

Лабораторна робота № 2.26

Визначення відношення питомих теплоємностей газів (c_p / c_v) методом адіабатного розширення

Прилади й матеріали: закритий скляний балон з краном-клапаном, манометр, поршневий ручний насос.

Мета роботи: ознайомлення з газовими процесами, вимір відношення питомих теплоємностей газів методом адіабатного розширення

Теоретичний вступ

Теплоємність тіла $C_{\text{тіла}}$ - це фізична величина, яка дорівнює кількості теплоти, що необхідно передати тілу, щоб змінити його температуру на один кельвін (градус):

$$C_{\text{тіла}} = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Теплоємність залежить від кількості речовини в тілі. **Питомою теплоємністю** c називається теплоємність в розрахунку на 1 кг речовини:

$$c = C_{\text{тіла}}/m,$$

а **молярною теплоємністю** C - відповідно, на 1 моль речовини:

$$C = C_{\text{тіла}}/\nu = c M,$$

де $\nu = m/M$ - кількість молей речовини в тілі, M - маса моля.

Теплоємність залежить від умов, за яких відбувається нагрівання. Можна проводити нагрівання при постійному об'ємі або при постійному тиску. Позначення теплоємності при цьому супроводжується відповідними індексами: C_v , C_p . При цьому C_p завжди більше C_v . Це пояснюється тим, що для нагрівання газу з постійним об'ємом вся кількість теплоти йде тільки на збільшення внутрішньої енергії газу. При нагріванні ж газу при постійному тиску, крім теплоти, що йде на підвищення внутрішньої енергії газу, необхідна ще теплота для роботи на розширення газу (для підтримки тиску сталим).

Відношення молярних теплоємностей

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v},$$

або, як випливає з визначення, рівне йому відношення питомих теплоємностей

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

називається **показником адіабати** (коефіцієнтом Пуассона) і входить в рівняння, що зв'язують параметри газу в адіабатному процесі:

$$pV^\gamma = const, \quad TV^{\gamma-1} = const, \quad pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = const.$$

Адіабатним процесом називається така зміна стану газу, яка відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем. Тоді перший закон термодинаміки

$$dQ = dU + dA$$

для адіабатного процесу набуде вигляду $dU + dA = 0$, або

$$dA = -dU.$$

Отже, робота розширення буде відбуватися за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу, і температура знизиться.

У разі адіабатного стиснення, коли роботу здійснюють зовнішні сили, а робота газу є від'ємною, температура газу буде підвищуватися.

На практиці адіабатність досягається *достатньою швидкістю* зміни стану газу. Швидкість протікання процесу має бути досить великою, щоб можна було знехтувати обміном тепла з навколишнім середовищем.

Теорія методу і опис установки.

Головною частиною установки (рис. 1) є великий скляний балон *Б*, наповнений повітрям і з'єднаний гумовими трубками з манометром *М*, а через кран *К₂* - з насосом *Н*. Кран *К₁* з'єднує балон з навколишнім повітрям.

Нехай спочатку в балоні був атмосферний тиск p_0 . За допомогою насоса накачаємо в балон невелику кількість повітря і закриємо кран *К₂*. Тиск в балоні підвищиться.

Надлишок тиску над атмосферним тиском можна визначити за манометром. Позначимо через p_1 тиск стисненого повітря всередині балона, що відповідає показанням манометра h_1 (різниці рівнів в обох колінах манометра). Ясно, що

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1.$$

Тут $\rho g h_1$ – тиск стовпчика h_1 манометричної рідини, ρ - густина цієї рідини, g - прискорення вільного падіння.

Коли газ в балоні, що нагрівся при стисненні, охолоне і прийме кімнатну температуру, можна починати дослід.

