

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 1

Основні фізичні властивості газів та рідини

Рідина – це суцільне середовище, яке може легко змінювати свою форму під дією навіть незначних сил.

Рідини бувають *стисливі* та *нестисливі*. До нестисливих рідин належать краплинні рідини (вода, нафта, олія та інші). Стисливими рідинами є повітря та інші гази. Краплинні рідини мають на відміну від газів вільну поверхню. *Вільна поверхня* – границя між рідиною і навколишнім середовищем.

Густина рідини ρ – її маса, що знаходиться в одиниці об'єму, кг/м³:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (5.1)$$

де m – маса рідини, кг;

V – об'єм, м³.

Якщо рідина неоднорідна, то формула (5.1) визначає тільки середню густина рідини. Для визначення густини в певній точці необхідно користуватися формулою, кг/м³:

$$\rho = \frac{dm}{dV}. \quad (5.2)$$

Величина, зворотна густині, називається *питомим об'ємом*. Це об'єм одиниці маси рідини, м³/кг:

$$\forall = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}. \quad (5.3)$$

Питома вага γ – це вага одиниці об'єму рідини, Н/м³:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (5.4)$$

де G – ваги, Н;

V – об'єм, м^3 .

Взаємозв'язок між густиною і питомою вагою визначається формулою:

$$\gamma = m \cdot g, \quad (5.5)$$

де g – прискорення вільного падіння. $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Відносною густиною рідини називається відношення густини певної рідини ρ до густини дистильованої води ρ_p при $4 \text{ }^\circ\text{C}$ і атмосферному тиску:

$$\delta_\rho = \frac{\rho}{\rho_p}. \quad (5.6)$$

Відносною питомою вагою рідини називається відношення питомої ваги певної рідини γ до питомої ваги дистильованої води γ_p при $4 \text{ }^\circ\text{C}$ і атмосферному тиску:

$$\delta_\gamma = \frac{\gamma}{\gamma_p}. \quad (5.7)$$

Густина нестисливої рідини мало змінюється при зміні тиску. Це характеризується залежністю:

$$\frac{d\rho}{dp} = \beta_p \cdot \rho, \quad (5.8)$$

де β_p – коефіцієнт об'ємного стиснення, Па^{-1} .

Коефіцієнт об'ємного стиснення β_p являє собою відносну зміну об'єму рідини при підвищенні тиску на одну одиницю Па^{-1} :

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp}, \quad (5.9)$$

де V – початковий об'єм рідини;

dV – зміна об'єму при зміні тиску на dp .

Знак мінус показує, що при збільшенні тиску об'єм зменшується.

Оберненою величиною коефіцієнта об'ємного стиснення є **модуль об'ємної пружності рідини** E_{pid} , Па:

$$E_{pid} = \frac{1}{\beta_p} = -V \cdot \frac{dp}{dV}. \quad (5.10)$$

Густина рідини змінюється із зміною температури:

$$\frac{d\rho}{dT} = \beta_{t^\circ} \cdot \rho, \quad (5.11)$$

де β_{t° – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, K^{-1} .

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення β_{t° показує відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на один градус, K^{-1} :

$$\beta_{t^\circ} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT}, \quad (5.12)$$

де V – початковий об'єм рідини;

dV – зміна об'єму при зміні температури на dT .

Густина краплинної рідини ρ_{t° при температурі t° ($^\circ C$), можна розрахувати, за умови сталості коефіцієнта β_{t° в інтервалі температур $0 \dots t^\circ$ (Δt , $^\circ C$), якщо відома густина рідини при нормальних умовах ρ_0 , kg/m^3 :

$$\rho_{t^\circ} = \frac{\rho_0}{1 + \beta_{t^\circ} \cdot \Delta t^\circ}, \quad (5.13)$$

Для ідеальних газів справедливе рівняння Менделєєва – Клапейрона (рівняння стану):

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (5.14)$$

де m – маса газу, kg ;

R – питома газова постійна, залежна від природи газу, але незалежна від температури і тиску, Дж/(кг · К);

T – абсолютна температура, К;

p – тиск газу, Па.

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu_m}, \quad (5.15)$$

де R_{μ} – універсальна газова постійна Дж/(кмоль · К);

μ_m – молекулярна маса газу, кг/кмоль.

Рівняння стану можна представити в наступних формах запису:

$$p \cdot \forall = R \cdot T; \quad (5.16)$$

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R_{\mu} \cdot T}{\mu_m}; \quad (5.17)$$

$$\frac{p_0}{\rho_0 \cdot T_0} = \frac{p}{\rho \cdot T}, \quad (5.18)$$

де ρ_0, p_0, T_0 – густина, тиск (101,3 кПа) і температура (273 °С) за нормальних фізичних умов (НФУ);

ρ, p, T – густина, тиск і температура за даних фізичних умов (ДФУ).

