

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Збірник задач

Харків «ХАІ» 2024

УДК 621.1.016.7(076.1)
Т38

Колектив авторів:
М. В. Амброжевич, К. С. Єпіфанов, В. О. Середя, М. А. Шевченко

Рецензенти: д-р техн. наук В. О. Тарасова,
канд. техн. наук О. В. Коломійцев

Технічна термодинаміка [Електронний ресурс] : зб. задач /
Т38 М. В. Амброжевич, К. С. Єпіфанов, В. О. Середя, М. А. Шевченко.
– Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац.
ін-т», 2024. – 119 с.

Наведено завдання з технічної термодинаміки за такими розділами, як рівняння стану ідеального та реального газу, суміші ідеальних газів, політропні процеси, стиснення газу в компресорі, процеси витікання ідеального газу, цикли двигунів внутрішнього згоряння. Завдання поділено на теми, кожен тему забезпечено короткими вказівками, подано приклади розв'язання задач.

Для студентів, які вивчають курси «Технічна термодинаміка», «Термодинаміка і теплообмін», а також для самостійної роботи бакалаврів, магістрів та аспірантів.

Іл. 15. Табл. 54. Бібліогр.: 8 назв

УДК 621.1.016.7(076.1)

© Колектив авторів, 2024
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2024

ЗМІСТ

Тема 1 РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ	4
Тема 2 РЕАЛЬНІ ГАЗИ	15
Тема 3 СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ	31
Тема 4 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ	51
Тема 5 СТИСНЕННЯ ГАЗУ В КОМПРЕСОРІ	63
Тема 6 ПРОЦЕСИ ВИТІКАННЯ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ	75
Тема 7 ЦИКЛИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	90
ДОДАТОК А Довідкові дані	113
ДОДАТОК Б z - p -діаграма реального газу	117
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	118

Тема 1 РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Зірочкою () позначено задачі із розв'язанням.*

За нормальні фізичні умови (н. у.) взято атмосферний тиск $p = 760$ мм рт. ст. = 101325 Па та температура $t = 0$ °C = 273,15 К.

За стандартні умови (с. у.) — температура $t = 20$ °C = 293,15 К при такому ж саме атмосферному тиску.

1.1.* Манометричний тиск газу в балоні становить 400 мм вод. ст. Барометричний тиск дорівнює 746 мм рт. ст. Визначити абсолютний тиск в системі СІ.

Розв'язання. У системі СІ одиницею тиску є паскаль: Па = Н/м². За таблицю А.1 визначаємо перевідні коефіцієнти:

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,332 \text{ Па}.$$

Абсолютний тиск у балоні знаходимо як суму манометричного (надлишкового) та атмосферного (барометричного) тисків:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{атм}} = 400 \cdot 9,81 + 746 \cdot 133,332 = 103389,7 \text{ Па} = 103,4 \text{ кПа}.$$

1.2. Визначити абсолютний тиск на дні моря на глибині 120 м. Атмосферний тиск на рівні моря становить 760 мм рт. ст., густину морської води взяти 1020 кг/м³.

1.3*. Визначити барометричний тиск, густину і температуру повітря на висоті 8300 м, якщо відомо, що на рівні моря тиск становить 101325 Па, а температура – 288 К.

Розв'язання:

Спосіб І. Визначимо закон змінення тиску за висотою. У диференціальному вигляді згідно із законом Паскаля збільшення атмосферного тиску на ділянці завтовшки dh становить $dP = -\rho g \cdot dh$ (знак «мінус» відображає факт спадання атмосферного тиску зі зростанням висоти над поверхнею землі). З рівняння стану визначимо густину повітря $\rho = P/RT$ і підставимо в рівняння Паскаля:

$$dP = -\frac{P}{RT} g dh.$$

Поділяючи змінні, отримуємо

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g}{RT} dh.$$

Проінтегруємо, пам'ятаючи, що на поверхні землі $h = 0$ і $P = P_0 = 101325$ Па:

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = - \int_0^h \frac{g}{RT} dh.$$

Строго кажучи, температура повітря теж змінюється з висотою – до висоти 12 км вона зменшується приблизно на 6,5 °С на кожен кілометр висоти, а після 12 км і до 40 км вважається постійною і дорівнює 216,5 К. Для простоти вважаємо, що температура постійна і дорівнює температурі біля поверхні землі $T_0 = 298$ К. Тоді, виносячи константу за знак інтеграла і проінтегрувавши вираз, отримаємо

$$\begin{aligned} \ln P|_{P_0}^P &= - \frac{g}{RT_0} h \Big|_0^h ; \\ \ln \frac{P}{P_0} &= - \frac{g}{RT_0} h ; \\ P &= P_0 e^{-\frac{g}{RT_0} h} = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{gh}{RT_0}\right). \end{aligned}$$

Підставивши вихідні дані, знайдемо атмосферний тиск на заданій висоті h

$$P = 101325 \cdot \exp\left(-\frac{9,81 \cdot 8300}{287 \cdot 288}\right) = 37835,6 \text{ Па} = 0,378 \text{ бар}.$$

Температура повітря на висоті h

$$T = T_0 - 0,0065 \cdot h = 288 - 0,0065 \cdot 8300 = 234,05 \text{ К}.$$

Густина повітря на висоті h

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{37835,6}{287 \cdot 234,05} = 0,563 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Спосіб II. Існують напівемпіричні формули, що описують зниження тиску, густини та температури повітря зі зростанням висоти в межах тропосфери (до висоти 11 км):

$$\begin{aligned} P &= P_0 (1 - h/44300)^{5,256}; \\ \rho &= \rho_0 (1 - h/44300)^{4,256}; \\ T &= T_0 - 0,0065 \cdot h, \end{aligned}$$

де h – висота над рівнем моря, м;

індекс «0» відповідає параметрам повітря на рівні моря.

Підставляючи вихідні дані у вирази, знаходимо

$$P = 101325 \cdot (1 - 8300/44300)^{5,256} = 34052 \text{ Па} = 0,341 \text{ бар} ;$$

$$\rho = \frac{101325}{287 \cdot 288} (1 - 8300/44300)^{4,256} = 1,2259 \cdot 0,4136 = 0,507 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$T = 288 - 0,0065 \cdot 8300 = 234,05 \text{ К}.$$

Перевірка густини з рівняння стану дає таке значення:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{34052}{287 \cdot 234} = 0,507 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Спосіб III. За даними таблиці А.4 шляхом лінійної інтерполяції визначаємо температуру, тиск та густину атмосфери на висоті 8300 м:

$$T = 0,7 \cdot T_{(8 \text{ км})} + 0,3 \cdot T_{(9 \text{ км})} = 0,7 \cdot 236 + 0,3 \cdot 229,5 = 234,05 \text{ К};$$

$$P = 0,7 \cdot P_{(8 \text{ км})} + 0,3 \cdot P_{(9 \text{ км})} = 0,7 \cdot 0,356 \cdot 10^5 + 0,3 \cdot 0,307 \cdot 10^5 = 0,341 \text{ бар};$$

$$\rho = 0,7 \cdot \rho_{(8 \text{ км})} + 0,3 \cdot \rho_{(9 \text{ км})} = 0,7 \cdot 0,525 + 0,3 \cdot 0,466 = 0,507 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Зіставляючи значення p , T та ρ , знайдені різними способами, бачимо хороший збіг за температурою і густиною і задовільний – за тиском (близько 10 %), що пояснюється використаною гіпотезою ізотермічності атмосфери. Обчислення тиску першим способом за середньоарифметичної атмосферної температури $T_{\text{сеп}}$ дало б більш точне значення тиску на висоті h :

$$T_{\text{сеп}} = \frac{T_0 + T_h}{2} = \frac{288 + 234}{2} = 261 \text{ К},$$

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{gh}{RT_{\text{сеп}}}\right) = 101325 \cdot \exp\left(-\frac{9,81 \cdot 8300}{287 \cdot 261}\right) = 34169,9 \text{ Па} = 0,342 \text{ бар},$$

що практично збігається з емпіричним значенням для стандартної атмосфери (див. способи II і III).

1.4. Англійська неметрична одиниця тиску *psi* – фунт-сили на квадратний дюйм (pound per square inch). Використовуючи табл. А1, перевести 10 *psi* в паскалі і технічні атмосфери (ат) (1 фунт = 453,59 г; 1 дюйм = 2,54 см).

1.5. Визначити абсолютний тиск у шахті на глибині 770 м. Атмосферний тиск на поверхні землі становить 750 мм рт. ст. при температурі 27 °С.

1.6. Надлишковий тиск у балоні, заповненому киснем, що лежить на поверхні землі, становить 10 ат. Визначити надлишковий тиск кисню в балоні після підйому його на висоту 6500 м (при цьому температура

балона дорівнює температурі атмосферного повітря), якщо барометричний тиск на рівні моря становить 770 мм рт. ст. за температури 303 К.

1.7. У негерметичному багажному відділенні літака перевозяться балони з аргоном. На висоті 8 км манометри показують тиск $42,4 \text{ кгс/см}^2$. Який тиск покажуть манометри біля поверхні землі, якщо атмосферний тиск становить 752 мм рт. ст. за температури 23°C ?

1.8. Визначити висоту польоту літального апарата, якщо тиск за бортом становить 386 мм рт. ст., тиск біля поверхні землі в цей момент $p_0 = 748 \text{ мм рт. ст.}$, а температура $t_0 = -8^\circ\text{C}$. Знайти швидкість польоту, якщо повний тиск становить 528 мм рт. ст.

1.9 *. Визначити масу повітря у кімнаті площею 24 м^2 і висотою 2,7 м. Температура повітря у кімнаті $t = 20^\circ\text{C}$, а барометричний тиск – 750 мм рт. ст. Знайти густину і питомий об'єм повітря.

Розв'язання. З рівняння стану ідеального газу $m = PV/RT$.

За умовою завдання нам відомо:

тиск повітря $p = 750 \text{ мм рт. ст.} = 750 \cdot 133,332 = 10^5 \text{ Па}$;

об'єм кімнати $V = 24 \cdot 2,7 = 68,4 \text{ м}^3$;

абсолютна температура повітря $T = 20 + 273 = 293 \text{ К}$.

Газова стала повітря $R = R_\mu/\mu$,

де $R_\mu = 8314,45 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ – універсальна газова стала;

μ – молярна маса повітря, що дорівнює $28,965 \text{ кг/кмоль}$.

Знайдемо газову сталу повітря

$$R = \frac{8314,45}{28,965} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Знайдена маса повітря

$$m = \frac{10^5 \cdot 68,4}{287 \cdot 293} = 81,340 \text{ кг}.$$

Густина та питомий об'єм повітря становлять

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{81,34}{68,4} = 1,19 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ або } \rho = \frac{P}{RT} = \frac{10^5}{287 \cdot 293} = 1,19 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,19} = 0,84 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}, \text{ або } v = \frac{V}{m} = \frac{68,4}{81,34} = 0,84 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

$$\text{або } v = \frac{RT}{P} = \frac{287 \cdot 293}{10^5} = 0,84 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

1.10. Знайти об'єм, який займає 1 кіломоляр ідеального газу за н. у., а також при температурі $t = 27^\circ\text{C}$ і тиску $p = 0,1$ бар.

1.11. Газова стала етану C_2H_6 дорівнює $277,6$ Дж/(кг·К). Визначити його питомий об'єм за нормальних фізичних умов.

1.12*. Визначити температуру газу, якщо за абсолютного тиску 5 кгс/см² об'єм 10 кмоль газу становить 120 м³.

Розв'язання. З рівняння стану ідеального газу для N кіломоляр газу $PV = NR_\mu T$, звідки $T = PV/NR_\mu$.

У системі СІ тиск $P = 5$ кгс/см² $= 5 \cdot 0,98 \cdot 10^5 = 4,9 \cdot 10^5$ Па.

Універсальна газова стала $R_\mu = 8314,45$ Дж/(кмоль · К).

Тоді

$$T = \frac{4,9 \cdot 10^5 \cdot 120}{10 \cdot 8314,45} = 707,2\text{K} = 434^\circ\text{C}.$$

1.13. Визначити температуру газу, якщо при надмірному тиску 15 кгс/см² об'єм 100 кіломоляр дорівнює 150 м³. Атмосферний тиск взяти 98 кПа.

1.14. При температурі 100°C та тиску 1 бар густина газу становить $0,0645$ кг/м³. Що це за газ?

1.15*. Яка кількість балонів об'ємом 100 л необхідна для транспортування 180 кг аргону, якщо при температурі $t = 0^\circ\text{C}$ тиск газу в балоні за манометром $p_{\text{ман}} = 12$ МПа? Барометричний тиск $p_{\text{атм}} = 750$ мм рт. ст.

Розв'язання. Кількість аргону в одному балоні визначимо із рівняння стану ідеального газу

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{pV_\mu}{R_\mu T}.$$

Абсолютний тиск аргону дорівнює сумі манометричного та атмосферного тисків:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + p_{\text{атм}} = 12 \cdot 10^6 + 750 \cdot 133,332 = 12,1 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Об'єм одного балона $V = 100$ л $= 0,1$ м³;

абсолютна температура аргону $T = t + 273,15 = 273,15^\circ\text{C}$;

універсальна газова стала $R_\mu = 8314,45$ Дж/(кмоль · К);

молярна маса аргону (див. таблицю А.2) $\mu = 39,944$ кг/кмоль.

Маса газу в одному балоні

$$m = \frac{12,1 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 39,944}{8314,45 \cdot 273,15} = 21,282 \text{ кг}.$$

Необхідна кількість балонів

$$n = \frac{180}{m} = \frac{180}{21,282} = 8,46 \approx 9 \text{ шт.}$$

1.16. Яка кількість балонів об'ємом 40 л необхідна для транспортування 100 кг кисню, якщо за температури $t = 20^\circ\text{C}$ тиск газу в балоні за манометром $p_{\text{ман}} = 8 \text{ МПа}$? Барометричний тиск $p_{\text{атм}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$

1.17. Молекулярна вага природного газу дорівнює 16 кг/кмоль. Визначити його густину і питомий об'єм при нормальних фізичних умовах ($p = 101325 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$), а також при тиску 40 бар і температурі $t = -20^\circ\text{C}$.

