

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

9.1.1 Теплоємність тіла

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

Питома теплоємність речовини (c)

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}.$$

Молярна теплоємність

$$C_M = \frac{dQ}{\nu \cdot dT}.$$

Зв'язок між молярною C_M і питомою c теплоємностями газу

$$C_M = c \cdot M,$$

де M – молярна маса газу.

Молярні теплоємності при сталому об'ємі C_V і сталому тиску відповідно дорівнюють

$$C_V = \frac{iR}{2}, \quad C_P = \frac{(i+2)R}{2},$$

де i – кількість ступенів вільності.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Питомі теплоємності при сталому об'ємі c_V і сталому тиску c_P відповідно дорівнюють

$$c_V = \frac{i R}{2 \mu}, \quad c_P = \frac{(i+2) R}{2 M}.$$

Рівняння Майєра

$$C_P - C_V = R.$$

9.2 Перший закон термодинаміки в загальному випадку:

$$\partial Q = dU + \partial A,$$

де ∂Q - це елементарна теплота надана системі шляхом теплопередачі (теплопровідності); dU - зміна внутрішньої енергії газу; ∂A - елементарна робота, яка виконується газом (над газом).

9.3 Внутрішня енергія ідеального газу

$$U = N \langle \varepsilon \rangle, \text{ або } U = \nu C_V T,$$

де $\langle \varepsilon \rangle$ - середня кінетична енергія молекули; N - кількість молекул газу; ν - кількість речовини.

9.4 Робота пов'язана зі зміною об'єму газу в загальному випадку обчислюється за формулою

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

де V_1 - початковий об'єм газу; V_2 - кінцевий об'єм газу.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Робота при ізобаричному процесі ($p = const$)

$$A = p\Delta V.$$

Робота при ізотермічному процесі ($T = const$)

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Робота при адіабатичному процесі

$$A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2),$$

де T_1 – початкова температура газу; T_2 – кінцева температура газу.

9.5 Рівняння Пуассона (рівняння газового стану при адіабатичному процесі)

$$T \cdot V^{\gamma-1} = const, \text{ або } pV^\gamma = const,$$

де γ - показник адіабати, він дорівнює

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}.$$

Зв'язок між початковими і кінцевими значеннями параметрів стану газу при адіабатичному процесі

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

9.6 Рівняння політропного процесу ($C = const$)

$$pV^n = const ,$$

де n - показник політропи, він дорівнює

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v} .$$

9.8 Застосування першого закону термодинаміки для різних процесів:

а) для ізобаричного процесу

$$dQ = dU + dA = \frac{m}{M} C_v dT + \frac{m}{M} R dT = \frac{m}{M} C_p dT ;$$

б) для ізохорного процесу ($dV = 0 \Rightarrow dA = 0$)

$$dQ = dU = \frac{m}{M} C_v dT ;$$

в) для ізотермічного процесу ($dT = 0 \Rightarrow dU = 0$)

$$Q = A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} ;$$

г) для адіабатичного процесу ($dQ = 0$)

$$dA = -dU = -\frac{m}{\mu} C_v dT .$$

9.9 Термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу в загальному випадку

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

де Q_1 – кількість теплоти, яку отримало робоче тіло (газ) від нагрівача; Q_2 - кількість теплоти, передана робочим тілом (газом) охолоджувачу.

ККД циклу Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

де T_1 - температура нагрівача; T_2 - температура охолоджувача.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 9.1 Визначити роботу A , яку виконує азот, якщо йому при сталому тиску надати кількість теплоти $Q = 21 \text{ кДж}$. Знайти також зміну ΔU внутрішньої енергії газу.

Розв'язання

У випадку ізобаричного процесу $p = \text{const}$ перший закон термодинаміки має вигляд

$$\Delta Q = A + \Delta U .$$

Кількість теплоти, робота газу та його внутрішня енергія визначаються за формулами:

$$\Delta Q = \frac{m}{M} C_p \Delta T , \quad (1)$$

$$A = \frac{m}{M} R \Delta T , \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_v \Delta T , \quad (3)$$

де R - газова стала; m - маса газу; M - молярна маса; C_p, C_v - теплоємність газу при сталих тиску і об'ємі.

