

Лабораторна робота № 13

Визначення відношення C_p / C_v методом Клемана–Дезорма

Мета роботи: Експериментально визначити співвідношення теплоємностей повітря при сталому тиску і сталому об'ємі.

Прилади та матеріали: балон об'ємом 20-25л і герметично сполучений з ним відкритий рідинний манометр, насос.

Теоретичні відомості

Теплоємністю тіла називається фізична величина, чисельно рівна кількості теплоти, необхідної для підвищення температури цього тіла на один кельвін.

Нехай тіло одержує кількість теплоти δQ і його температура підвищується на dT , тоді

$$c_{\text{тіла}} = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1)$$

Для газів величина теплоємності суттєво залежить від умов, за яких газ одержує теплоту. Розглянемо два випадки:

1. Об'єм газу постійний ($V = \text{const}$). Тоді газ роботи не виконує ($\delta A = 0$) і використовуючи перший закон термодинаміки

$$\delta Q = dU + p dV, \quad (2)$$

рівність для внутрішньої енергії:

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R T; \quad (3)$$

для одного моля:

$$c_v = \frac{\delta Q_v}{dT} = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R; \quad (4)$$

2. Тиск газу постійний ($P = const$):

$$c_p = \frac{\delta Q_p}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{PdV}{dT} = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R. \quad (5)$$

Тут було використане рівняння стану $p dV = R dT$ для одного моля, при ізобарному процесі.

Як бачимо, молярні теплоємності при сталому тиску і сталому об'ємі відрізняються на газову сталу:

$$c_p = c_v + R. \quad (6)$$

Рівняння (5.6) відоме як рівняння Маєра.

На підставі (5.4) і (5.5) одержуємо відношення теплоємностей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (7)$$

Отже, теплоємність ідеального газу не залежить від температури, а визначається лише структурою молекул (точніше – числом ступенів вільності – i).

Адіабатичним називається процес, який протікає без теплообміну системи із зовнішнім середовищем. Іншими словами термодинамічна система не одержує теплоти ($\delta Q = 0$).

Тоді, згідно з першим законом термодинаміки (5.2), одержуємо:

$$dU + p dV = 0. \quad (8)$$

Маючи на увазі (5.3) і рівняння стану:

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT = \frac{m}{\mu} c_v dT \quad \text{і} \quad p = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V},$$

перепишемо (5.8) у вигляді

$$\frac{m}{\mu} c_v dT + \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} = 0, \quad (9)$$

або

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{c_v} \frac{dV}{V} = 0, \quad (10)$$

Оскільки $\frac{R}{c_v} = \frac{c_p - c_v}{c_v} = \gamma - 1$, після інтегрування і потенціювання одержуємо:

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

Замінюючи температуру згідно рівняння стану $p = \frac{\mu}{m} \frac{pV}{R}$, одержуємо рівняння адіабати у формі Пуасона:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (11)$$

Безпосереднє визначення величини c_p і c_v зв'язане із значними труднощами. Тому на практиці експериментально знаходять величини $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ та c_p , а потім обчислюють c_v .

Для визначення відношення $\frac{c_p}{c_v}$ було запропоновано багато методів.

Найпростіший з них в експериментальному здійсненні метод Клемана і Дезорма, що полягає в послідовному проходженні досліджуваного газу через три стани, які відбуваються завдяки стисненню і розширенню газу, за умов, що забезпечують протікання адіабатичного процесу.

Установка Клемана–Дезорма складається з балона 1 з повітрям, насоса 2 і водяного манометра 3 (рис 11). В балон при закритому крані 4 накачується повітря. Тиск повітря в балоні підвищується і стане рівним:

$$p_1 = H + h_1,$$

де h_1 - надлишок тиску повітря в балоні над атмосферним тиском H . Величина h_1 вимірюється манометром 3. Відкривають на короткий час кран 4, щоб тиск в балоні зрівнявся з атмосферним ($p_2 = H$), після чого закривають кран.