1.18. У балоні об'ємом 100 л знаходиться кисень при тиску 125 кг/см² за манометром; його температура – 27°C . Визначити масу кисню та його питомий об'єм. Атмосферний тиск – 760 мм рт. ст.

1.19. У балоні об'ємом 0,1 м³ знаходиться кисень при тиску 6 МПа та температурі 25°C . Після того, як з нього була випущена частина газу, показання манометра стало 3 МПа, а температура знизилася до 7°C . Визначити масу випущеного кисню і його об'єм за н. у.

1.20. Абсолютний тиск азоту в балоні при 20°C дорівнює 25 бар. Якою може бути гранична температура азоту, якщо максимально допустимий за міцністю балона надлишковий тиск становить: 1) 50 бар; 2) 100 бар? Атмосферний тиск вважати 1 бар.

1.21. Гранично допустимий тиск газу в балоні для уникнення вибуху дорівнює 150 кгс/см² за манометром. У цьому балоні знаходиться газ при манометричному тиску 99 кгс/см² і температурі 20°C . До якої температури допустимо нагрівання газу?

1.22. Балон, що містить кисень при тиску $p_{\text{ман}} = 50 \text{ кгс/см}^2$ за манометром і температурі $t_1 = -5^\circ\text{C}$, перенесли до приміщення з температурою $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Який тиск покаже манометр після того, як кисень нагріється до температури навколишнього повітря? Атмосферний тиск прийняти 1 кгс/см².

1.23. Балон, що містить аргон при абсолютному тиску 1,22 МПа і температурі $t_1 = -20^\circ\text{C}$, перенесли в приміщення з температурою $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Яким буде тиск аргону в балоні після того, як аргон нагріється до температури навколишнього повітря?

1.24. У герметично закритому циліндрі поршень може рухатися без тертя. З одного боку поршня вміщено 1 кг водню H_2 , з іншого – 4 кг вуглекислого газу CO_2 . Визначити співвідношення об'ємів циліндра по обидва боки поршня при рівноважному стані системи.

1.25. Маса балона з газом $m_1 = 12,9$ кг, при цьому тиск у балоні за манометром $p_1 = 4$ МПа. Після витрати частини газу при незмінній температурі тиск у балоні знизився до 1,5 МПа, при цьому маса балона з газом зменшилася до $m_2 = 11,4$ кг. Визначити густину газу при тиску 760 мм рт. ст., якщо місткість балона – 50 л. Чому дорівнює маса самого балона?

1.26. Маса балона з газом $m_1 = 9$ кг, при цьому тиск у балоні за манометром $p_1 = 23$ кгс/см². Після витрати частини газу при постійній температурі тиск у балоні знизився до 8 кгс/см², причому маса балона з газом зменшилася до $m_2 = 8,4$ кг. Атмосферний тиск становить 750 мм рт. ст. Знайти масу порожнього балона, якщо його місткість – 30 л. Визначити густину газу при атмосферному тиску і незмінній температурі. Яким газом заповнений балон, якщо атмосферна температура становить 10 °С?

1.27*. Визначити діаметр димової труби для відведення продуктів згоряння 600 кг мазуту за 1 годину. Температура продуктів згоряння на виході $t = 420$ °С, тиск – $p = 1,10$ бар, густина продуктів згоряння за нормальних умов $\rho_0 = 1,23$ кг/м³, швидкість газів у трубі взяти 5 м/с. При згорянні 1 кг мазуту виходить 24 кг димових газів.

Розв'язання. За 1 годину при згорянні 600 кг мазуту утворюється $600 \times 24 = 14400$ кг димових газів, за 1 секунду – відповідно у 3600 разів менше: $G = 14400/3600 = 4$ кг/с.

Масова витрата газу G пов'язана з площею перерізу труби F співвідношенням

$$G = \rho w F,$$

де ρ – густина димових газів;

w – швидкість газів у трубі, $w = 5$ м/с.

Густина димових газів визначається з рівняння стану ідеального газу $\rho = P/RT$,

На виході з труби $P = 1,10$ бар $= 1,1 \cdot 10^5$ Па; $T = 420$ °С $= 693,15$ К.

Газова стала димових газів R не задана, але відома густина димових газів ρ_0 за н. у. ($P_0 = 760$ мм рт. ст. $= 101325$ Па, $T_0 = 0$ °С $= 273,15$ К).

Газова стала димових газів

$$R = \frac{P_0}{\rho_0 T_0} = \frac{101325}{1,23 \cdot 273,15} = 301,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Визначимо густину димових газів у трубі

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{1,1 \cdot 10^5}{301,6 \cdot 693,15} = 0,526 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Площа димової труби $F = G/(pw) = 4/(0,526 \cdot 5) = 1,520 \text{ м}^3$.

Діаметр димової труби $d = \sqrt{4F/\pi} = \sqrt{4 \cdot 1,520/\pi} = 1,391 \text{ м}$.

1.28. Визначити діаметр трубопроводу для подачі 36000 кг/год метану CH_4 при абсолютному тиску 40 бар та температурі 20 °С. Швидкість газу у трубопроводі дорівнює 5 м/с.

1.29. Визначити діаметр повітроводу для подачі 8000 кг/год повітря при абсолютному тиску 1,1 бар та температурі 25 °С. Швидкість повітря у повітроводі дорівнює 5 м/с.

1.30. Продукти згоряння з газовою сталою 289,5 Дж/(кг К) надходять в атмосферу з надлишком тиску 0,15 бар і температурою 490 °С. Наскільки змінився їх питомий об'єм, якщо тиск і температура в камері згоряння дорівнювали 6 бар і 980 °С? Атмосферний тиск вважати таким, що дорівнює 1 бар.

1.31. Газотурбінна установка (ГТУ) на номінальному режимі споживає в годину 300 кг повітря на висоті 0 км ($p = 1 \text{ бар}$, $T = 15 \text{ °С}$). Визначити масову витрату (кг/с) повітря в ГТУ, якщо забір повітря відбувається на висоті 5 км і на висоті 10 км. Параметри стандартної атмосфери див. у таблиці А4.

1.32. У резервуарі об'ємом 12 м³, що містить повітря для пневматичних робіт, тиск дорівнює 8 кгс/см² за манометром при температурі повітря 20 °С. Після використання частини повітря для робіт його тиск зменшився до 2 кгс/см², а температура – до 12 °С. Визначити, скільки кілограмів повітря було витрачено. Атмосферний тиск прийняти 98 кПа.

1.33*. Роторний компресор всмоктує за одну хвилину 0,6 м³ повітря при тиску 0,98 бар і температурі 12 °С і подає його в резервуар об'ємом 100 м³, збільшуючи тиск у ньому до 8 кгс/см² за манометром, причому температура повітря в резервуарі підвищується до 55 °С. Визначити: 1) кількість поданого у резервуар повітря, кг; 2) хвилинну продуктивність компресора, кг/хв; 3) час роботи компресора, хв.

До початку роботи повітря в резервуарі мало параметри зовнішнього атмосферного повітря.

Розв'язання:

1. Кількість поданого в резервуар повітря Δm знайдемо як різницю між кінцевою та початковою масами повітря в резервуарі:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{P_2 V}{RT_2} - \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{V}{R} \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right).$$

Об'єм резервуара $V = 100 \text{ м}^3$; початковий тиск у резервуарі дорівнює атмосферному: $P_1 = 0,98 \text{ бар} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$; абсолютний тиск в кінці нагнітання дорівнює сумі манометричного (надлишкового) та атмосферного тисків:

$$P_2 = P_{\text{ман}} + P_{\text{атм}} = 8 \cdot 0,98 \cdot 10^5 + 0,98 \cdot 10^5 = 9 \cdot 0,98 \cdot 10^5 = 8,82 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

початкова температура повітря $T_1 = 12 \text{ }^\circ\text{C} = 285 \text{ К}$;

кінцева температура стисненого повітря $T_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C} = 328 \text{ К}$;

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{100}{287} \cdot \left(\frac{8,82 \cdot 10^5}{328} - \frac{0,98 \cdot 10^5}{285} \right) = \\ &= \frac{100 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{287} \cdot \left(\frac{9}{328} - \frac{1}{285} \right) = 817,1 \text{ кг}. \end{aligned}$$

2. Хвилинна масова продуктивність компресора $\dot{m}$ – це кількість повітря, що надходить з атмосфери в резервуар за 1 хв. Масова та об'ємна продуктивності пов'язані співвідношенням

$$\dot{m} = \dot{V} \rho.$$

Об'ємна продуктивність компресора $\dot{V} = 0,6 \text{ м}^3/\text{хв}$;

густина атмосферного повітря знайдемо з рівняння стану

$$\rho = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 285} = 1,198 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

хвилинна масова продуктивність компресора

$$\dot{m} = 0,6 \cdot 1,198 = 0,72 \text{ кг/хв}.$$

3. Час роботи компресора

$$\tau = \Delta m / \dot{m} = 817,1 / 0,72 = 1135 \text{ хв} \approx 19 \text{ год}.$$

1.34. Поршневий компресор всмоктує за 1 хвилину 3 м^3 повітря при $t = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску $p = 750 \text{ мм рт. ст.}$, нагнітаючи його резервуар, об'єм якого дорівнює 30 м^3 . Через який проміжок часу тиск у резервуарі досягне значення $0,7 \text{ МПа}$, якщо температуру в ньому вважати незмінною і такою, що дорівнює $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Початковий тиск повітря в резервуарі – атмосферний.

1.35. Відцентровий компресор всмоктує за 1 хвилину $0,2 \text{ м}^3$ повітря при тиску 1 ат і температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і подає його в резервуар об'ємом 50 м^3 , збільшуючи тиск в ньому до 3 кгс/см^2 за манометром, причому температура повітря в резервуарі підвищується до $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити: 1) кількість поданого в резервуар повітря, кг; 2) хвилину продуктивність компресора, кг/хв; 3) час роботи компресора, хв. До початку роботи повітря в резервуарі мало параметри зовнішнього атмосферного повітря.

1.36. З балона зі стисненим воднем об'ємом $0,1 \text{ м}^3$ внаслідок несправності вентиля витікає газ. За температури 20°C манометр показує 50 кгс/см^2 . Через добу манометр показав тиск 20 кгс/см^2 за тієї ж температури. Визначити витік газу за цей час.

1.37. Маса порожнього балона для аргону об'ємом 40 дм^3 дорівнює 52 кг . Визначити масу балона з аргоном, якщо за температури 17°C балон наповнюють газом до манометричного тиску 15 МПа . Як зміниться тиск аргону, якщо балон внести у приміщення з температурою 27°C ?

1.38*. Аеростат заповнений 1000 м^3 гелію з температурою 17°C . Визначити піднімальну силу аеростата, якщо атмосферний тиск дорівнює 1 бар , а температура повітря – 27°C . Маса оболонки аеростата – 200 кг . Тиск гелію всередині оболонки дорівнює атмосферному.

Розв'язання. Архімедова піднімальна сила виникає внаслідок різниці густини середовища і поміщеного в неї тіла. Рівнодіючу сил, що діють на аеростат у вертикальному напрямку, можна записати як

$$P = V(\Delta\rho)g - mg,$$

де V – об'єм оболонки аеростата, $V = 1000 \text{ м}^3$;

$\Delta\rho = \rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{гел}}$ – різниця густини атмосферного повітря та гелію;

m – маса оболонки аеростата, $m = 200 \text{ кг}$;

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

Густину повітря і гелію визначимо з рівняння стану ідеального газу

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{P \cdot \mu}{R_\mu \cdot T}.$$

Універсальна газова стала $R_\mu = 8314,45 \text{ Дж/}(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;

молярна маса повітря $\mu_{\text{пов}} = 28,965 \text{ кг/кмоль}$;

молярна маса гелію $\mu_{\text{гел}} = 4,003 \text{ кг/кмоль}$.

Тиск усередині аеростата вважається таким, що дорівнює атмосферному:

$$p_{\text{атм}} = 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па},$$

тоді густина повітря

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{p_{\text{атм}} \cdot \mu_{\text{пов}}}{R_\mu \cdot T_{\text{пов}}} = \frac{10^5 \cdot 28,965}{8314,45 \cdot 300} = 1,161 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

густина гелію

$$\rho_{\text{гел}} = \frac{p_{\text{атм}} \cdot \mu_{\text{гел}}}{R_\mu \cdot T_{\text{гел}}} = \frac{10^5 \cdot 4,003}{8314,45 \cdot 290} = 0,166 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Піднімальна сила аеростата

$$P = (V \cdot (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{гел}}) - m) \cdot g = \\ = (1000 \cdot (1,161 - 0,166) - 200) \cdot 9,81 = 7800 \text{ Н} = 795 \text{ кг}.$$

1.39. Визначити піднімальну силу кулі, заповненої воднем, на висоті 20 000 м, якщо об'єм оболонки дорівнює 140 м^3 . Тиск і температура водню дорівнюють атмосферним (див. таблицю А.4). Повторити розрахунок за умови, що температура водню становить $+10^\circ\text{C}$.

1.40. Визначити піднімальну силу повітряної кулі діаметром $d_{\text{кул}} = 30 \text{ м}$, заповненої гарячим повітрям із температурою $t_{\text{кул}} = 160^\circ\text{C}$, якщо температура повітря біля землі $t_{\text{атм}} = 20^\circ\text{C}$, тиск $p_{\text{атм}} = 1 \text{ бар}$. Яку корисну масу $m_{\text{гр}}$ може підняти така куля, якщо маса корзини $m_{\text{к}} = 250 \text{ кг}$, маса оболонки кулі $m_{\text{об}} = 2750 \text{ кг}$?

1.41. Визначити піднімальну силу повітряної кулі діаметром $d_{\text{кул}} = 30 \text{ м}$, заповненої гарячим повітрям із температурою $t_{\text{кул}} = 160^\circ\text{C}$, якщо температура повітря біля землі $t_{\text{атм}} = 20^\circ\text{C}$, тиск $p_{\text{атм}} = 1 \text{ бар}$. Яку корисну масу $m_{\text{гр}}$ може підняти така куля, якщо маса корзини $m_{\text{к}} = 250 \text{ кг}$, товщина оболонки кулі $\delta_{\text{об}} = 1,4 \text{ мм}$, щільність матеріалу кулі $\rho_{\text{кул}} = 800 \text{ кг/м}^3$? До якої температури треба підігріти повітря всередині кулі, щоб маса корисного вантажу становила 2500 кг ? Або яким має бути діаметр кулі при незмінній температурі повітря всередині кулі, щоб підняти вказаний вантаж?