Знайдемо відношення A до ΔQ і ΔU до ΔQ :

$$\frac{A}{\Delta Q} = \frac{\frac{m}{M} R \Delta T}{\frac{m}{M} C_p \Delta T} = \frac{R}{C_p} , \quad (4)$$

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

$$\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{\frac{m}{M} C_V \Delta T}{\frac{m}{M} C_P \Delta T} = \frac{C_V}{C_P}. \quad (5)$$

У випадку двоатомного газу кількість ступенів вільності молекули газу $i=5$, звідси

$$C_P = \frac{i+2}{2} R = \frac{7}{2} R, \quad (6)$$

$$C_V = \frac{i}{2} R = \frac{5}{2} R. \quad (7)$$

З урахуванням співвідношень (6) та (7), вирази (4), (5) набудуть вигляду

$$\frac{A}{\Delta Q} = \frac{R}{\frac{7}{2} R} = \frac{2}{7}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{\frac{5}{2} R}{\frac{7}{2} R} = \frac{5}{7}. \quad (9)$$

Із рівнянь (8) і (9) отримаємо

$$A = \frac{2}{7} Q, \quad \Delta U = \frac{5}{7} Q. \quad (10)$$

Підставивши у (10) значення фізичних величин, отримаємо:

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

$$A = \frac{2}{7} \cdot 21 \cdot 10^3 = 6 \cdot 10^3 \text{ (Дж)},$$

$$\Delta U = \frac{5}{7} \cdot 21 \cdot 10^3 = 15 \cdot 10^3 \text{ (Дж)}.$$

Відповідь: $A = 6 \text{ кДж}$; $\Delta U = 15 \text{ кДж}$.

Приклад 9.2 Початковий об'єм кисню - $V_1 = 1 \text{ м}^3$ і його тиск - $p_1 = 200 \text{ кПа}$. Газ нагріли спочатку при сталому тиску до об'єму $V_2 = 3 \text{ м}^3$, а потім при сталому об'ємі до тиску $p_2 = 500 \text{ кПа}$. Зобразити графік процесу і знайти: а) зміну внутрішньої енергії газу; б) виконану роботу; в) кількість теплоти, надану газу.

Розв'язання

$\Delta U - ?$ $A - ?$ $Q - ?$
$V_1 = 1 \text{ м}^3,$
$p_1 = 200 \text{ кПа} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па},$
$p_1 = \text{const},$
$V_2 = 3 \text{ м}^3,$
$V_2 = \text{const},$
$p_2 = 500 \text{ кПа} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па},$
$i = 5.$

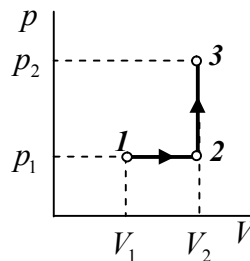


Рисунок 1

Побудуємо графік процесу (рис.1). На графіку точками 1,2,3 позначені стани газу, які характеризуються параметрами

$$(p_1, V_1, T_1), (p_1, V_2, T_2), (p_2, V_2, T_3).$$

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

1 Зміна внутрішньої енергії визначається співвідношенням

$$\Delta U = \nu C_V \Delta T,$$

де ν – кількість речовини; C_V - молярна теплоємність газу при сталому об'ємі; ΔT - різниця температур, що відповідає кінцевому 3 та початковому 1 станам газу, тобто $\Delta T = T_3 - T_1$.

Оскільки

$$C_V = \frac{i}{2} R, \text{ а } \nu = \frac{m}{M},$$

де M - молярна маса газу, то

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_3 - T_1). \quad (1)$$

Температури T_1 і T_3 знайдемо з рівняння Менделєєва - Клапейрона

$$T_1 = \frac{M p_1 V_1}{m R} \quad \text{та} \quad T_2 = \frac{M p_2 V_2}{m R}.$$

З урахуванням цього рівняння (1) набуде вигляду

$$\Delta U = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

Підставимо числові значення та отримаємо

$$\Delta U = \frac{5}{2} (5 \cdot 10^5 \cdot 3 - 2 \cdot 10^5 \cdot 1) = 3 \cdot 10^6 \text{ (Дж)}.$$

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

2 Робота, виконана газом, дорівнює

$$A = A_1 + A_2,$$

де A_1 - робота на ділянці 1-2, A_2 - робота на ділянці 2-3.