З рівняння (1.18) можна визначити густину газу за даних фізичних умов (ДФУ), якщо відома густина за нормальних фізичних умов (НФУ):

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \rho_0 \cdot \frac{(p_{бар} \pm p_z)}{101,3} \cdot \frac{273}{(273 + t^{\circ})}, \quad (5.19)$$

де $p_{бар}$ – атмосферний тиск, кПа;

p_z – надлишковий (чи вакуумметричний) тиск газу, кПа;

t° – температура газу, °С.

Густина ідеального газу при НФУ можна визначити з вираження, кг/м³:

$$\rho_0 = \frac{\mu_m}{22,4} \quad (5.20)$$

Густина сухого повітря при НФУ дорівнює 1,293 кг/м³.

Густина суміші газів за нормальних фізичних умовах ρ_{0z} визначають по її складу та густині компонентів, кг/м³:

$$\rho_{0z} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{j=1}^n a_j \cdot \rho_{0j}, \quad (5.21)$$

де a_j – вміст j -го компонента, % об'ємних;

ρ_{0j} – густина j -го компонента при НФУ.

В'язкість – здатність рідини чинити опір зрушенню, обумовлене внутрішнім тертям часток рідини.

У рідині, що рухається, швидкості різні в різних точках. Дотичне напруження τ , що виникає під час руху рідини, визначається законом Ньютона, Па:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}, \quad (5.22)$$

де η – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

$\frac{du}{dy}$ – градієнт швидкості, тобто зміна швидкості на одиницю довжини в

перпендикулярному напрямі, с⁻¹;

Для газів справедлива формула Сазерленда, Па·с:

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{(C_s + 273)}{(C_s + T)} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (5.23)$$

де η_0 – в'язкість газу при НФУ, Па·с;

C_s – постійна Сазерленда, К;

T – абсолютна температура, К;

У розрахунках частіше використовують кінематичний коефіцієнт в'язкості ν , м²/с:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (5.24)$$

З підвищенням температури для краплинної рідини в'язкість зменшується, а для газів збільшується.

Приклади

Приклад 1.1. Який обсяг займають 5 кг газової суміші, що складається з 40 % O_2 і 60 % He при тиску $p = 20$ ат і температурі $t^\circ = 20$ °С.

Рішення

Знаходимо густину компонентів при НФУ, кг/м³:

$$\rho_{0 O_2} = \frac{\mu_{m O_2}}{22,4} = \frac{32}{22,4} = 1,429;$$

$$\rho_{0 He} = \frac{\mu_{m He}}{22,4} = \frac{4}{22,4} = 0,179.$$

Густина суміші газів при НФУ дорівнює, кг/м³:

$$\rho_{0g} = \frac{1}{100} \cdot (a_{O_2} \cdot \rho_{0 O_2} + a_{He} \cdot \rho_{0 He}) = \frac{1}{100} \cdot (40 \cdot 1,429 + 60 \cdot 0,179) = 0,679.$$

Параметри робочих умов суміші складають:

$$p = 20 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 1,962 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1962 \text{ кПа};$$

$$T = 273 + 20 = 293 \text{ К}.$$

Густину суміші газів при робочих умовах визначаємо по формулі (5.19), кг/м³:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = 0,679 \cdot \frac{1962}{101,3} \cdot \frac{273}{293} = 12,25.$$

Займаний сумішню газів обсяг дорівнює (формула 5.1), м³:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5}{12,25} = 0,408.$$

Приклад 1.2. До якої температури необхідно нагріти воду в герметичній судині, щоб її тиск піднявся на 100 ат? Початкова температура $t_1^{\circ} = 15^{\circ}\text{C}$, $\beta_{t^{\circ}} = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ K}$, $\beta_p = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Рішення

Рішення задачі розбиваємо на два етапи. Допустимо, вода нагрівається при постійному тиску. Тоді з формули (5.12):

$$\Delta T = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\beta_{t^{\circ}}},$$

де V – початковий об'єм рідини;

ΔV – збільшення об'єму при нагріванні.

Тепер стиснемо воду до первісного об'єму. Тоді:

$$\beta_p = \frac{1}{V + \Delta V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

одержуємо

$$\Delta V = \frac{\beta_p \cdot V \cdot \Delta p}{1 - \beta_p \cdot \Delta p}.$$

Підставляючи останню рівність у вираження для ΔT одержуємо:

$$\Delta T = \frac{\beta_p \cdot \Delta p}{(1 - \beta_p \cdot \Delta p) \cdot \beta_{t^{\circ}}} = \frac{5 \cdot 10^{-10} \cdot 9,81 \cdot 10^6}{(1 - 5 \cdot 10^{-10} \cdot 9,81 \cdot 10^6) \cdot 1,55 \cdot 10^{-4}} = 32 \text{ K}.$$

Шукана температура дорівнює:

$$T_2 = (15 + 273) + 32 = 320 \text{ K};$$

$$t_2^\circ = 320 - 273 = 47 \text{ }^\circ\text{C}.$$