1.42. Аеростат заповнений 2000 м^3 водню з температурою 20°C . Визначити піднімальну силу аеростата, якщо атмосферний тиск дорівнює 760 мм рт. ст. , а температура повітря – 15°C . Маса оболонки аеростата – 500 кг . Тиск водню всередині оболонки дорівнює атмосферному.

Тема 2 РЕАЛЬНІ ГАЗИ

*Критичні параметри деяких речовин наведено у таблиці А.3,
z–п-діаграма реального газу – на рисунку Б.1.*

2.1*. Визначити значення поправок a і b у рівнянні стану Ван-дер-Ваальса для водяної пари:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

які знаходяться за умовами для критичної точки

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_{T_{\text{кр}}} = 0 \quad \text{та} \quad \left(\frac{d^2p}{dV^2}\right)_{T_{\text{кр}}} = 0.$$

Розв'язання. Запишемо рівняння Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

у явному вигляді щодо тиску p

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{v^2},$$

і візьмемо похідні

$$\begin{aligned}\left(\frac{dp}{dv}\right)_T &= -\frac{RT}{(v - b)^2} + \frac{2a}{v^3}; \\ \left(\frac{d^2p}{dv^2}\right)_T &= \frac{2RT}{(v - b)^3} - \frac{6a}{v^4}.\end{aligned}$$

У критичній точці виконуються умови

$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_{T_{\text{кр}}} = 0 \quad \text{та} \quad \left(\frac{d^2p}{dv^2}\right)_{T_{\text{кр}}} = 0,$$

звідки маємо систему двох рівнянь із двома невідомими a і b

$$\begin{cases} -\frac{RT_{\text{кр}}}{(v_{\text{кр}} - b)^2} + \frac{2a}{v_{\text{кр}}^3} = 0; \\ \frac{2RT_{\text{кр}}}{(v_{\text{кр}} - b)^3} - \frac{6a}{v_{\text{кр}}^4} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{RT_{кр}}{(v_{кр} - b)^2} = \frac{2a}{v_{кр}^3}; \\ \frac{2RT_{кр}}{(v_{кр} - b)^3} = \frac{6a}{v_{кр}^4}. \end{cases}$$

Розділивши перше рівняння на друге, отримаємо

$$\frac{v_{кр} - b}{2} = \frac{v_{кр}}{3}, \quad v_{кр} = 3b.$$

Після підстановки знайденого виразу для $v_{кр}$ у перше рівняння отримуємо

$$RT_{кр} = \frac{2a(2b)^2}{(3b)^3} = \frac{8a}{27b}.$$

І, нарешті, рівняння Ван-дер-Ваальса дає такий вираз для тиску в критичній точці через поправки a і b :

$$P_{кр} = \frac{RT_{кр}}{(v_{кр} - b)} - \frac{a}{v_{кр}^2} = \frac{8a/27b}{3b - b} - \frac{a}{(3b)^2} = \frac{a}{27b^2}.$$

Тепер, взявши пару будь-яких критичних параметрів, можемо визначити невідомі a і b .

Через $v_{кр}$ і $T_{кр}$ поправки, що шукаються, записуються як

$$a = \frac{9}{8} RT_{кр} v_{кр} \text{ та } b = \frac{v_{кр}}{3}.$$

Значення критичних параметрів водяної пари (див. таблицю А.3):

$$T_{кр} = 647,27 \text{ К}; \quad v_{кр} = \frac{1}{\rho_{кр}} = \frac{1}{317,76} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad p_{кр} = 22,115 \text{ МПа},$$

газова стала водяної пари

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314,45}{18,015} = 461,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Поправки, що шукаються:

$$a = \frac{9}{8} \cdot 461,5 \cdot 647,27 \frac{1}{317,76} = 1057,6 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{1}{3 \cdot 317,76} = 1,049 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Таким чином, значення сталих a і b були визначені без використання $p_{кр}$. З використанням пари параметрів $p_{кр}$ і $T_{кр}$ формули обчислення та значення поправок a і b набудуть вигляду

$$a = \frac{27 R^2 T_{кр}^2}{64 p_{кр}} = \frac{27 \cdot 461,5^2 \cdot 647,27^2}{64 \cdot 22,115 \cdot 10^6} = 1702,2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{1 R T_{кр}}{8 p_{кр}} = \frac{461,5 \cdot 647,27}{8 \cdot 22,115 \cdot 10^6} = 1,688 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

З використанням пари параметрів $p_{кр}$ і $v_{кр}$ поправки a і b набудуть таких значень:

$$a = 3 p_{кр} v_{кр}^2 = \frac{3 \cdot 22,115 \cdot 10^6}{317,76^2} = 657,07 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{v_{кр}}{3} = \frac{1}{3 \cdot 317,76} = 1,049 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Критичні параметри пов'язані із співвідношенням

$$p_{кр} v_{кр} = \frac{3}{8} R T_{кр}.$$

При обчисленні поправок Ван-дер-Ваальса a і b за допомогою різних пар критичних параметрів отримано різні результати. Для водяної пари їх значення наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Формули обчислення поправок Ван-дер-Ваальса та їх значення для H_2O

Критичні параметри, вибрані для розрахунку	Значення поправок a і b рівняння Ван-дер-Ваальса	
	$a, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$	$b, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
$v_{кр}$ і $T_{кр}$	$\frac{9}{8} R T_{кр} v_{кр} = 1057,6$	$\frac{v_{кр}}{3} = 1,049 \cdot 10^{-3}$
$p_{кр}$ і $T_{кр}$	$\frac{27 R^2 T_{кр}^2}{64 p_{кр}} = 1702,2$	$\frac{1 R T_{кр}}{8 p_{кр}} = 1,688 \cdot 10^{-3}$
$p_{кр}$ і $v_{кр}$	$3 p_{кр} v_{кр}^2 = 657,07$	$\frac{v_{кр}}{3} = 1,049 \cdot 10^{-3}$

Така неоднозначність є недоліком рівняння Ван-дер-Ваальса, уникнути якої дають змогу три параметричні рівняння стану, наприклад рівняння Воля (див. задачу 2.5*).

2.2. Використовуючи таблицю А.3, визначити значення поправок a і b у рівнянні Ван-дер-Ваальса для: 1) вуглекислого газу, повітря, хлору, азоту; 2) аргону, кисню, аміаку, етилового спирту, фреону-12 за допомогою різних пар критичних параметрів. Оцінити рівень розбіжності отриманих значень поправок.

2.3. Обчислити критичний тиск $p_{кр}$ за рівнянням стану Ван-дер-Ваальса для вуглекислого газу, повітря, хлору, азоту, метану за відомою критичною температурою $T_{кр}$ і критичний питомий об'єм $v_{кр}$ (див. таблицю А.3). Порівняти розраховане значення тиску з експериментальним, оцінити похибку.

2.4. Використовуючи рівняння Ван-дер-Ваальса, за відомими критичною температурою $T_{кр}$ і критичним тиском $p_{кр}$ обчислити критичний питомий об'єм $v_{кр}$ для аргону, кисню, аміаку, етилового спирту, фреону-12. Порівняти розраховане значення критичного питомого об'єму з експериментальним (див. таблицю А.3), оцінити похибку.

2.5*: Відоме емпіричне рівняння стану Воля

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{T(v - b)} + \frac{c}{T^2 v^3}.$$

Отримати вирази для поправок a , b і c через критичні параметри речовини $p_{кр}$, $T_{кр}$ і $v_{кр}$.

Розв'язання. Критична точка є точкою перегину ізотерми реального газу на p – v -діаграмі, що з математичної точки зору означає перетворення на нуль першої та другої похідних функції $p = f(v)$ у критичній точці:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dv}\right)_{T_{кр}} &= 0; \\ \left(\frac{d^2p}{dv^2}\right)_{T_{кр}} &= 0. \end{aligned}$$

Отримуємо систему трьох рівнянь із трьома невідомими a , b і c

$$\begin{cases} p_{кр} = \frac{RT_{кр}}{(v_{кр} - b)} - \frac{a}{T_{кр}v_{кр}(v_{кр} - b)} + \frac{c}{T_{кр}^2 v_{кр}^3}; \\ \left(\frac{dp}{dv}\right)_{T_{кр}} = 0; \\ \left(\frac{d^2p}{dv^2}\right)_{T_{кр}} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_{\text{кр}} = \frac{RT_{\text{кр}}}{(v_{\text{кр}} - b)} - \frac{a}{T_{\text{кр}} v_{\text{кр}} (v_{\text{кр}} - b)} + \frac{c}{T_{\text{кр}}^2 v_{\text{кр}}^2}; \\ -\frac{RT_{\text{кр}}}{(v_{\text{кр}} - b)^2} + \frac{a(2v_{\text{кр}} - b)}{T_{\text{кр}} v_{\text{кр}}^2 (v_{\text{кр}} - b)^2} - \frac{3c}{T_{\text{кр}}^2 v_{\text{кр}}^4} = 0; \\ \frac{2RT_{\text{кр}}}{(v_{\text{кр}} - b)^3} + \frac{2a}{T_{\text{кр}} v_{\text{кр}}^2 (v_{\text{кр}} - b)^2} - \frac{2a(2v_{\text{кр}} - b)}{T_{\text{кр}} v_{\text{кр}}^3 (v_{\text{кр}} - b)^3} + \frac{12c}{T_{\text{кр}}^2 v_{\text{кр}}^5} = 0. \end{cases}$$

З неї після перетворень можна однозначно визначити невідомі a, b і c , але такий шлях є громіздким і трудомістким.

У цьому завданні можна зробити інакше. Подане вихідне рівняння Воля в канонічному вигляді є залежністю тиску від температури та об'єму. Домножимо кожний доданок на $v^3(v - b)/p$:

$$\begin{aligned} v^3(v - b) &= \frac{RT}{p} v^3 - \frac{a}{pT} v^2 + \frac{c}{pT^2} (v - b); \\ v^4 - \left(\frac{RT}{p} + b\right) v^3 + \frac{a}{pT} v^2 - \frac{c}{pT^2} v + \frac{bc}{pT^2} &= 0. \end{aligned}$$

Вийшов багаточлен четвертого степеня відносно тиску p . У критичній точці всі чотири корені рівняння дійсні і рівні між собою, що дозволяє записати: $(v - v_{\text{кр}})^4 = 0$.

За формулою бінома Ньютона перейдемо до полінома четвертого степеня:

$$v^4 - 4v_{\text{кр}} v^3 + 6v_{\text{кр}}^2 v^2 - 4v_{\text{кр}}^3 v + v_{\text{кр}}^4 = 0.$$

Зіставляючи два поліноми

$$\begin{aligned} v^4 - \left(\frac{RT}{p} + b\right) \cdot v^3 + \frac{a}{pT} \cdot v^2 - \frac{c}{pT^2} \cdot v + \frac{bc}{pT^2} &= 0; \\ v^4 - 4v_{\text{кр}} \cdot v^3 + 6v_{\text{кр}}^2 \cdot v^2 - 4v_{\text{кр}}^3 \cdot v + v_{\text{кр}}^4 &= 0, \end{aligned}$$

отримаємо чотири залежності, що впливають з рівності коефіцієнтів при однакових степенях v :

$$\begin{cases} \frac{RT_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}} + b = 4v_{\text{кр}}; \\ \frac{a}{p_{\text{кр}} T_{\text{кр}}} = 6v_{\text{кр}}^2; \\ \frac{c}{p_{\text{кр}} T_{\text{кр}}^2} = 4v_{\text{кр}}^3; \\ \frac{bc}{p_{\text{кр}} T_{\text{кр}}^2} = v_{\text{кр}}^4. \end{cases}$$

Звідси знайдемо поправки

$$\begin{cases} a = 6v_{\text{кр}}^2 p_{\text{кр}} T_{\text{кр}}; \\ b = v_{\text{кр}}/4; \\ c = 4v_{\text{кр}}^3 p_{\text{кр}} T_{\text{кр}}^2, \end{cases}$$

та зв'язок між термічними параметрами у критичній точці

$$\frac{RT_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}} = 3,75v_{\text{кр}}, \quad p_{\text{кр}} v_{\text{кр}} = \frac{4}{15} RT_{\text{кр}}.$$

2.6. Знайти вирази для сталих a і b за рівнянням стану Бертло

$$\left(p + \frac{a}{T v^2}\right)(v - b) = RT$$

за умовами для критичної точки (див. задачі 2.1* і 2.5*). Визначити зв'язок між термічними параметрами в критичній точці.

2.7. Для водяної пари визначити значення сталих a і b у рівнянні стану Бертло (див. задачу 2.6), які знаходять за умовами для критичної точки (див. задачі 2.1* та 2.5*).

2.8. Визначити значення сталих a і b у рівнянні стану Бертло (див. задачу 2.6) для етилену C_2H_4 , які знаходять за умовами для критичної точки (див. задачі 2.1* та 2.5*). Критичні параметри етилену: $p_{\text{кр}} = 5,042$ МПа; $T_{\text{кр}} = 282,35$ К.

2.9*. Користуючись рівнянням стану Воля (див. задачу 2.5*), визначити значення питомого об'єму $v_{\text{кр}}$ для бензолу C_6H_6 , якщо $p_{\text{кр}} = 4,851$ МПа; $T_{\text{кр}} = 561,6$ К. Порівняти розраховане значення $v_{\text{кр}}$ з експериментальним $v_{\text{кр експ}} = 0,00328$ м³/кг.

Розв'язання. Зв'язок між критичними параметрами рівняння Воля має вигляд (див. задачу 2.5*)

$$p_{\text{кр}} v_{\text{кр}} = \frac{4}{15} RT_{\text{кр}},$$

звідки

$$v_{\text{кр}} = \frac{4}{15} \frac{RT_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}}.$$

Газова стала бензолу C_6H_6 знаходиться за молярною масою $\mu_{C_6H_6}$

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu_{C_6H_6}} = \frac{8314}{78} = 106,59 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Після підстановки числових значень

$$v_{\text{кр}} = \frac{RT_{\text{кр}}}{3,75 p_{\text{кр}}} = \frac{4 \cdot 106,59 \cdot 561,6}{15 \cdot 4,851 \cdot 10^6} = 0,003291 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Похибка при визначенні становить

$$\delta_v = \frac{v_{\text{кр}} - v_{\text{кр.експ}}}{v_{\text{кр.експ}}} 100 \% = \frac{0,003291 - 0,00328}{0,00328} 100 \% = 0,335 \%.$$

2.10. Відомо емпіричне рівняння стану Воля (див. задачу 2.5*). Скориставшись співвідношеннями задачі 2.5 *, визначити критичний тиск для пентану C_5H_{12} , якщо його критична температура $T_{\text{кр}} = 470,2 \text{ К}$ і критичний мольний об'єм $\mu v_{\text{кр}} = 0,312 \text{ м}^3/\text{кмоль}$. Порівняти розраховане значення $p_{\text{кр}}$ з експериментальним $p_{\text{кр.експ}} = 3,35 \text{ МПа}$.