На ділянці 1-2 $p_1 = \text{const}$. У цьому випадку робота визначається формулою

$$A_1 = p_1 \Delta V = p_1 (V_2 - V_1).$$

На ділянці 2-3 об'єм газу не змінюється. Це означає, що робота на цій ділянці дорівнює нулю. Таким чином,

$$A = A_1 = p_1 (V_2 - V_1).$$

Виконаємо обчислення

$$A = 2 \cdot 10^5 (3 - 1) = 4 \cdot 10^5 \text{ (Дж)}.$$

3 Кількість теплоти, надану газу, визначимо з першого закону термодинаміки

$$Q = A + \Delta U.$$

Підставимо числові значення та отримаємо

$$Q = 3,25 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^5 = 3,65 \cdot 10^6 \text{ (Дж)}.$$

Відповідь: $\Delta U = 3,25 \text{ МДж}$; $A = 0,4 \text{ МДж}$;

$$Q = 3,65 \text{ МДж}.$$

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Приклад 9.3 Ідеальний газ виконує цикл Карно. Температура охолоджувача $T_2 = 290\text{ K}$. У скільки разів збільшиться ККД циклу, якщо температура нагрівача збільшиться від $T_1' = 400\text{ K}$ до $T_1'' = 600\text{ K}$?

Розв'язання

Для вирішення задачі скористаємося формулою для ККД циклу Карно

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} - ?$$

$$T_1' = 400\text{ K},$$

$$T_1'' = 600\text{ K},$$

$$T_2 = 290\text{ K}.$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

де T_1 - температура нагрівача; T_2 - температура охолоджувача.

У нашому випадку

$$\eta_1 = \frac{T_1' - T_2}{T_1'} \quad \text{і} \quad \eta_2 = \frac{T_1'' - T_2}{T_1''},$$

тоді

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{T_1' (T_1'' - T_2)}{T_1'' (T_1' - T_2)}.$$

Підставимо числові значення

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{400(600 - 290)}{600(400 - 290)} = 2.$$

Відповідь: у два рази.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Приклад 9.4 При адіабатичному стисканні тиск повітря збільшився від $p_1 = 50 \text{ кПа}$ до $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$. Потім при незмінному об'ємі температура повітря була знижена до початкової. Визначити тиск газу p_3 у кінці процесу.

Розв'язання

У випадку адіабатичного процесу параметри системи змінюються у відповідності до рівняння

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma, \quad (1)$$

де $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ - стала Пуассона.

Теплоємності при сталих тиску

C_P і об'ємі C_V дорівнюють у випадку двохатомного газу ($i=5$)

$$C_P = \frac{i+2}{2} R = \frac{7}{2} R, \quad (2)$$

$$C_V = \frac{i}{2} R = \frac{5}{2} R, \quad (3)$$

де i – кількість ступенів вільності молекули газу; R - газова стала.

Звідси

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{7/2 R}{5/2 R} = \frac{7}{5}.$$

Другий процес є ізохорним, у цьому випадку

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_1} \Rightarrow p_3 = \frac{T_1}{T_2} p_2. \quad (4)$$

Рівняння (1) перепишемо з використанням закону Менделєєва-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT, \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}. \quad (5)$$

Підставивши вираз (5) в (4), отримаємо

$$p_3 = \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}} \cdot p_2. \quad (6)$$

Підставивши в дане співвідношення числові значення фізичних величин, отримаємо

$$p_3 = \frac{1}{\left(\frac{0,5 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^3} \right)^{2/5 \cdot 5/7}} = \frac{1}{\left(\frac{0,5 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^3} \right)^{2/7}} = 0,52(\text{Па}).$$

Перевірка показує, що отримана величина має розмірність - Па.

Відповідь: $p_3 = 0,52 \text{ Па}$.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Приклад 9.5 Двохатомний ідеальний газ, який під тиском $p_1 = 200 \text{ кПа}$ має об'єм $V_1 = 6 \text{ л}$, розширюється до об'єму, вдвічі більшого за початковий. Процес розширення відбувається за політропою з показником політропи $n = 1,2$. Знайти зміну внутрішньої енергії газу та роботу, виконану газом під час розширення. Визначити молярну теплоємність газу в цьому процесі.

Розв'язання

Зміну внутрішньої енергії знайдемо з формули

$\Delta U - ?$	$A - ?$	$C - ?$
$p_1 = 200 \text{ кПа}$	$2 \cdot 10^5 \text{ Па}$,	
$V_1 = 6 \text{ л}$	$6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$,	
$V_2 = 2V_1$,		
$n = 1,2$,		
$i = 5$.		

$$\Delta U = \nu C_V \Delta T, \quad (1)$$

де $\nu = \frac{m}{M}$ – кількість речовини;

$C_V = \frac{i}{2} R$ – молярна теплоємність ідеального газу при сталому об'ємі;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – зміна температури під час процесу; i – кількість ступенів вільності газу, для двоатомного газу $i = 5$.