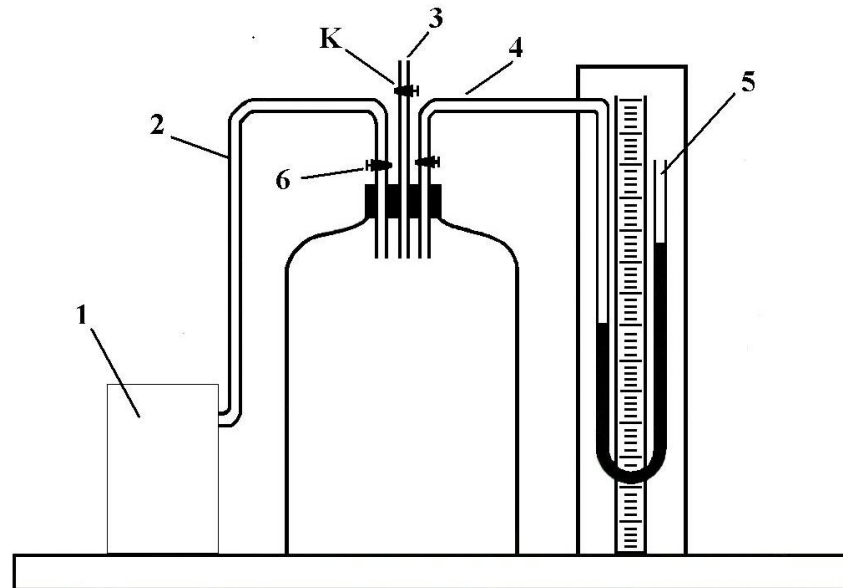


Рис. 11. Установка Клемана–Дезорма.

Нехай маса повітря після нагнітання насосом в посудині в об'ємі V рівна m . При відкриванні крана частина повітря виходить. Позначимо масу повітря, що виходить через Δm , тоді маса повітря, що залишилось:

$$m_1 = m - \Delta m.$$

Маса повітря m_1 , яка замкнута в об'ємі V , займала перед відкриттям крану менший об'єм V_1 . Так як процес короткочасний і помітного теплообміну між газом і стінками балона не відбувається, то його можна вважати адіабатичним. Згідно з рівнянням Пуасона (11) (для маси газу, рівної m_1) отримаємо

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (12)$$

Внаслідок адіабатичного розширення газу температура його понизилась, а після теплообміну температура газу через невеликий проміжок часу стане рівна кімнатній. При цьому тиск газу підніметься до величини $p_3 = H + h_2$.

Початковий і кінцевий стани газу спостерігаються при однаковій температурі. Тому на основі закону Бойля-Маріота отримаємо

$$p_1 V_1 = p_3 V. \quad (13)$$

Розв'язуючи рівняння (5.12) і (5.13) відносно γ , отримаємо

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3}. \quad (14)$$

Розкладемо $\lg p_1$ і $\lg p_3$ в ряд Тейлора, обмежившись в цьому випадку двома першими членами:

$$\lg p_1 = \lg (H + h_1) = \lg H + \frac{h_1}{H} + \dots$$

$$\lg p_3 = \lg (H + h_2) = \lg H + \frac{h_2}{H} + \dots$$

Підставляючи ці значення у формулу (5.14), отримаємо кінцево:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (15)$$

Таким чином, робота по визначенню γ зводиться до вимірювання різниці висот h_1 і h_2 у коліні манометра.

Хід виконання роботи

1. При закритому 4 і відкритому 5 кранах в балон за допомогою насоса 2 накачати деяку кількість повітря. Накачування проводити до того часу, поки різниця рівнів рідини в манометрі 3 не досягне 20-25 см. Після цього закрити кран 5. Стиснення приводить до того, що температура газу в балоні підвищується.
2. Через декілька хвилин, коли температура повітря всередині посудини досягне кімнатної (положення рівнів рідини в манометрі вже не

змінюється), виміряти різницю рівнів рідини в манометрі, тобто h_1 з точністю до 1 мм.

3. На мить відкрити кран 4 і закрити його відразу, як тільки тиск в посудині стане рівним атмосферному (в цей час рівні рідини в манометрі будуть на однаковій висоті) і зникне звук, створений повітрям, що витікає. При цьому повітря у посудині охолоджується.
4. Через деякий час повітря у балоні нагрівається і його температура зрівняється з кімнатною. Внаслідок цього виникне деяка різниця рівнів рідини в колінах манометра h_2 , яку слід визначити з точністю до 1 мм.
5. Дослід провести 5–7 разів.
6. За формулою (5.15) знайти γ .

Результати вимірювань та обчислень занести в таблицю.

№ $\frac{c_p}{c_v}$	h_1 , м	h_2 , м	γ	$\Delta\gamma$	E, %

Контрольні запитання

1. Чому теплоємності газу залежать від способів і умов нагрівання?
2. Чому c_p більше, ніж c_v ?
3. Який процес називається адіабатичним?
4. Що відбувається з внутрішньою енергією газу при адіабатичному процесі?
5. Що таке число ступенів вільності? Як це число пов'язане з γ ? Знаючи γ (з досліду), поррахуйте число ступенів вільності молекул повітря.