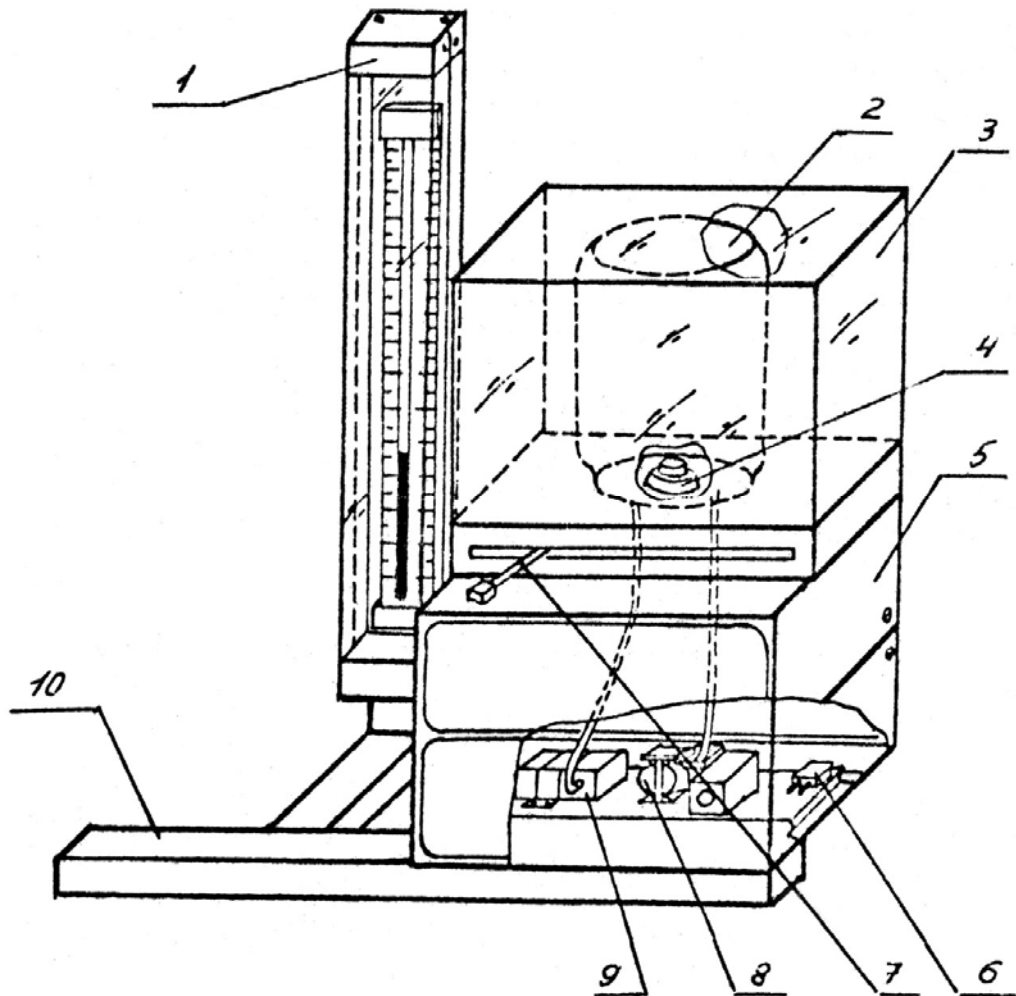


Рис. 3.2

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "СЕТЬ".
2. Встановити рукоятку в положення "Закрито" і увімкнути подачу повітря в колбу тумблером "ВОЗДУХ".
3. За допомогою манометра контролювати тиск у колбі. Коли різниця рівнів води в манометрі досягне 150...250 мм вод.ст., вимкнути подачу повітря.
4. Почекати 2...3 хв., доки температура повітря в колбі зрівняється з температурою навколишнього повітря T_0 , у колбі при цьому встановиться сталий тиск $P_1 = P_0 + \rho gH$. Визначити різницю рівнів H , яка встановилася в колінах манометра, і отримане значення занести до табл.3.1
5. На короткий час з'єднати колбу з атмосферою, швидко перевівши рукоятку крана з одного крайнього положення в інше (протилежне).
6. Почекати 2...3 хв. доки в колбі встановиться сталий тиск $P_3 = P_0 + \rho gh$. Визначити різницю рівнів h , яка встановилася в колінах манометра, і отримане значення занести до табл.3.1.
7. Повторити виміри за пп.2-6 не менш як 10 разів для різних значень величини H .
8. Вимкнути установку тумблером "СЕТЬ".

Таблиця 3.1

№ виміру	H , мм вод. ст.	h , мм вод. ст.	γ
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			PSV

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного виміру визначити за формулою (3.16) відношення теплоємностей γ . Знайти середнє значення $\langle \gamma \rangle$.
2. Оцінити похибку результатів вимірювань за вказівкою викладача.

Контрольні запитання

1. Що таке ізопроцеси і яким законам вони підпорядковуються? Накреслити графіки цих процесів.
2. Сформулюйте перший закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного та адіабатичного процесів.
3. Дайте визначення питомої та молярної теплоємностей. В яких одиницях СІ вони вимірюються?
4. Особливості теплоємності газу. Виведіть формулу для молярних теплоємностей C_V та C_P ідеального газу.
5. Дайте визначення числа ступенів вільності молекули. Чому дорівнює величина i для 1-, 2-, 3- та багатоатомного ідеальних газів?
6. Який процес називається адіабатичним? Виведіть рівняння Пуассона.
7. Розрахуйте теоретичне значення показника адіабати для 1-, 2- та 3-атомного ідеальних газів.
8. У чому полягає метод Клемана та Дезорма для визначення відношення $\frac{C_P}{C_V}$.
9. Опишіть робочий цикл експериментальної установки за P-V діаграмою.
10. Виведіть розрахункову формулу для визначення γ .
11. Як і чому змінюється температура газу в колбі при проведенні досліду?
12. Як позначаються на результатах експерименту надто швидке та надто повільне переміщення рукоятки крана при проведенні досліду?