З урахуванням наведеного рівняння (1) набуде вигляду

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1). \quad (2)$$

Температури T_1 і T_2 знайдемо з рівняння Менделєєва - Клапейрона

$$T_1 = \frac{Mp_1V_1}{mR} \quad \text{та} \quad T_2 = \frac{Mp_2V_2}{mR}. \quad (3)$$

Кінцевий тиск газу p_2 знайдемо з рівняння політропного процесу (9.7)

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

$$pV^n = \text{const}, \text{ або } p_1V_1^n = p_2V_2^n,$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n. \quad (4)$$

Підставимо (3) та (4) в (2)

$$\Delta U = \frac{i}{2} p_1 \left(\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n - V_1 \right).$$

Підставимо числові значення та виконаємо розрахунки

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot 2 \cdot 10^5 \left(\left(\frac{6}{12} \right)^{1,2} - 6 \right) = -400 \text{ (Дж)}.$$

Роботу визначимо з формули (9.4)

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV, \quad (5)$$

де V_1 – початковий об'єм газу; V_2 – кінцевий об'єм газу.

Рівняння (4) запишемо у вигляді

$$p = p_1 \left(\frac{V_1}{V} \right)^n. \quad (6)$$

З урахуванням (6) співвідношення (5) набуде вигляду

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

$$\begin{aligned} A &= p_1 V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V^n} dV = p_1 V_1^n \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{V_1^{n-1}} - \frac{1}{V_2^{n-1}} \right) = \\ &= \frac{1}{n-1} \left(\frac{p_1 V_1^n}{V_1^{n-1}} - \frac{p_1 V_1^n}{V_2^{n-1}} \right) = \frac{1}{n-1} \left(p_1 V_1 - \frac{p_1 V_1^n}{V_2^n} V_2 \right). \end{aligned}$$

Або

$$A = \frac{1}{n-1} \left(p_1 V_1 - p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n V_2 \right).$$

Підставимо числові значення та виконаємо розрахунки:

$$A = \frac{1}{1,2-1} \left(2 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^5 \left(\frac{6}{12} \right)^{1,2} 12 \cdot 10^{-3} \right) = 780 \text{ (Дж)}.$$

Молярну теплоємність знайдемо із формули для показника політропи

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v} \Rightarrow C = \frac{n C_v - C_p}{n - 1}.$$

Врахуємо, що

$$C_p = \frac{i+2}{2} R = \frac{7}{2} R \quad \text{і} \quad C_v = \frac{i}{2} R = \frac{5}{2} R,$$

та отримаємо

$$C = \frac{1}{2} R \frac{ni - (i+2)}{n-1} = \frac{1}{2} 8,31 \frac{1,2 \cdot 5 - 7}{1,2-1} = -21 \text{ (Дж/(моль} \cdot \text{К))}.$$

Відповідь: $\Delta U = -400 \text{ Дж}$; $A = 780 \text{ Дж}$;

$$C = -21 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

9.1 У посудині, що має об'єм $V=6$ л, міститься двохатомний газ за нормальних умов. Визначити його теплоємність C_V при сталому об'ємі.

Відповідь: $C_V = 5,5$ Дж/К.

9.2 Визначити кількість теплоти Q , яку потрібно надати кисню об'ємом $V = 50$ л при його ізохорному нагріванні, щоб тиск газу підвищився на $\Delta p = 0,5$ МПа.

Відповідь: $Q = 62,5$ кДж.

9.3 Кисень масою $m = 200$ г займає об'єм $V_1 = 100$ л і перебуває під тиском $p_1 = 200$ кПа. При нагріванні газ розширився при сталому тиску до об'єму $V_2 = 300$ л, а потім його тиск зріс до $p_3 = 500$ кПа при сталому об'ємі. Знайти зміну внутрішньої енергії ΔU газу, роботу A , яка виконана газом, і теплоту Q , що надана газу.

Відповідь: $\Delta U = 325$ кДж; $A = 40$ кДж; $Q = 365$ кДж.

9.4 Кисень нагрівають від $T_1 = 323$ К до $T_2 = 333$ К. Маса кисню $m = 0,16$ кг. Знайти кількість теплоти, отриманої газом, і зміну його внутрішньої енергії при ізохорному і ізобарному процесах. Початковий тиск близький до атмосферного.

Відповідь: $Q = \Delta U_{\text{ізо}} = 14,5$ кДж; $\Delta U_{\text{ізо}} = 10,4$ кДж.