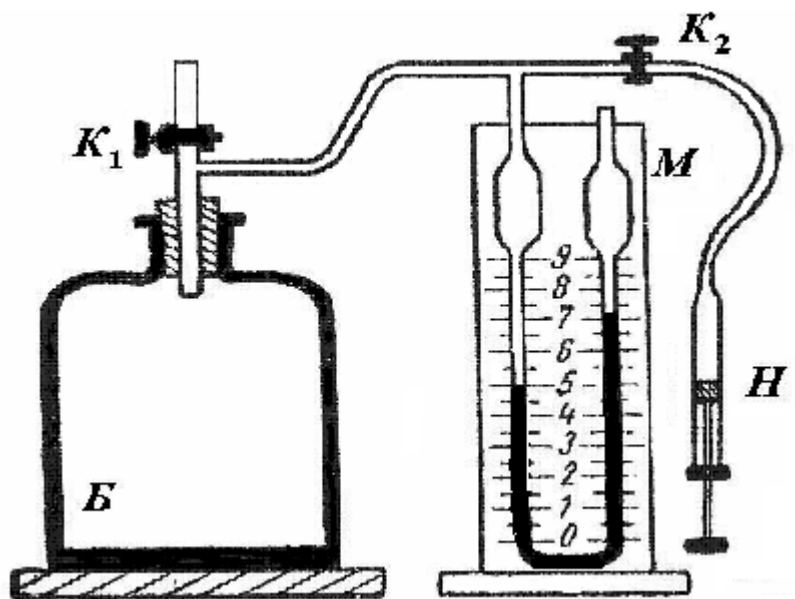


Рис. 1.

За характером процесів в досліді зручно простежити за допомогою pV -діаграми (рис. 2).

Виділимо в балоні деякий об'єм газу V_0 , який доходить, наприклад, до рівня пунктирної прямої ab (рис. 3). Цей об'єм газу ми і будемо розглядати в подальшому.

Нехай маса повітря в об'ємі V_0 становить m . Стан цієї маси газу m , що відповідає початку досліді, на діаграмі pV зображується точкою 1 з параметрами p_1, V_0, T_0 (рис. 2).