2.11. Користуючись рівняннями стану Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1* і 2.5*), визначити значення $v_{\text{кр}}$ для фреону-115 C_2F_5Cl , якщо відомі $p_{\text{кр}} = 3,192 \text{ МПа}$ і $T_{\text{кр}} = 353,09 \text{ К}$. Порівняти розраховані значення критичного об'єму $v_{\text{кр}}$ з експериментальним $v_{\text{кр.експ}} = 0,001499 \text{ м}^3/\text{кг}$.

2.12. Користуючись рівняннями стану Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1*, 2.5*), визначити значення $p_{\text{кр}}$ для аміаку NH_3 , якщо відомі $\rho_{\text{кр}} = 0,235 \text{ кг/м}^3$, $T_{\text{кр}} = 405,5 \text{ К}$. Зіставити розраховані значення критичного тиску $p_{\text{кр}}$ з експериментальним $p_{\text{кр.експ}} = 10,934 \text{ МПа}$.

2.13. Обчислити критичну температуру $T_{\text{кр}}$ для хлору Cl_2 за рівняннями стану Воля і Ван-дер-Ваальса (див. задачі 2.1* і 2.5*), якщо його критичні тиск $p_{\text{кр}}$ та об'єм $v_{\text{кр}}$ відповідно дорівнюють $7,711 \text{ МПа}$ та $0,001715 \text{ м}^3/\text{кг}$. Порівняти розраховані значення $T_{\text{кр}}$ з експериментальною критичною температурою $T_{\text{кр.експ}} = 417,17 \text{ К}$, оцінити похибки розрахунку.

2.14. Обчислити критичний тиск для вуглекислого газу CO_2 за рівняннями стану Воля та Ван-дер-Ваальса (див. задачі 2.1* та 2.5*) за

відомою критичною густиною $\rho_{\text{кр}}$ та критичною температурою $T_{\text{кр}}$ (див. таблицю А.3). Порівняти розраховане значення критичного тиску $p_{\text{кр}}$ з експериментальним.

2.15. Обчислити критичну температуру $T_{\text{кр}}$ для хлорбензолу $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ за рівняннями стану Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1*, 2.5*), якщо його критичний тиск $p_{\text{кр}} = 4,523 \text{ МПа}$ та критичний мольний об'єм $\mu v_{\text{кр}} = 0,308 \text{ м}^3/\text{кмоль}$. Порівняти розраховані значення $T_{\text{кр}}$ з експериментальним $T_{\text{кр експ}} = 632,3 \text{ К}$.

2.16. Обчислити критичний тиск для пропану C_3H_8 за рівнянням стану Бертло (див. задачу 2.6) за відомим критичним об'ємом $v_{\text{кр}} = 0,004566 \text{ м}^3/\text{кг}$ і критичною температурою $T_{\text{кр}} = 369,8 \text{ К}$ (див. задачу 2.5*). Порівняти розраховане значення $p_{\text{кр}}$ за рівнянням стану Бертло з експериментальним $p_{\text{кр експ}} = 4,245 \text{ МПа}$.

2.17. Користуючись рівняннями стану Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1*, 2.5*), визначити значення критичної густини $\rho_{\text{кр}}$ для пропілену C_3H_6 , якщо відомі $p_{\text{кр}} = 4,614 \text{ МПа}$ і $T_{\text{кр}} = 364,95 \text{ К}$. Зіставити розраховані значення критичної густини $\rho_{\text{кр}}$ з експериментальним $\rho_{\text{кр експ}} = 238,8 \text{ кг/м}^3$ (див. таблицю А.3).

2.18*. Початковий стан азоту задано параметрами $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\rho_1 = 80,0 \text{ кг/м}^3$. Яка буде температура азоту після нагрівання при $p = \text{const}$, якщо його об'єм збільшиться вдвічі? Наскільки зміниться кінцева температура в тому випадку, коли при тих же числових даних нагрівається вуглекислий газ (критичні параметри азоту і вуглекислого газу див. у таблиці А.3)?

Розв'язання. Критична температура азоту становить $t_{\text{кр}} = -146,9 \text{ }^\circ\text{C}$, тому за температури $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ азот є ідеальним газом і підпорядковується рівнянню стану Менделєєва – Клапейрона $p = pRT$. У процесах, що відбуваються при $p = \text{const}$, змінення температури є прямо пропорційним зміненню об'єму:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Отже, абсолютна температура азоту також збільшилась би удвічі і становила $T_2 = 2T_1 = 2(30 + 273,15) = 606,3 \text{ К} = 333,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обчислимо тиск азоту в такому ізобаричному процесі:

$$p = p_1 RT_1 = 80,0 \frac{8314,45}{28,0} 303,15 = 72,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 72 \text{ бар}.$$

Щоб перевірити правильність припущення про ідеально-газовий стан азоту, обчислимо це значення тиску за рівнянням Ван-дер-Ваальса (тут і далі позначено *):

$$p_* = \frac{RT_1}{v_1 - b} - \frac{a}{v_1^2} = \frac{RT_1}{1/p_1 - b} - ap_1^2.$$

Тут $R = 296,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала азоту;

a і b – ван-дер-ваальсівські поправки, які для азоту становлять (див. задачу 2.1*)

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_{\text{кр}}^2}{p_{\text{кр}}} = \frac{27}{64} \frac{296,9^2 \cdot (273,15 - 146,9)^2}{3,396 \cdot 10^6} = 174,58 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{RT_{\text{кр}}}{8p_{\text{кр}}} = \frac{296,9 \cdot 126,25}{8 \cdot 3,396 \cdot 10^6} = 138 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$p_* = \frac{296,9 - 303,15}{0,0125 - 138 \cdot 10^{-5}} - 174,58 \cdot 80^2 = 69,78 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 70 \text{ бар}.$$

Значення тисків, що були розраховані за формулами ідеального газу та Ван-дер-Ваальса, відрізняються менше ніж на 3 %.

Температура у кінці нагрівання, яка розрахована для ван-дер-ваальсівського газу, становитиме

$$\begin{aligned} T_{2*} &= \frac{1}{R} \left(p + \frac{a}{v_2^2} \right) (v_2 - b) = \frac{1}{R} (p + ap_2^2) \left(\frac{1}{p_2} - b \right) = \\ &= \frac{1}{296,9} (69,78 \cdot 10^5 + 174,58 \cdot 40^2) (0,025 - 138 \cdot 10^{-5}) = \\ &= 577,3 \text{ К} = 304,15 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Для азоту розбіжність за температурою становить близько 5 %.

Загальний висновок: при температурах газу, що значно перевищують критичну, можна користуватися ідеально-газовою моделлю.

Вуглекислий газ має критичну температуру $t_{\text{кр}} = +31,05 \text{ } ^\circ\text{C}$. При температурах, близьких до критичної і нижче за неї, рівняння стану ідеального газу дає дуже великі похибки і необхідно користуватися рівнянням стану реального газу, наприклад Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

де p , v , T – тиск, питомий об'єм ($v = 1/p$) і температура газу;

R – газова стала, яка для CO_2 дорівнює $189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

a і b – ван-дер-ваальсівські поправки, які для вуглекислого газу становлять

$$a = \frac{27 R^2 T_{\text{кр}}^2}{64 p_{\text{кр}}} = \frac{27 \cdot 189^2 \cdot (31,05 + 273,15)^2}{64 \cdot 73,83 \cdot 10^5} = 188,88 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{RT_{\text{кр}}}{8p_{\text{кр}}} = \frac{189 \cdot 304,2}{8 \cdot 73,83 \cdot 10^5} = 97,34 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

У початковий момент температура вуглекислого газу CO_2 $T_1 = 303,15 \text{ К}$, його питомий об'єм $v_1 = 1/\rho_1 = 0,0125 \text{ м}^3/\text{кг}$, його тиск, знайдений за рівнянням Ван-дер-Ваальса,

$$p_* = \frac{RT_1}{v_1 - b} - \frac{a}{v_1^2} = \frac{189 \cdot 303,15}{0,0125 - 97,34 \cdot 10^{-5}} - \frac{188,88}{0,0125^2} = 37,62 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

В кінці процесу при $p = \text{const} = 37,62 \cdot 10^5 \text{ Па}$ питомий об'єм CO_2

$$v_2 = 2v_1 = 0,025 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Шукана температура CO_2 із рівняння Ван-дер-Ваальса

$$\begin{aligned} T_{2*} &= \frac{1}{R} \left(p + \frac{a}{v_2^2} \right) (v_2 - b) = \\ &= \frac{1}{189} \left(37,62 \cdot 10^5 + \frac{188,88}{0,025^2} \right) (0,025 - 97,34 \cdot 10^{-5}) = 516,65 \text{ К} = 243,5 \text{ }^\circ\text{С}. \end{aligned}$$

Розрахунок за рівнянням стану ідеального газу дав би такі значення тиску $p_2 = p_1$ і температури T_2 вуглекислого газу:

$$p_2 = p_1 = \rho_1 RT_1 = 80,0 \cdot 189 \cdot 303,15 = 45,84 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_2 = 2T_1 = 2(30 + 273,15) = 606,3 \text{ К} = 333,15 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Похибка розрахунку тиску в цьому випадку становила б

$$\delta_p = \frac{p_* - p}{p_*} 100 \% = \frac{37,62 - 45,84}{37,62} 100 \% = -21,85 \%,$$

а температури –

$$\delta_T = \frac{T_* - T}{T_*} 100 \% = \frac{516,65 - 606,3}{516,65} 100 \% = -17,35 \%.$$

Загальний висновок: рівняння ідеального газу дає завищені значення тиску і температури порівняно з рівняннями реального газу.

2.19*. Визначити абсолютний тиск у балоні об'ємом 12 л, що містить 2 кг кисню при температурах: 1) $t_1 = -100 \text{ }^\circ\text{С}$ та 2) $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{С}$.

Розв'язання:

1. Критична температура кисню $T_{\text{кр}} = -118,8 \text{ }^\circ\text{С}$, тому для розрахунку тиску при $t_1 = -100 \text{ }^\circ\text{С}$ будемо використовувати рівняння стану реального газу (наприклад, Ван-дер-Ваальса)

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT,$$

де p, v, T – відповідно тиск, питомий об'єм і температура газу;

R – газова стала, яка для кисню становить

$$R = \frac{R_\mu}{\mu_{O_2}} = \frac{8314,45}{32} = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

a і b – ван-дер-ваальсівські поправки, які для кисню становлять

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_{\text{кр}}^2}{p_{\text{кр}}} = \frac{27}{64} \frac{259,8^2 (-118,8 + 273,15)^2}{48,7 \cdot 10^5} = 139,3 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{RT_{\text{кр}}}{8p_{\text{кр}}} = \frac{259,8 \cdot 154,35}{8 \cdot 48,7 \cdot 10^5} = 0,00103 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Питомий об'єм кисню

$$v = \frac{V}{m} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{2,0} = 0,006 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Тиск

$$p_1 = \frac{RT_1}{v - b} - \frac{a}{v^2} = \frac{259,8 \cdot 173,15}{0,006 - 0,00103} - \frac{139,3}{0,006^2} = 51,82 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Розрахунок, проведений за рівнянням стану ідеального газу, дав би значення тиску

$$p_1^* = \frac{RT_1}{v} = \frac{259,8 \cdot 173,15}{0,006} = 74,97 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

похибка у цьому випадку становила б

$$\delta_{p_1} = \frac{p_1^* - p_1}{p_1} 100 \% = \frac{74,97 - 51,82}{51,82} 100 \% = 44,7 \%.$$

2. Температура $T_2 = 323,15 \text{ К}$ для кисню – далека від критичної, тому тиск p_2^* можна знайти з рівняння стану ідеального газу

$$p_2^* = \frac{RT_2}{v} = \frac{259,8 \cdot 323,15}{0,006} = 139,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Рівняння Ван-дер-Ваальса дає таке значення тиску

$$p_2 = \frac{RT_2}{v - b} - \frac{a}{v^2} = \frac{259,8 \cdot 323,15}{0,006 - 0,00103} - \frac{139,3}{0,006^2} = 130,2 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

розбіжність величин p_2^* і p_2 у цьому випадку – близько 7 %:

$$\delta_{p_2} = \frac{p_2^* - p_2}{p_2} 100 \% = \frac{139,9 - 130,2}{130,2} 100 \% = 7,5 \%.$$

2.20. Початковий стан повітря визначено параметрами $t_1 = 27^\circ\text{C}$ і $\rho_1 = 90,0 \text{ кг/м}^3$. Яка буде температура повітря після нагрівання при $p = \text{const}$, якщо його густина зменшиться втричі? Як зміниться кінцева температура у тому випадку, коли при тих же числових даних нагрівається фреон-115? (Критичні параметри повітря та фреону-115 див. у таблиці А.3).

2.21. Визначити абсолютний тиск у балоні об'ємом 30 л, що містить 7,5 кг азоту при температурах: 1) $t_1 = -130^\circ\text{C}$, 2) $t_2 = 50^\circ\text{C}$.

2.22. Визначити абсолютний тиск у балоні об'ємом 10 л, що містить 2,0 кг аргону при температурах: 1) $t_1 = -100^\circ\text{C}$, 2) $t_2 = 20^\circ\text{C}$.

2.23. Користуючись рівняннями стану ідеального газу та Ван-дер-Ваальса, визначити температуру аргону в балоні об'ємом 10 л, що містить: 1) 1 кг, 2) 1,3 кг газу при абсолютному тиску $p = 40 \text{ бар}$.