9.5 Яка частина ω_1 кількості теплоти Q , наданої ідеальному газу при ізобарному процесі, витрачається на збільшення ΔU внутрішньої енергії газу і яка частина ω_2 – на роботу A його розширення? Розглянути три випадки, якщо газ: а) одноатомний; б) двохатомний; в) трьохатомний.

Відповідь: а) $\omega_1 = 0,6$; $\omega_2 = 0,4$; б) $\omega_1 = 0,71$; $\omega_2 = 0,29$;
в) $\omega_1 = 0,75$; $\omega_2 = 0,25$.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

9.6 Визначити роботу, виконану азотом, якому при сталому тиску надали кількість теплоти $Q = 21 \text{ кДж}$.

Відповідь: $A = 6 \text{ кДж}$.

9.7 При ізобаричному нагріванні аргон виконав роботу $A = 8 \text{ Дж}$. Яку кількість теплоти було надано газу?

Відповідь: $Q = \frac{7}{2} A = 28 \text{ Дж}$.

9.8 Азот масою $0,2 \text{ кг}$ нагрівається при сталому тиску від температури $T_1 = 293 \text{ К}$ до $T_2 = 373 \text{ К}$. Яку кількість теплоти поглинає газ? На скільки збільшилася внутрішня енергія газу? Яку роботу проти зовнішніх сил виконує газ?

Відповідь: $Q = 16,64 \text{ кДж}$; $\Delta U = 11,885 \text{ кДж}$; $A = 4,755 \text{ кДж}$.

9.9 Азот масою $m = 0,1 \text{ кг}$ був ізобарно нагрітий від температури $T_1 = 200 \text{ К}$ до температури $T_2 = 400 \text{ К}$. Визначити роботу A , виконану газом, теплоту Q , отриману ним, зміну ΔU внутрішньої енергії азоту.

Відповідь: $A = 5,94 \text{ кДж}$; $\Delta U = 14,8 \text{ кДж}$; $Q = 20,8 \text{ кДж}$.

9.10 При ізотермічному розширенні азоту при температурі $T = 280 \text{ К}$ об'єм його збільшився в два рази. Визначити: а) роботу A , що виконана при розширенні газу; б) зміну ΔU внутрішньої енергії; в) кількість теплоти Q , отриману газом. Маса азоту $m = 0,2 \text{ кг}$.

Відповідь: а) $A = 11,5 \text{ кДж}$; б) $\Delta U = 0$; в) $Q = A$.

9.11 У скільки разів збільшиться об'єм водню, що містить кількість речовини $\nu = 0,4 \text{ моль}$ при ізотермічному розширенні, якщо при цьому газ одержить кількість теплоти $Q = 800 \text{ Дж}$? Температура водню $T = 300 \text{ К}$.

Відповідь: $n = 2,23$.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

9.12 Газ, який в об'ємі $V_1 = 10^{-2} \text{ м}^3$ перебуває під тиском $p_1 = 200 \text{ кПа}$, ізотермічно розширився до об'єму $V_2 = 28 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

Яку роботу виконав газ при розширенні?

Відповідь: $A = 2,086 \text{ кДж}$.

9.13 Азот при температурі $T = 300 \text{ К}$ і тиску $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ займав об'єм $V = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Внаслідок адіабатичного розширення його температура знизилась до 273 К . Яку роботу виконав газ під час розширення?

Відповідь: $A = 174,1 \text{ Дж}$.

9.14 При стисканні $m = 1 \text{ кг}$ повітря, взятого при температурі $T = 293 \text{ К}$, його тиск зростає від $p_1 = 9,8 \text{ кПа}$ до $p_2 = 98 \text{ кПа}$. Обчислити роботу у випадку ізотермічного та адіабатного стискання.

Відповідь: $A_1 = -193 \text{ кДж}$; $A_2 = -196 \text{ кДж}$.

9.15 Кисень масою $m = 0,0165 \text{ кг}$, що має початковий тиск $p_1 = 159 \text{ кПа}$ і температуру $T_1 = 300 \text{ К}$, адіабатично стискають до $0,1$ його початкового об'єму. Знайти кінцевий тиск і температуру газу, виконану над газом роботу та зміну внутрішньої енергії.

Відповідь: $p_2 = 3,9 \text{ МПа}$; $T_2 = 750 \text{ К}$; $A = -\Delta U = -4,67 \text{ кДж}$.