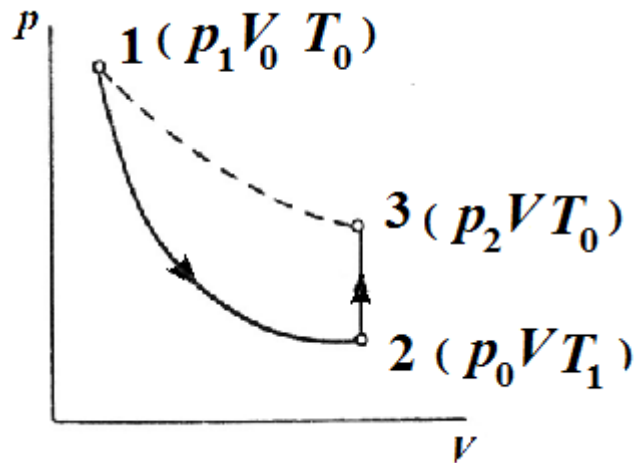


Рис.2

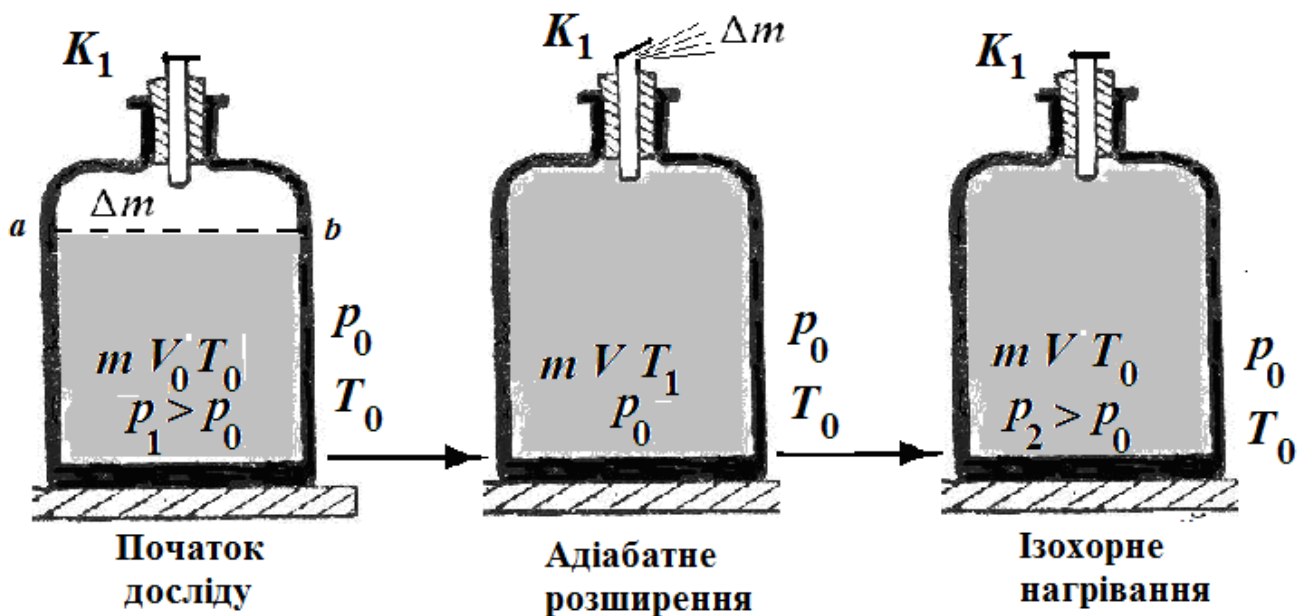


Рис. 3

На рис.3 T_0 - температура навколишнього повітря, тиск стисненого повітря більше атмосферного, $p_1 > p_0$.

Якщо тепер швидко на короткий час (0,3 - 0,5 с) відкрити клапан K_1 , то повітря в об'ємі V_0 , розширюючись при відкритті клапана, займе тепер весь об'єм балона V . Маса Δm повітря виходить з балона. Повітря в посудині буде розширюватися, поки тиск його не зробиться рівним атмосферному p_0 .

Розширення повітря відбувається дуже швидко, і за цей короткий проміжок часу теплообмін між газом і стінками балона не відбувається. З цієї причини процес розширення повітря можна вважати адіабатним.

При цьому повітря охолоне до температури T_1 і перейде в новий стан. Це буде другий стан газу (на графіку точка 2 з параметрами p_0, V, T_1).

Потім охолоджене під час розширення повітря в посудині в результаті теплообміну стане нагріватися, а тиск всередині судини почне повільно зростати. Зростання тиску припиниться, коли температура повітря в посудині зрівняється з кімнатною температурою T_0 . Це буде третій стан газу (на графіку точка 3 з параметрами p_2, V, T_0).

Позначимо тиск повітря в посудині в цей момент через p_2 і відповідне показання манометра - через h_2 . Ясно що

$$p_2 = p_0 + \rho g h_2$$

Оскільки перехід зі стану 1 в стан 2 стався адіабатно, застосуємо рівняння адіабати, що зв'язує тиск і температуру:

$$pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \text{const}.$$

Підставимо значення параметрів, що відповідають початку і кінцю розширення

$$p_1 T_0^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = p_0 T_1^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (1)$$

Перехід зі стану 2 в стан 3 є ізохорним процесом. Для нього справедливо рівняння $\frac{p}{T} = \text{const}$. У наших позначеннях

$$\frac{p_0}{T_1} = \frac{p_2}{T_0} \quad \text{або} \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{p_0}{p_2}. \quad (2)$$

Підставимо (2) в (1):

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}. \quad (3)$$

Логарифмуємо, отримаємо

$$\ln \frac{p_1}{p_0} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \ln \frac{p_0}{p_2}. \quad (4)$$