2.24*. Експериментально визначено параметри вуглекислого газу: $p = 100 \text{ ат}$, $t = 258^\circ\text{C}$, $v = 0,00932 \text{ м}^3/\text{кг}$. Зіставити експериментальне значення питомого об'єму v зі значеннями, розрахованими за рівняннями Менделєєва – Клапейрона, Ван-дер-Ваальса і знайдених за допомогою z - π -діаграми при зазначених величинах t і p . Критичні параметри вуглекислого газу наведено в таблиці А.3, z - π -діаграму подано на рисунку Б.1.

Розв'язання:

1. Газова стала вуглекислого газу

$$R = \frac{R_\mu}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{8314,45}{44,0098} = 188,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

За рівнянням Менделєєва – Клапейрона

$$v_{\text{иг}} = \frac{RT}{p} = \frac{188,9 \cdot (258 + 273,15)}{100 \cdot 0,98 \cdot 10^5} = 0,01024 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

а похибка розрахунку у цьому разі становить

$$\delta_{\text{иг}} = \frac{v_{\text{иг}} - v_{\text{екс}}}{v_{\text{екс}}} 100 \% = \frac{0,01024 - 0,00932}{0,00932} 100 \% = 9,81 \%.$$

2. Критична температура вуглекислого газу $T_{\text{кр}} = 304,2 \text{ К}$, критичний тиск $p_{\text{кр}} = 7,383 \text{ МПа}$, ван-дер-ваальсівські поправки a і b мають такі значення (див. задачу 2.1*):

$$a = \frac{27}{64} = \frac{R^2 T_{\text{кр}}^2}{p_{\text{кр}}} = \frac{27 \cdot 188,9 \cdot 304,2^2}{64 \cdot 73,83 \cdot 10^5} = 188,68 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2};$$

$$b = \frac{RT_{\text{кр}}}{8p_{\text{кр}}} = \frac{188,9 \cdot 304,2}{8 \cdot 73,83 \cdot 10^5} = 97,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Рівняння Ван-дер-Ваальса подамо у вигляді

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) - RT = 0,$$

і розв'яжемо його модифікованим методом половинного поділу, фіксуючи параметри p, T і R і змінюючи з певним кроком Δv питомий об'єм v . При цьому щоразу обчислюємо праву частину ψ рівняння

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) - RT = \psi.$$

Спочатку задаємо значення $v = 0,01024 \text{ м}^3/\text{кг}$, отримане у попередньому розрахунку, і крок $\Delta v = -0,0001 \text{ м}^3/\text{кг}$ (оскільки густина реального газу вище, ніж ідеального, за інших рівних умов). Визначаємо інтервал з v , в якому знаходиться корінь рівняння — тут ψ змінює знак:

Перша ітерація

Крок $\Delta v = -10^{-4}$

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	ψ
0,010240	7149,752
0,010140	6316,798
0,010040	5486,423
0,009940	4658,694
0,009840	3833,679
0,009740	3011,451
0,009640	2192,084
0,009540	1375,655
0,009440	562,243
0,009340	-248,069
0,009240	-1055,20
0,009140	-1859,05

Друга ітерація

Крок $\Delta v = -10^{-5}$

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	ψ
0,009440	562,2433
0,009430	481,0712
0,009420	399,9302
0,009410	318,8204
0,009400	237,7418
0,009390	156,6945
0,009380	75,6786
0,009370	-5,3057
0,009360	-86,2585
0,009350	-167,180
0,009340	-248,069
0,009330	-328,926

Третя ітерація

Крок $\Delta v = -10^{-6}$

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	ψ
0,009380	75,6786
0,009379	67,5788
0,009378	59,4792
0,009377	51,3800
0,009376	43,2811
0,009375	35,1825
0,009374	27,0842
0,009373	18,9863
0,009372	10,8886
0,009371	2,7913
0,009370	-5,3057
0,009369	-13,4024

У другій ітерації звужуємо область пошуку кореня рівняння знайденим інтервалом від $0,009440 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $0,009340 \text{ м}^3/\text{кг}$ і зменшуємо крок Δv на один порядок: $\Delta v = -10^{-5}$ і т. д.

У третій ітерації знаходимо корінь $v_{\text{ВДВ}} = 0,0093707 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Похибка розрахунку у цьому випадку становитиме

$$\delta_{\text{ВДВ}} = \frac{v_{\text{ВДВ}} - v_{\text{ЕКС}}}{v_{\text{ЕКС}}} 100 \% = \frac{0,0093707 - 0,00932}{0,00932} 100 \% = 0,544 \%.$$

3. Користуючись теорією подібності, визначаємо зведену температуру вуглекислого газу

$$\tau = \frac{T}{T_{\text{кр}}} = \frac{258 + 273,15}{304,2} = 1,746;$$

та зведений тиск

$$\pi = \frac{p}{p_{\text{кр}}} = \frac{100 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{73,83 \cdot 10^5} = 1,327.$$

За z - π -діаграмою (рисунок Б.1) знаходимо коефіцієнт стиснення $z = 0,92$ для питомого об'єму, тоді

$$v_z = z \frac{RT}{p} = z \cdot v_{\text{иг}} = 0,92 \cdot 0,01024 = 0,00942 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

похибка у цьому разі буде такою:

$$\delta_z = \frac{v_z - v_{\text{екс}}}{v_{\text{екс}}} 100 \% = \frac{0,00942 - 0,00932}{0,00932} 100 \% = 1,07 \%.$$

Висновок: у цій задачі рівняння стану ідеального газу дає похибку близько 10 %, рівняння реального газу – близько 1 %.

2.25*. Визначити тиск водяної пари масою 2,7 кг, яка знаходиться у посудині об'ємом 30 дм³, якщо температура пари дорівнює 600 °С. Порівняти розрахунок із дослідним тиском, який дорівнює 29,5 МПа.

Розв'язання. Газова стала водяної пари H_2O

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Питомий об'єм водяної пари $v = V/m = 0,03/2,7 = 0,01111 \text{ м}^3/\text{кг}$.

1. Згідно з рівнянням Менделєєва — Клапейрона тиск

$$p = \frac{RT}{v} = \frac{461,9 \cdot 873}{0,01111} = 36,26 \text{ МПа}.$$

2. Ван-дер-ваальсівські поправки a і b для H_2O , обчислені через $v_{\text{кр}}$ і $T_{\text{кр}}$, мають такі значення (див. задачу 2.1*):

$$a = \frac{9}{8} RT_{\text{кр}} v_{\text{кр}} = 1057 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}; \quad b = \frac{v_{\text{кр}}}{3} = 1,049 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Шуканий ван-дер-ваальсівський тиск

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{v^2} = \frac{461,9 \cdot 873}{(0,01111 - 0,00105)} - \frac{1057,6}{0,01111^2} = 31,52 \text{ МПа}.$$

Якщо поправки a і b обчислити через $p_{\text{кр}}$ і $T_{\text{кр}}$ (див. задачу 2.1*), то

$$a = \frac{27R^2T_{\text{кр}}^2}{p_{\text{кр}}} = 1702,2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}, \quad b = \frac{1}{8} \frac{RT_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}} = 1,688 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

а для тиску газу отримаємо дещо відмінне значення

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{v^2} = \frac{461,9 \cdot 873}{(0,01111 - 0,00169)} - \frac{1702,2}{0,01111^2} = 28,97 \text{ МПа.}$$

3. Поправки a , b та c за рівнянням Воля для H_2O (див. задачу 2.5*) становитимуть

$$\begin{cases} a = 6v_{кр}^2 p_{кр} T_{кр} = 8,506 \cdot 10^5; \\ b = v_{кр}/4 = 0,000787; \\ c = 4v_{кр}^3 p_{кр} T_{кр}^2 = 1,155 \cdot 10^6. \end{cases}$$

Тиск за рівнянням Воля

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{T_v(v - b)} + \frac{c}{T^2 v^3} = \frac{461,9 \cdot 873}{(0,01111 - 0,000787)} - \frac{8,506 \cdot 10^5}{873 \cdot 0,01111 \cdot (0,01111 - 0,000787)} + \frac{1,155 \cdot 10^6}{873^2 \cdot 0,01111^3} = 31,64 \text{ МПа.}$$

Загальний висновок: при обчисленні тиску водяної пари похибка за рівнянням ідеального газу становить 22,9 %, за рівнянням Ван-дер-Ваальса у першому випадку (коли a і b обчислені через $v_{кр}$ і $T_{кр}$) – 6,8 %, у другому випадку (коли a і b обчислені через $p_{кр}$ і $T_{кр}$) – 1,8 %, за рівнянням Воля – 7,25 %.

2.26. Резервуар об'ємом 8 м^3 заповнений киснем при тиску $p = 50 \text{ бар}$ і температурі $t = -120 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити масу кисню, використовуючи рівняння стану ідеального та реального газу (z - π -діаграму на рисунку Б.1).

2.27. Визначити тиск водяної пари при $t = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ та $v = 0,283 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}$. Розрахунок виконати за рівняннями Менделєєва – Клапейрона, Ван-дер-Ваальса та Воля. Порівняти отримані результати з дійсним значенням тиску, яке при цих параметрах дорівнює 30 МПа.

2.28. Визначити масу водяної пари, яка знаходиться у посудині об'ємом 30 дм^3 , якщо температура пари дорівнює $600 \text{ }^\circ\text{C}$, а тиск – 29,5 МПа. (Критичні параметри води дивись у таблиці А.3).

2.29. Визначити тиск пари води, отриманої нагріванням із 300 кг води в котлі об'ємом 10 м^3 при температурах пари: $t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. (Критичні параметри води дивись у таблиці А.3).

2.30. Відома експериментальна залежність густини парів вуглекислого газу від температури і тиску (таблиця 2.2).

Користуючись рівняннями Менделєєва – Клапейрона, Ван-дер-Ваальса та z - π -діаграмою (рисунки Б.1), розрахувати значення густини вуглекислого газу для заданих тисків і температур. Порівняти розрахункові значення з експериментальними, оцінити похибку.

Таблиця 2.2 – Експериментальна залежність густини парів вуглекислого газу від температури і тиску

№ п/п	p , МПа	T , °С	ρ , кг/м ³
1	5	250	51,98
2	10	300	94,89
3	30	350	253,5
4	35	350	292,0

2.31. Відома експериментальна залежність тиску парів вуглекислого газу від температури та густини (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Експериментальна залежність тиску парів вуглекислого газу від температури та густини

№ п/п	T , °С	ρ , кг/м ³	p , МПа
1	80	221,9	10
2	100	425,6	18
3	180	280,9	20

Користуючись рівняннями Менделєєва – Клапейрона, Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1 *, 2.5 *), розрахувати значення тиску вуглекислого газу для заданих густин і температур. Порівняти розрахункові значення з експериментальними, оцінити похибку.

2.32. Використовуючи рівняння ідеального газу, Ван-дер-Ваальса і Воля (див. задачі 2.1*, 2.5*), визначити тиск водяної пари за таких параметрів:

1) $t = 330$ °С; $v = 0,250$ м³/кг, 2) $t = 247$ °С; $v = 0,00324$ м³/кг.

Порівняти отримані результати.

2.33. Балон об'ємом 100 л заповнений вуглекислим газом з параметрами $p = 140$ бар, $t = 24$ °С. Використовуючи рівняння стану ідеального та реального газу, визначити масу вуглекислого газу.

2.34. Балон об'ємом 50 л заповнений повітрям з параметрами $p = 75$ бар, $t = -80$ °С. Використовуючи рівняння стану ідеального та реального газу, визначити масу повітря.

2.35. У балоні об'ємом 40 л знаходиться азот під тиском 140 бар при температурі $t = -110$ °С. Користуючись рівняннями ідеального газу, Ван-дер-Ваальса та z - π -діаграмою (рисунок Б.1), визначити питомий об'єм та масу азоту та порівняти отримані результати.

Тема 3 СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

3.1. Визначити значення газових сталих для аміаку NH_3 , метану CH_4 , етилену C_2H_4 , окису вуглецю, вуглекислого газу CO_2 .

Чому дорівнює молярна маса заданої суміші ацетилену C_2H_2 , етану C_2H_6 і пропану C_3H_8 , якщо відомо, що за об'ємом вона складається з 25 % ацетилену, 45 % етану і 30 % пропану? Знайти питомий об'єм суміші за н. у.

3.2. Повітря, якщо вважати, що воно є сумішшю тільки азоту і кисню, має такий об'ємний склад: азоту – 79 %, кисню – 21 %. Визначити масові частки азоту та кисню в повітрі, обчислити газову сталу повітря.

3.3. При зануренні аквалангіста на глибину для дихання замість повітря подається суміш кисню та гелію. Розрахувати об'ємні та масові частки обох газів для дихальної суміші на глибині 20 м; 40 м; 80 м. Чому аквалангіст не може дихати звичайним стисненим повітрям?

3.4*. Визначити питомий об'єм продуктів згоряння карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) за н. у., а також при тиску 1,5 бар та температурі 900 °С, якщо відомий їх масовий склад (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Масовий склад продуктів згоряння карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння

Компонент	CO_2	H_2O	O_2	N_2
Масова частка g_i	0,181	0,075	0,020	0,724

Обчислити також молярну масу продуктів згоряння, їх газову сталу і парціальні тиски компонентів за н. у.