9.16 Об'єм двохатомного газу - $V_1 = 0,5 \text{ л}$ при тиску $p_1 = 0,5 \text{ атм}$. Газ адіабатично стискається до об'єму V_2 та тиску p_2 , а потім при сталому об'ємі V_2 охолоджується до початкової температури. При цьому його тиск дорівнює $p_0 = 1 \text{ атм}$. **1** Зобразити графік цього процесу. **2** Знайти об'єм V_2 та тиск p_2 .

Відповідь: $V_2 = 0,25 \text{ л}$; $p_2 = 1,32 \text{ атм}$.

9.17 Визначити молярну теплоємність (виразити через R) ідеального двохатомного газу в політропному процесі з показником по-

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

літропи, який дорівнює: а) $n = 0,9$; б) $n = 0,99$; в) $n = 0,999$; г) $n = 1,1$.

Відповідь: а) $C = 12,5R$; б) $C = 102,5R$; в) $C = 1002,5R$; г) $C = -7,5R$.

9.18 Виразити молярну теплоємність ідеального газу при політропному процесі через показник політропи та показник адіабати. Визначити за яких значень показника політропи теплоємність ідеального газу під час політропного процесу має значення а) додатне; б) від'ємне; в) дорівнює нулю; г) нескінченно велике.

Відповідь: $C = \frac{R(n-\gamma)}{(\gamma-1)(n-1)}$; а) $n < 1$ та $n > \gamma$; б) $1 < n < \gamma$; в) $n = \gamma$; г) $n = 1$.

9.19 Під час політропного процесу ідеальний газ стиснули від об'єму $V_1 = 10$ л до об'єму $V_2 = 5$ л. При цьому тиск збільшився від $p_1 = 1000$ ГПа до $p_2 = 5000$ ГПа. Визначити: а) показник політропи; б) молярну теплоємність газу для наведеного процесу.

Відповідь: а) $n = 2,3$; б) $C = 14$ Дж/(моль·К).

9.20 Ідеальний газ здійснює цикл Карно. Температура T_1 нагрівача в чотири рази ($n = 4$) більша за температуру охолоджувача. Яку частину ω кількості теплоти, отриману за один цикл від нагрівача, газ віддасть охолоджувачу?

Відповідь: $\omega = 0,25$.

9.21 Газ, що є робочою речовиною циклу Карно, одержав від нагрівача теплоту $Q_1 = 4,38$ кДж і виконав роботу $A = 2,4$ кДж. Визначити температуру нагрівача, якщо температура охолоджувача $T_2 = 273$ К.

Відповідь: $T_1 = 604$ К.

9.22 Газ, що здійснює цикл Карно, віддав холодильнику 67% теплоти, отриманої від нагрівача. Визначити температуру T_2 охолоджувача, якщо температура нагрівача $T_1 = 430$ К.

9 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

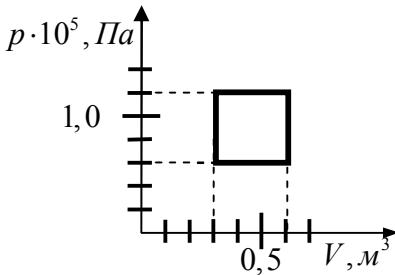
Відповідь: $T_2 = 290 \text{ K}$.

Відповідь: $\eta = 0,5$; $A = 140 \text{ Дж}$.

9.23 Газ, що здійснює цикл Карно, одержує теплоту $Q_1 = 84 \text{ кДж}$. Визначити роботу A газу, якщо температура T_1 нагрівача в три рази вища за температуру T_2 теплоприймача.

Відповідь: $A = 56 \text{ Дж}$.

9.24 Замкнутий цикл, який виконують $m = 0,3 \text{ кг}$ азоту, зображений на рисунку. Визначити:



а) кількість теплоти, отриману від нагрівника за один цикл; б) ККД циклу; в) який ККД мав би ідеальний тепловий цикл, ізотерми якого відповідають найбільшій і найменшій температурам цього циклу?

Відповідь: а) $Q = 5,4 \cdot 10^5 \text{ Дж}$; б) $\eta = 5,3\%$; в) $\eta_{\text{ід}} = 0,75\%$.

9.25 Водень в об'ємі $V_1 = 5 \text{ л}$, який перебуває під тиском $p_1 = 101,3 \text{ кПа}$, адіабатично стиснули до об'єму $V_2 = 1 \text{ л}$. Знайти роботу стискання газу.

Відповідь: $A = -1143 \text{ Дж}$.