Розглянемо окремо вирази

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{p_0 + \rho g h_1}{p_0} = 1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}.$$

$$\frac{p_0}{p_2} = \frac{p_0}{p_0 + \rho g h_2} = \frac{1}{1 + \frac{\rho g h_2}{p_0}} \approx 1 - \frac{\rho g h_2}{p_0}.$$

У другому дробу ми скористалися формулою наближених обчислень, а саме при малих x ($|x| \ll 1$) має місце наближена рівність

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x$$

Дійсно, в нашому випадку величина x є малою в порівнянні з одиницею:

$$x = \frac{\rho g h_2}{p_0} \approx \frac{10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-1}}{10^5} = 10^{-2}.$$

Перепишемо рівняння (4):

$$\ln\left(1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}\right) = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \ln\left(1 - \frac{\rho g h_2}{p_0}\right)$$

Знову застосуємо формулу наближених обчислень. При малих x ($|x| \ll 1$) має місце наближена рівність

$$\ln(1 \pm x) \approx \pm x$$

тоді

$$\frac{\rho g h_1}{p_0} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \left(-\frac{\rho g h_2}{p_0}\right)$$

звідки неважко отримати

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

Формула (5) і є розрахунковою для визначення показника адіабати γ .

Порядок виконання роботи.

1. Відкривши кран K_2 (рис.1).(кран K_1 закритий), накачати в балон повітря так, щоб на манометрі була значна різниця рівнів рідини (10 - 15 см). Закривши кран K_2 , почекати 2-3 хвилини (до тих пір, поки нагріте від стиснення повітря не охолоне і рівні в колінах манометра перестануть змінюватися). Відрахувати по шкалі рівні лівої і правої трубок манометра (відлік ведуть по нижньому краю меніска). Зафіксувати різницю рівнів h_1 .

2. Відкрити і швидко закрити кран (клапан) K_1 (рис.3). Через 2-3 хвилини зафіксувати різницю рівнів h_2 .

3. За формулою (5) обчислити показник адіабати $\gamma = C_p/C_v$ для повітря і порівняти з теоретичним значенням, вважаючи повітря двоатомним газом.

4. Дослід повторити не менше 10 разів при різних показаннях манометра. Отримані результати занести в таблицю. Обчислити середнє значення і похибки вимірювання за методом Стюдента.

№ П/П	h_1 , мм	h_2 , мм	$h_1 - h_2$, мм	γ_i	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma_i$	$\Delta \gamma_i^2$	$S_{\langle \gamma \rangle}$	$t_{\alpha n}$	$\Delta \gamma$	$E\%$
1.											
10.											

Контрольні питання.

1. Який процес називається ізохорним? Адіабатним?
2. Чому c_p завжди більше c_v ?

3. Чому манометр заповнюють підфарбованою водою, а не ртуттю?
4. Як впливає на результат досліду тривале відкривання клапана K_1 ?
5. Чому в даному досвіді зручно користуватися рівнянням адіабати, що зв'язує

тиск і температуру $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = const$, а не рівнянням, що зв'язує тиск і об'єм

$$pV^\gamma = const, ?$$

6. Дайте пояснення значень параметрів повітря в балоні, наведеним на рис. 3.
7. Як вплине на результат досліду велика вологість повітря в аудиторії?
8. Розв'язати задачу.

Кисень, маса якого 80 г, ізобарно нагрівають від 15 °С до 115 °С. Визначити роботу A , виконану газом, зміну внутрішньої енергії ΔU і кількість підведеної теплоти Q .

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцік П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 1 : Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. 536 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.). – Львів. – ”Бескід Біт”. – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. «Либідь»2001. – 422 с.
4. І.П.Гаркуша, В.П.Курінний. Фізика. Навч. посібник у 7 частинах. Ч.2 Молекулярна фізика. Д. НГУ. 2011.

Укладач І.П. Гаркуша