Розв'язання. Визначимо газову сталу суміші

$$R_{\text{сум}} = \sum (g_i R_i) = \sum \left(g_i \frac{R_\mu}{\mu_i} \right) = R_\mu \sum \frac{g_i}{\mu_i}.$$

Молярні маси компонентів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Молярні маси компонентів продуктів згоряння карбюраторного ДВЗ

Компонент	CO_2	H_2O	O_2	N_2
Молярна маса $\mu_i, \text{кг/кмоль}$	44	18	32	28

Газова стала суміші

$$R_{\text{сум}} = 8314 \cdot \left(\frac{0,181}{44} + \frac{0,075}{18} + \frac{0,020}{32} + \frac{0,724}{28} \right) = 289,0 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Молярна маса суміші пов'язана з газовою сталою формулою

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}},$$

звідки

$$\mu_{\text{сум}} = \frac{R_{\mu}}{R_{\text{сум}}} = \frac{8314}{289} = 28,77 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Питомий об'єм продуктів згоряння за нормальних умов ($p = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$, $T = 0^{\circ}\text{C} = 273 \text{ К}$) визначимо з рівняння стану суміші ідеальних газів $p_{\text{сум}} v_{\text{сум}} = R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}$, звідки

$$v_{\text{сум}} = \frac{R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}}{p_{\text{сум}}} = \frac{289 \cdot 273}{101325} = 0,779 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

При $p_{\text{сум}} = 1,5 \text{ бар} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ та $T_{\text{сум}} = 900^{\circ}\text{C} = 1173 \text{ К}$ питомих об'єм

$$v_{\text{сум}} = \frac{R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}}{p_{\text{сум}}} = \frac{289 \cdot 1173}{1,5 \cdot 10^5} = 2,260 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Для знаходження парціальних тисків компонентів визначимо спочатку їх об'ємні частки r_i за формулою

$$r_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum (g_i / \mu_i)} = \frac{g_i / \mu_i}{1 / \mu_{\text{сум}}} = \mu_{\text{сум}} \frac{g_i}{\mu_i}.$$

Результати розрахунків наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків

Компонент	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
Об'ємна частка r_i	0,1183	0,1199	0,0179	0,7439

(Перевірка: $\sum r_i = 0,1183 + 0,1199 + 0,0179 + 0,7439 = 1,0000$).

Парціальний тиск компонента p_i знаходимо з рівняння стану суміші, яке можна записати двояко:

$$\begin{cases} p_i V_{\text{сум}} = m_{\text{сум}} R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}; \\ p_{\text{сум}} V_i = m_{\text{сум}} R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}, \end{cases}$$

як наслідок,

$$p_i = \frac{V_i}{V_{\text{сум}}} \cdot p_{\text{сум}} = r_i \cdot p_{\text{сум}}.$$

За загального тиску суміші $p_{\text{сум}} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$ парціальні тиски компонентів p_i мають значення, що наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Парціальні тиски компонентів продуктів згоряння

Компонент	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
p_i , кПа	11,990	12,150	1,814	75,380

3.5*. Продукти згоряння 1 кг бензину в авіаційному моторі мають такий мольний склад (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Мольний склад продуктів згоряння 1 кг бензину в авіаційному моторі

Компонент	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
N_i , кмоль	0,07125	0,07250	0,0215	0,4883

Температура цих газів на вихлопі дорівнює 900 °С, температура до-вкілля $t_0 = 0$ °С, тиск $p_0 = 0,85$ бар. Визначити відсоток теплових втрат з витічними газами. Теплотворна здатність бензину становить 43950 кДж/кг.

Розв’язання. Теплоємність продуктів згоряння 1 кг бензину знаходять за формулою

$$C = \sum (N_i \cdot \mu_{c_i}),$$

де N_i – кількість кіломолей i -го компонента суміші;

μ_{c_i} , кДж/(кг · К) – мольна теплоємність i -го компонента суміші.

За таблицею А.5 знаходимо ізобарні мольні теплоємності компонентів при $t = 900$ °С.

Таблиця 3.6 – Ізобарні мольні теплоємності компонентів продуктів згоряння при $t = 900$ °С

Компонент	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
μ_{c_i} , кДж/(кмоль · К)	48,29	37,77	32,83	31,08

Тоді

$$\begin{aligned} C &= \sum N_i \cdot \mu_{c_i} = \\ &= 0,07125 \cdot 48,29 + 0,0725 \cdot 37,77 + 0,0215 \cdot 32,83 + 0,4883 \cdot 31,08 = \\ &= 22,061 \text{ кДж/К.} \end{aligned}$$

Теплота, відведена з витічними газами (у розрахунку на 1 кг спаленого бензину),

$$Q = C \cdot \Delta T = 22,061 \cdot 900 = 19855 \text{ кДж.}$$

Відсоток теплових втрат з витічними газами

$$\eta_{\text{втрат}} = \frac{Q}{H} 100 \% = \frac{19855}{43950} 100 \% = 45,18 \%,$$

де H – теплотворна здатність бензину, $H = 43\,950$ кДж/кг.

За необхідності можна також визначити:

– кількість кіломолей продуктів згоряння

$$N = \sum N_i = 0,07125 + 0,0725 + 0,0215 + 0,4883 = 0,65355 \text{ кмоль;}$$

– кількість продуктів згоряння, що утворюються при згорянні 1 кг бензину,

$$M = \sum N_i \cdot \mu_i = 0,07125 \cdot 44 + 0,0725 \cdot 18 + 0,0215 \cdot 32 + 0,4883 \cdot 28 = 18,8004 \text{ кг},$$

(це означає, що на 1 кг бензину припадає 17,8 кг повітря);

– молярну масу продуктів згоряння

$$\mu = \frac{M}{N} = \frac{\sum N_i \cdot \mu_i}{\sum N_i} = \frac{0,07125 \cdot 44 + 0,0725 \cdot 18 + 0,0215 \cdot 32 + 0,4883 \cdot 28}{0,07125 + 0,0725 + 0,0215 + 0,4883} = \frac{18,8004}{0,65355} = 28,767 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

– газову сталу продуктів згоряння

$$R = R_\mu / \mu = 8314,45 = 289,03 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

– густину продуктів згоряння на вихлопі (тиск продуктів згоряння дорівнює атмосферному тиску $p_{\text{атм}} = 0,85 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура $t = 90^\circ \text{C} = 1173 \text{ К}$)

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{0,85 \cdot 10^5}{289,03 \cdot 1173} = 0,2507 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

3.6. Обчислити об'ємний і масовий склад продуктів згоряння, їх густину за н. у. і при тиску $p = 1,2 \text{ бар}$ та температурі $t = 1000^\circ \text{C}$, якщо відомий мольний склад продуктів згоряння (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7 – Мольний склад продуктів згоряння

Компонент	N ₂	H ₂ O	CO ₂	O ₂
N_i , кмоль	0,4685	0,0720	0,0715	0,0180

3.7. Відомий масовий склад продуктів згоряння порції бензину в авіаційному моторі (таблиця 3.8).

Таблиця 3.8 – Масовий склад продуктів згоряння бензину

Компонент	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
m_i , кг	0,84	0,52	0,26	4,58

Температура цих газів на вихлопі становить 800°C , температура навколишнього середовища $t_0 = 0^\circ \text{C}$, тиск $p_0 = 0,92 \text{ бар}$. Визначити відсоток теплових втрат з витічними газами. Теплотворна здатність бензину становить $43950 \text{ кДж}/\text{кг}$.

3.8. Визначити молярну масу пального газу, його газову сталу R , густину ρ і питомий об'єм v за н. у., масові частки всіх компонентів g_i , парціальний тиск метану p_{CH_4} (у відсотках і паскалях). Знайти масу

100 м³ пального газу за н. у. Об'ємний склад пального газу подано у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Об'ємний склад пального газу

Компо- нент	Окис вуг- лецю CO	Метан CH ₄	Водень H ₂	Етилен C ₂ H ₄	Вуглекислий газ CO ₂	Азот N ₂
$r_i, \%$	10	35	45	4	3	3

3.9. Відомо, що горючий газ має такий мольний склад (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10 – Мольний склад горючого газу

Компо- нент	Водень H ₂	Метан CH ₄	Окис вуг- лецю CO	Вуглекислий газ CO ₂	Азот N ₂	Етилен C ₂ H ₄
$n_i, \%$	43	30	14	5	5	3

Визначити молярну масу суміші, газову сталу, густину, питомий об'єм за н. у., парціальний тиск водню (у відсотках і паскалях), масові частки компонентів. Знайти об'єм 1 кг пального газу при тиску 4 бар і температурі 10 °С.

3.10*. При тиску 860 мм рт. ст. і температурі 50 °С маса суміші кисню та вуглекислого газу об'ємом 100 л дорівнює 160 г. Визначити масовий та об'ємний склад суміші. Обчислити також парціальний тиск кисню та вуглекислого газу.

Розв'язання. Густина суміші

$$\rho_{\text{сум}} = m/V = 0,160/0,1 = 1,6 \text{ кг/м}^3.$$

За рівнянням Менделєєва – Клапейрона для суміші

$$p_{\text{сум}} = p/(R_{\text{сум}}T),$$

звідки

$$R_{\text{сум}} = \frac{p}{p_{\text{сум}}T} = \frac{860 \cdot 133,322}{1,6 \cdot 323} = 221,76 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Газова стала суміші виражається через масові частки компонентів:

$$\begin{cases} g_{O_2} R_{O_2} + g_{CO_2} R_{CO_2} = R_{\text{сум}}; \\ g_{O_2} + g_{CO_2} = 1. \end{cases}$$

Звідси масові частки кисню та вуглекислого газу становитимуть

$$g_{O_2} = \frac{R_{\text{см}} - R_{CO_2}}{R_{O_2} - R_{CO_2}}; \quad g_{CO_2} = \frac{R_{\text{см}} - R_{O_2}}{R_{CO_2} - R_{O_2}}, \quad \text{або} \quad g_{CO_2} = 1 - g_{O_2}.$$

Газова стала кисню

$$R_{O_2} = R_{\mu}/\mu_{O_2} = 8314/32 = 259,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

газова стала вуглекислого газу

$$R_{CO_2} = R_{\mu}/\mu_{CO_2} = 8314/44 = 189,0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Масові частки компонентів:

$$g_{O_2} = \frac{R_{\text{см}} - R_{CO_2}}{R_{O_2} - R_{CO_2}} = \frac{221,76 - 189}{259,8 - 189} = 0,463;$$

$$g_{CO_2} = \frac{R_{\text{см}} - R_{O_2}}{R_{CO_2} - R_{O_2}} = \frac{221,76 - 259,8}{189 - 259,8} = 0,537;$$

$$g_{O_2} + g_{CO_2} = 1.$$

Молярна маса суміші

$$\mu_{\text{сум}} = R_{\text{сум}}/R_{\text{сум}} = 8314/221,76 = 37,49 \text{ кг/кмоль.}$$

Молярна маса суміші виражається через об'ємні частки компонентів:

$$\begin{cases} r_{O_2}\mu_{O_2} + r_{CO_2}\mu_{CO_2} = \mu_{\text{сум}}; \\ r_{O_2} + r_{CO_2} = 1, \end{cases}$$

звідки

$$r_{O_2} = \frac{\mu_{\text{сум}} - \mu_{CO_2}}{\mu_{O_2} - \mu_{CO_2}} = \frac{37,49 - 44}{32 - 44} = 0,542;$$

$$r_{CO_2} = \frac{\mu_{\text{сум}} - \mu_{O_2}}{\mu_{CO_2} - \mu_{O_2}} = \frac{37,49 - 32}{44 - 32} = 0,458;$$

$$r_{CO_2} + r_{O_2} = 1.$$

Інакше об'ємні частки можна знайти за формулою перерахунку

$$r_i = \frac{g_i/\mu_i}{\sum(g_i/\mu_i)}.$$

$$r_{O_2} = \frac{g_{O_2}/\mu_{O_2}}{g_{O_2}/\mu_{O_2} + g_{CO_2}/\mu_{CO_2}} = \frac{g_{O_2}}{g_{O_2} + g_{CO_2} \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}}} = \frac{0,463}{0,463 + 0,537 \cdot \frac{32}{44}} = 0,542;$$

$$r_{CO_2} = \frac{g_{CO_2}/\mu_{CO_2}}{g_{CO_2}/\mu_{CO_2} + g_{O_2}/\mu_{O_2}} = \frac{g_{CO_2}}{g_{CO_2} + g_{O_2} \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}}} = \frac{0,537}{0,537 + 0,463 \cdot \frac{44}{32}} = 0,458,$$

що дає ті ж значення для об'ємних часток.

Парціальний тиск кисню

$$p_{O_2} = p_{\text{сум}} \cdot r_{O_2} = 860 \cdot 0,542 = 466 \text{ мм рт. ст.} = 0,621 \cdot 10^5 \text{ Па,}$$

парціальний тиск вуглекислого газу

$$p_{CO_2} = p_{\text{сум}} \cdot r_{CO_2} = 860 \cdot 0,458 = 394 \text{ мм рт. ст.} = 0,525 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

3.11. Визначити масовий і об'ємний склад суміші водню з гелієм, якщо її газова стала становить $R = 2,7 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Маса суміші $m = 40 \text{ кг}$, тиск $p = 60 \text{ кПа}$, температура $t = -50 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити парціальні тиски та парціальні об'єми водню та гелію. Який об'єм за заданих температурі і тиску займає 1 кг суміші? 1 кмоль суміші?

3.12. При тиску 1,6 бар та температурі 20 °С маса суміші азоту та аргону об'ємом 30 л дорівнює 70 г. Визначити масовий та об'ємний склад суміші. Обчислити також парціальний тиск азоту та аргону.

3.13*. У балоні об'ємом 100 м³ під тиском 2 бар знаходиться газова суміш, що складається з 96 кг азоту, 26 кг кисню і деякої кількості аргону. Температура суміші становить 10 °С. Визначити кількість аргону, парціальні тиски компонентів, об'ємний і масовий склад суміші, молярну масу суміші та її газову сталу.

Розв'язання. За відомими масами, температурами і тисками визначимо парціальні об'єми азоту та кисню в балоні.

Рівняння стану для компонента суміші

$$p_{\text{сум}} V_{N_2} = m_{N_2} R_{N_2} T_{\text{сум}},$$

звідки

$$V_{N_2} = \frac{m_{N_2} R_{N_2} T_{\text{сум}}}{p_{\text{сум}}} = \frac{m_{N_2} R_{\mu} T_{\text{сум}}}{\mu_{N_2} p_{\text{сум}}} = \frac{96 \cdot 8314 \cdot 283}{28 \cdot 2 \cdot 10^5} = 40,335 \text{ м}^3.$$

Аналогічно парціальний об'єм кисню становитиме

$$V_{O_2} = \frac{m_{O_2} R_{O_2} T_{\text{сум}}}{p_{\text{сум}}} = \frac{m_{O_2} R_{\mu} T_{\text{сум}}}{\mu_{O_2} p_{\text{сум}}} = \frac{26 \cdot 8314 \cdot 283}{32 \cdot 2 \cdot 10^5} = 9,558 \text{ м}^3.$$

Парціальний об'єм аргону

$$V_{Ar} = V_{\text{заг}} - (V_{O_2} + V_{N_2}) = 100 - (40,335 + 9,559) = 50,107 \text{ м}^3.$$

Маса аргону

$$m_{Ar} = \frac{p_{\text{сум}} \cdot V_{Ar}}{R_{Ar} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{\mu_{Ar} \cdot p_{\text{сум}} \cdot V_{Ar}}{R_{\mu} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{39,944 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 50,106}{8314 \cdot 283} = 170,13 \text{ кг}.$$

Об'ємні частки компонентів зручно шукати за формулою $r_i = V_i / V_{\text{сум}}$, де об'єм суміші $V_{\text{сум}} = 100 \text{ м}^3$. Результати розрахунку об'ємних часток компонентів наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Об'ємні частки компонентів

Компонент	Об'ємна частка
Азот	0,40335
Кисень	0,09558
Аргон	0,50107
$\sum r_i$	1,00000

Парціальні тиски компонентів визначають за формулами

$$p_i V_{\text{сум}} = p_{\text{сум}} V_i;$$

$$p_i = \frac{p_{\text{сум}} V_i}{V_{\text{сум}}} = p_{\text{сум}} r_i.$$

Результати розрахунку парціальних тисків компонентів наведено у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Парціальні тиски компонентів

Компонент	Парціальний тиск, бар
Азот	0,80670
Кисень	0,19116
Аргон	1,00214
$\sum p_i$	2,00000

Масові частки компонентів знайдемо за формулою

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{сум}}},$$

де маса суміші $m_{\text{сум}} = \sum m_i = 96 + 26 + 170,13 = 292,13$ кг. Результати розрахунку масових часток компонентів наведено у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Масові частки компонентів

Компонент	Масова частка
Азот	0,3286
Кисень	0,0890
Аргон	0,5824
$\sum g_i$	1,0000

Молярна маса суміші

$$\mu_{\text{сум}} = \sum r_i \cdot \mu_i =$$

$$= 0,40335 \cdot 28 + 0,09558 \cdot 32 + 0,50107 \cdot 39,944 = 34,367 \text{ кг/кмоль.}$$

Газова стала суміші

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_{\mu}}{R_{\text{сум}}} = \frac{8314}{34,367} = 241,92 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3.15. У резервуарі об'ємом 60 м³ під тиском 1,5 бар знаходиться газова суміш, що складається з 56 кг азоту, 32 кг кисню і деякої кількості вуглекислого газу. Температура суміші дорівнює 27 °С. Визначити кількість вуглекислого газу, парціальні тиски компонентів, об'ємний і масовий склади суміші, її молярну масу і газову сталу. Як зміниться газова стала цієї суміші при підвищенні температури в 2 рази у ізохорному процесі?

3.16. У балоні об'ємом 40 л під тиском 4 бар знаходиться газова суміш, що складається з 25 г метану CH₄, 50 г етану C₂H₆, 75 г пропану

C_3H_8 і деякої кількості етилену C_2H_4 . Температура суміші – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити кількість етилену, парціальні тиски компонентів, об'ємний і масовий склади суміші, її молярну масу і газову сталу. Як зміниться газова стала цієї суміші при зниженні тиску в 4 рази в ізохорному процесі?

3.17. Визначити газову сталу, молярну масу та питому ізобарну теплоємність (за н. у.) суміші:

- 1) 0,5 кг водню H_2 і 0,5 кг аргону Ar;
- 2) $0,5\text{ м}^3$ водню H_2 та $0,5\text{ м}^3$ аргону Ar;
- 3) 0,5 кг водню H_2 та $0,5\text{ м}^3$ аргону Ar.

3.18. Суміш, яка містить 10 кг кисню та 15 кг азоту, має тиск 0,3 МПа та температуру $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити: мольні частки кожного газу в суміші; молярну масу суміші і її газову сталу; загальний об'єм суміші; парціальні тиски та об'єми компонентів.

3.19. Сланцевий газ, що отримується в газогенераторі при високо-температурній перегонці горючих сланців, має об'ємний склад, який наведено у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Об'ємний склад сланцевого газу

Компонент	Водень H_2	Метан CH_4	Бутан C_4H_{10}	Окис вуглецю CO	Вуглекислий газ CO_2	Азот N_2	Кисень O_2
$r_i, \%$	38	18	4	15	15	9	1

Цей газ знаходиться в газгольдері постійного об'єму 2500 м^3 при абсолютному тиску 6 бар та температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після того, як частину газу витратили, тиск у газгольдері зменшився до 3,8 бар, а температура – до $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити масу витраченого газу.

3.20. Природний газ має об'ємний склад, який наведено у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Об'ємний склад природного газу

Компонент	Метан CH_4	Етан C_2H_6	Пропан C_3H_8	Бутан C_4H_{10}	Пентан C_5H_{12}	Азот N_2	Вуглекислий газ CO_2
$r_i, \%$	49	11	17	15	4	3	1

Цей газ сполучається з повітрям у пропорції 1 м^3 газу на 14 м^3 повітря (об'ємний склад повітря: кисень O_2 – 21 %, азот N_2 – 79 %). Визначити молярну масу і газову сталу отриманої суміші природного газу з повітрям, а також густину цієї суміші при тиску 840 мм рт. ст. та температурі $47\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.21. Аеростат заповнено сумішшю, в якій за масою 40 % водню і 60 % гелію. Об'єм оболонки аеростата на висоті 8 км дорівнює 5000 м^3 .

Визначити піднімальну силу аеростата, якщо температура газової суміші становить $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура та тиск зовнішнього повітря відповідає стандартній атмосфері (див. таблицю А.4). Маса оболонки аеростата – 1,0 т.

3.22. Димови гази, що утворилася при спалюванні 1 кг мазуту в топці парового котла, мають склад, визначений парціальними об'ємами (таблиця 3.16).

Таблиця 3.16 – Парціальні об'єми димових газів, що утворилися при спалюванні 1 кг мазуту

Компонент	CO ₂	O ₂	N ₂
$V_i, \text{м}^3$	1,85	0,77	12,78

Визначити масові частки і парціальні тиски складових, якщо загальний тиск – 10^5 Па.

3.23*. Паливна суміш, що складається з метану, етану та пропану, задана об'ємними частками компонентів, які наведено у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Об'ємні частки компонентів паливної суміші

Компонент	Метан CH ₄	Етан C ₂ H ₆	Пропан C ₃ H ₈
$r_i, \%$	70	20	10

Знайти кількість повітря, яке є теоретично необхідним для спалювання 1 м³ суміші за н. у. Розрахувати зведений до н. у. об'єм продуктів повного згоряння 1 м³ суміші при теоретично необхідному об'ємі повітря.

Розв'язання.

1. Для знаходження теоретично необхідної кількості повітря запишемо рівняння реакцій згоряння компонентів горючої суміші

$$\begin{cases} \text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \\ \text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \\ \text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \end{cases}$$

З рівнянь випливає, що для згоряння 1 кмоль метану необхідно 2 кмолі кисню, для згоряння 1 кмоль етану – 3,5 кмолі кисню й для згоряння 1 кмоль пропану – 5 кмолів кисню.

Відомо, що для ідеальних газів мольні частки дорівнюють об'ємним часткам, оскільки 1 кмоль будь-якого ідеального газу займає один і той же об'єм, що за н. у. (закон Авогадро) становить

$$v_\mu = R_\mu T / p = 8314 \cdot 273 / 101325 = 22,4 \text{ нм}^3 / \text{кмоль}.$$

Повітря за об'ємом складається з 21 % з кисню. Отже, для спалювання 1 м³ суміші за н. у. необхідно

$$V_{\text{пов}} = \frac{100}{21} V_{\text{сум}} (r_{\text{CH}_4} \cdot 2 + r_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot 3,5 + r_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot 5) =$$

$$= \frac{100}{21} \cdot 1 \cdot (0,7 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3,5 + 0,1 \cdot 5) = \frac{1}{0,21} \cdot 2,6 = 12,381 \frac{\text{м}^3_{\text{пов}}}{\text{м}^3_{\text{суміші}}}$$

2. Зведений до н. у. об'єм продуктів повного згоряння 1 м³ суміші вуглеводнів, взятих також за н. у., складається з парціальних об'ємів вуглекислоти, води та азоту повітря. Розглядаючи рівняння реакцій згоряння компонентів горючої суміші, визначаємо, що при згорянні:

1 кмоля метану CH₄ виходить 1 кмоль CO₂ і 2 кмолі H₂O;

1 кмоля етану C₂H₆ виходить 2 кмолі CO₂ і 3 кмолі H₂O;

1 кмоля пропану C₃H₈ виходить 3 кмолі CO₂ та 4 кмолі H₂O.

Парціальний об'єм компонента V_i при $V_{\text{сум}} = 1 \text{ м}^3$ дорівнює його об'ємній частці r_i . Отже,

$$V_{\text{CO}_2} = 1r_{\text{CH}_4} + 2r_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 1,4 \text{ м}^3_{\text{пов}} / \text{м}^3_{\text{суміші}};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2r_{\text{CH}_4} + 3r_{\text{C}_2\text{H}_6} + 4r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 2 \cdot 0,7 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 = 2,4 \text{ м}^3_{\text{пов}} / \text{м}^3_{\text{суміші}}.$$

Азот, що входить до складу повітря, у реакціях горіння не бере участі. Тому його парціальний об'єм дорівнює парціальному об'єму азоту в повітрі ($r_{\text{N}_2} = 0,79$):

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_{\text{пов}} = 0,79 \cdot 12,381 = 9,781 \text{ м}^3_{\text{пов}} / \text{м}^3_{\text{суміші}}.$$

Повний об'єм продуктів згоряння, які одержують з 1 м³ суміші вуглеводнів

$$V_{\text{пз}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} = 1,4 + 2,4 + 9,78 = 13,58 \text{ м}^3_{\text{пов}} / \text{м}^3_{\text{суміші}}.$$

Таким чином, з 13,38 м³ вихідних продуктів (пальної суміші та повітря) виходить 13,58 м³ продуктів згоряння.

3.24. Пальний газ, отриманий при підземній газифікації вугілля, має об'ємний склад, наведений у таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Об'ємний склад пального газу

Компонент	Азот N ₂	Водень H ₂	Окис вуглецю CO	Вуглекислий газ CO ₂	Метан CH ₄	Сірководень H ₂ S
$r_i, \%$	63,6	14,5	10,0	9,3	1,8	0,8

Розрахувати зведений до н. у. об'єм повітря, який є теоретично необхідним для згоряння 100 м³ пального газу, взятого також за н. у. (азот у реакціях горіння участі не бере).

3.25. «Водяний газ» утворюється у газогенераторах при газифікації коксу з подачею в процес водяної пари. «Водяний газ» має об'ємний склад, наведений у таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Об'ємний склад «водяного газу».

Компонент	Водень H_2	Окис вуг- лецю CO	Вуглекислий газ CO_2	Азот N_2	Кисень O_2
$r_i, \%$	50	37	6,8	5,5	0,7

При спалюванні в газових пальниках на 1 м^3 цього газу (за нормальних фізичних умов) витрачається $2,3 \text{ м}^3$ повітря. Визначити склад горючої суміші, її молекулярну масу та газову сталу; знайти густину суміші і парціальні тиски компонентів, якщо ця суміш підводиться до пальників при температурі $t = 80^\circ \text{C}$ і манометричному тиску $p_{\text{ман}} = 300 \text{ мм вод. ст.}$ Атмосферний тиск вважати 10^5 Па .

3.26. При підземній газифікації вугілля виходить горючий газ, який має мольний склад, наведений у таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Мольний склад горючого газу

Компо- нент	Азот N_2	Водень H_2	Окис вуг- лецю CO	Вуглекислий газ CO_2	Метан CH_4	Сірково- день H_2S
$n_i, \%$	60,2	14,7	12,0	8,0	4,5	0,6

Розрахувати зведений до н. у. об'єм продуктів повного згоряння 1 кг суміші при теоретично необхідному об'ємі повітря (азот у реакціях горіння участі не бере).

3.27. «Водяний газ» утворюється у газогенераторах при газифікації коксу з подачею в процес водяної пари. «Водяний газ» має мольний склад, наведений у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Мольний склад «водяного газу»

Компонент	Водень H_2	Окис вуг- лецю CO	Азот N_2	Вуглекислий газ CO_2	Кисень O_2
$n_i, \%$	40	38,2	12,5	8,8	0,5

При спалюванні в газових пальниках на 1 кг цього газу витрачається $3,0 \text{ кг}$ повітря. Визначити склад горючої суміші, її молекулярну масу та газову сталу; знайти густину суміші та парціальні тиски компонентів, якщо ця суміш підводиться до пальників при температурі $t = 60^\circ \text{C}$ і манометричному тиску $p_{\text{ман}} = 270 \text{ мм вод. ст.}$ Атмосферний тиск вважати $p_{\text{атм}} = 0,985 \text{ бар}$.

3.28*. Повітря об'ємом $0,8 \text{ м}^3$ сполучається з $1,0 \text{ кг}$ вуглекислого газу. До змішування обидва гази мали параметри: $p = 0,1 \text{ МПа}$ та $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити парціальний тиск вуглекислого газу після змішування.

Розв'язання. Парціальний тиск вуглекислого газу знаходять за формулою (див. задачу 3.3 *)

$$p_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} p_{\text{сум}}.$$

Оскільки повітря і вуглекислий газ до змішування знаходилися в термодинамічній рівновазі (їх тиски та температури були однаковими), після змішування p і T не змінилися, а загальний об'єм дорівнював сумі об'ємів компонентів:

$$\begin{aligned} p_{\text{сум}} &= p_{\text{пов}} = p_{\text{CO}_2} = p = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}; \\ T_{\text{сум}} &= T_{\text{пов}} = T_{\text{CO}_2} = T = 300 \text{ К}; \\ V_{\text{сум}} &= V_{\text{пов}} + V_{\text{CO}_2}. \end{aligned}$$

До змішування вуглекислий газ CO_2 займав об'єм

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2} R_{\mu} T}{\mu_{\text{CO}_2} p} = \frac{1,0 \cdot 8314 \cdot 300}{44 \cdot 0,1 \cdot 10^6} = 0,5669 \text{ м}^3.$$

Об'ємна частка CO_2 після змішування

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{пов}} + V_{\text{CO}_2}} = \frac{0,5669}{0,8 + 0,5669} = 0,4147.$$

Парціальний тиск CO_2 після змішування

$$p_{\text{CO}_2} = 0,4147 \cdot 0,1 \cdot 10^6 = 0,4147 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

3.29*. У посудині знаходиться суміш, що складається з $0,1$ кмоля гелію і $0,2$ кмоля азоту при $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ і $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Ця суміш охолоджується при постійному об'ємі до $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити змінення внутрішньої енергії суміші.

Розв'язання. Ізохорна теплоємність суміші визначається як

$$C_v = \sum N_i \cdot \mu c_{vi}, \text{ Дж/К},$$

де N_i – кількість кіломолей i -го компонента;

μc_{vi} , Дж/(кмоль · К) – мольна теплоємність i -го компонента.

Ізобарну мольну теплоємність азоту наведено у таблиці А.5:

$$\mu c_{pN_2} = 29,20 \text{ кДж/(кмоль · К)}.$$

Ізохорна мольна теплоємність у k разів менша за ізобарну (k – показник адіабати, для двоатомних газів $k = 1,4$):

$$\mu c_{vN_2} = \mu c_{pN_2} / k = 29,20 / 1,4 = 20,857 \text{ кДж/(кмоль · К)}.$$

Мольну теплоємність гелію у таблиці А.5 не наведено. Обчислимо її за формулою молекулярно-кінетичної теорії газів

$$\mu c_v = \gamma / 2 R_{\mu},$$

де γ – кількість степенів свободи молекули; R_μ – універсальна газова стала. Для одноатомних газів $\gamma = 3$, ізохорна теплоємність 1 кмоля гелію становить

$$\mu c_v = \frac{3}{2} R_\mu = \frac{3}{2} \cdot 8,314 = 12,47 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Ізохорна теплоємність суміші

$$C_v = 0,1 \cdot 12,471 + 0,2 \cdot 20,857 = 5,4185 \text{ кДж/К}.$$

Змінення внутрішньої енергії суміші при охолодженні на 20°

$$\Delta U = C_v \cdot \Delta t = 5,4185 \cdot (-20) = -108,4 \text{ кДж}.$$

3.30. Посудина розділена перегородкою на дві частини, об'єми яких $V_1 = 2 \text{ м}^3$ і $V_2 = 0,8 \text{ м}^3$. У першій частині знаходиться водень при $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ і $T_1 = 300 \text{ К}$, у другій – гелій при $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ і $T_2 = 400 \text{ К}$. Визначити масові та об'ємні частки водню і гелію, що задаються, і молярну масу суміші та її газову сталу після того, як перегородка була прибрана і процес змішування закінчився.

3.31. За умовою задачі 3.30 визначити температуру, тиск і теплоємність суміші водню і гелію, а також їх парціальний тиск. Питому теплоємність гелію розрахувати за формулою молекулярно-кінетичної теорії та вважати такою, що не залежить від температури (див. задачу 3.29*).

3.32. Утворення суміші двох газів – азоту та вуглекислого газу – відбувається так само, як у задачі 3.30. Дані про стан газів до змішування наведено у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Дані про стан газів до змішування

Компонент	Азот N_2	Вуглекислота CO_2
Маса m , кг	10,0	2,5
Об'єм V , м^3	2,0	2,0
Температура t , $^\circ\text{C}$	-20	500

Визначити температуру, тиск і питому теплоємність суміші азоту та вуглекислого газу, а також об'ємні частки компонентів та їх парціальні тиски після закінчення процесу змішування.

3.33. Є дві посудини, з'єднані між собою трубою, де встановлено кран. У першій посудині об'ємом $V_1 = 0,3 \text{ м}^3$ знаходиться повітря при $p_1 = 1,0 \text{ МПа}$ і $t_1 = 17^\circ\text{C}$, друга посудина ($V_2 = 1,0 \text{ м}^3$) містить також повітря, але при $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$ і $t_2 = 57^\circ\text{C}$. Після відкриття крану в системі настає стан рівноваги. Визначити температуру і тиск суміші, що утворилася. Теплоємність повітря вважати таким, що не залежить від температури.

3.34*. Вологе повітря є сумішшю сухого повітря і вологої пари. Абсолютна вологість характеризується вологим вмістом d (г/кг) – відношенням маси водяної пари до маси сухого повітря, в якому ця водяна пара розчинена. Визначити масові і об'ємні частки сухого повітря і водяної пари, густину і питомий об'єм вологої пари при $t = 27^\circ\text{C}$ і $p = 1$ бар, її газову сталу, молярну масу і питому теплоємність, якщо $d = 18$ г/кг сухого повітря.

Розв'язання. На 1 кг сухого повітря (с.п.) припадає 18 г (0,018 кг) водяної пари (H_2O). Масову частку компонента суміші знаходимо як

$$g_i = m_i / m_{\text{сум}}.$$

Масова частка сухого повітря

$$g_{\text{с.п}} = \frac{m_{\text{с.п}}}{m_{\text{сум}}} = \frac{m_{\text{с.п}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{с.п}}} = \frac{1,0000}{0,018 + 1,0000} = 0,9823,$$

водяної пари

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{сум}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{с.п}}} = \frac{0,018}{0,018 + 1,0000} = 0,0177.$$

Молярна маса вологого повітря (тобто суміші сухого повітря і водяної пари)

$$\mu_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum g_i / \mu_i} = \frac{1}{0,9823/28,96 + 0,0177/18} = 28,651 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Газова стала вологого повітря

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{8314}{28,651} = 290,18 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}.$$

Об'ємна частка компонента визначається формулою

$$r_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum g_i / \mu_i} = \frac{g_i / \mu_i}{1 / \mu_{\text{сум}}} = \mu_{\text{сум}} \frac{g_i}{\mu_i}.$$

Для сухого повітря $r_{\text{с.п}} = 28,651 \cdot 0,9823 / 28,96 = 0,9718$;

для водяної пари $r_{\text{H}_2\text{O}} = 28,651 \cdot 0,0177 / 18 = 0,0282$.

Перевірка: $r_{\text{с.п}} + r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,9718 + 0,0282 = 1,0000$.

Густина вологого повітря при $t = 27^\circ\text{C}$ та $p = 1$ бар

$$\rho_{\text{сум}} = \frac{p}{R_{\text{сум}} T} = \frac{10^5}{290,18 \cdot 300} = 1,149 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

його питомий об'єм $v_{\text{сум}} = 1 / \rho_{\text{сум}} = 1 / 1,149 = 0,87 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Питома теплоємність суміші визначається формулою

$$c_{\text{сум}} = \sum g_i c_i, \quad \text{або} \quad c_{\text{сум}} = \frac{1}{\mu_{\text{сум}}} \sum r_i c_{\mu i}.$$

При $t = 27^\circ\text{C}$ мольна ізобарна теплоємність сухого повітря

$$c_{\mu \text{ пов}} = 29,08 \text{ кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{K}),$$

водяної пари – $c_{\text{H}_2\text{O}} = 33,46 \text{ кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{K})$ (див. таблицю А.5).

Питома теплоємність вологого повітря при $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{сум}} = \frac{1}{28,651} (0,9718 \cdot 29,08 + 0,0282 \cdot 33,46) = 1,0193 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для порівняння: питома теплоємність сухого повітря при $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_{\text{пов}} = c_{\mu \text{ пов}} / \mu_{\text{пов}} = 29,08 / 28,96 = 1,0041 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}),$$

розбіжність у розрахунку теплоємності суміші становить

$$\delta = \frac{c_{\text{сум}} - c_{\text{пов}}}{c_{\text{сум}}} 100 \% = \frac{1,0193 - 1,0041}{1,0193} 100 \% = 1,5 \ \%.$$

3.35. Для вологого повітря з відомим вмістом води $d = 10\text{ г/кг}$ визначити масові і об'ємні частки сухого повітря і водяної пари, густину і питоми об'єм вологої пари при $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $p = 0,2\text{ МПа}$, його газову сталу, молярну масу і питому теплоємність.

3.36. Для вологого повітря з відомим вмістом води $d = 20\text{ г/кг}$ визначити масові і об'ємні частки сухого повітря і водяної пари, густину і питоми об'єм вологої пари при $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $p = 0,12\text{ МПа}$, його газову сталу, молярну масу та питому теплоємність.

3.37. Знайти ентальпію димових газів у розрахунку на 1 кг при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ з відліком від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Масовий склад димових газів наведено у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Масовий склад димових газів

Компонент	N_2	CO_2	O_2	H_2O
$g_i, \%$	75,0	16,0	7,5	1,5

3.38*. Задано об'ємний склад димових газів (таблиця 3.24), що входять у повітря-підігрівач парогенератора.

Таблиця 3.24 – Об'ємний склад димових газів

Компонент	CO_2	O_2	N_2	H_2O
$r_i, \%$	11	7	80	2

Нагріваючи повітря, гази охолоджуються від $t_{1\Gamma} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_{2\Gamma} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти температуру нагрітого повітря, якщо витрата димових газів (зведена до н. у.) – $51\,000\text{ м}^3/\text{год}$, витрата повітря – $60\,000\text{ кг/год}$, температура повітря на вході в повітропідігрівач – $t_{1\text{пов}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Втратами теплоти в навколишнє середовище знехтувати.

Розв'язання. Мольну теплоємність суміші знаходять за формулою

$$\mu c_{\text{сум}} = \sum n_i \cdot \mu c_i = \sum r_i \cdot \mu c_i$$

(оскільки мольні частки компонента збігаються з об'ємними, $r_i = n_i$).

З таблиці А.5 випишемо молярні теплоємності CO_2 , O_2 , N_2 і H_2O при $t_{1r} = 400^\circ\text{C}$ і $t_{2r} = 150^\circ\text{C}$. Теплоємності речовин при $t_{2r} = 150^\circ\text{C}$ знайдемо інтерполяцією як середнє в інтервалі температур 100°C і 200°C . Результати розрахунку наведено у таблиці 3.25.

Таблиця 3.25 – Результати розрахунку газової суміші

Ізобарна молярна теплоємність μc_{ip} , кДж/(кмоль · К)	Компонент суміші				Суміш	Температура
	CO_2	O_2	N_2	H_2O		
	43,25	30,896	29,64	34,92	31,331	$t_{1r} = 400^\circ\text{C}$
	39,25	29,75	29,25	33,80	30,476	$t_{2r} = 150^\circ\text{C}$
Об'ємна частка компонента r	0,11	0,07	0,80	0,02	$\sum r_i = 1$	–

Кількість відведеної від 1 кмоль димових газів теплоти

$$q = i_{1r} - i_{2r} = \mu c_{p1} \cdot T_{1r} - \mu c_{p2} \cdot T_{2u} =$$

$$= 31,331 \cdot (400 + 273) - 30,476 \cdot (150 + 273) = 8194,4 \text{ кДж/кмоль.}$$

Кількість кмолів N димових газів визначимо, знаючи об'єм 1 кмоль за н. у. (за законом Авогадро):

$$v_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль},$$

$$N = V_r/v_\mu = 51000/22,4 = 2277.$$

Загальна кількість відведеної від димових газів теплоти

$$Q = Nq = 2277 \cdot 8194,4 = 18,657 \cdot 10^6 \text{ кДж} = 18,657 \text{ ГДж.}$$

Уся ця теплота поглинається повітрям. Вважаючи в першому наближенні, що теплоємність повітря $c_{p_{\text{пов}}}$ не залежить від температури і при $t_{1\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$ дорівнює $1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, визначаємо температуру повітря після підігрівання:

$$Q = I_{2\text{пов}} - I_{1\text{пов}} = G_{\text{пов}} c_{p_{\text{пов}}} (T_{2\text{пов}} - T_{1\text{пов}}),$$

звідки

$$T_{2\text{пов}} = T_{1\text{пов}} + \frac{Q}{(G_{\text{пов}} c_{p_{\text{пов}}})} = 303 + 18,657 \cdot \frac{10^6}{60000 \cdot 1,005} =$$

$$= 303 + 309 = 612\text{K} = 339^\circ\text{C}.$$

Більш точно температуру $T_{2\text{пов}}$ знайдемо, враховуючи збільшення теплоємності з підвищенням температури. При 300°C молярна теплоємність повітря (див. таблицю А.5)

$$\mu c_{p_{\text{пов}}} = 29,52 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

питома масова теплоємність повітря

$$c_{p_{\text{пов}}} = \mu c_{p_{\text{пов}}} / \mu_{\text{пов}} = 29,52 / 28,96 = 1,019 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Тоді

$$Q = I_{2\text{пов}} - I_{1\text{пов}} = G_{\text{пов}} (c_{p_{\text{пов}2}} T_{2\text{пов}} - c_{p_{\text{пов}1}} T_{1\text{пов}});$$

$$T_{2\text{пов}} = T_{1\text{пов}} \cdot \frac{c_{p\text{пов}1}}{c_{p\text{пов}2}} + \frac{Q}{G_{\text{пов}} c_{p\text{пов}2}} =$$

$$= 303 \cdot \frac{1,005}{1,019} + \frac{18,657 \cdot 10^6}{60000 \cdot 1,019} = 604\text{K} = 331\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

3.39. Димові гази, що входять у повітропідігрівач парогенератора, мають мольний склад, наведений у таблиці 3.26.

Таблиця 3.26 – Мольний склад димових газів

Компонент	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
$n_i, \%$	12	6	81	1

Нагрівуючи повітря, гази охолоджуються від $t_{1r} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_{2r} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти температуру нагрітого повітря, якщо витрата димових газів – 65000 кг/год, витрата повітря (зведена до н. у.) – 50000 м³/год, температура повітря на вході в повітропідігрівач – $t_{1\text{пов}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Втрати теплоти у навколишнє середовище становлять 5 %.

3.40. Склад димових газів, що омивають поверхні нагрівання котельного агрегату, задано мольними частками (таблиця 3.27).

Таблиця 3.27 – Мольний склад димових газів

Компонент	N ₂	CO ₂	O ₂
$n_i, \%$	0,82	0,11	0,07

Визначити, скільки теплоти віддає кожен кілограм газів при протіканні в газоході, якщо на вході їх температура $t_1 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, на виході – $t_2 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вважати, що тиск газів у процесі теплообміну не змінюється і втрати теплоти в навколишнє середовище відсутні.

3.41. Склад димових газів, що омивають поверхні нагрівання котельного агрегату, задано об'ємними частками (таблиця 3.28).

Таблиця 3.28 – Об'ємний склад димових газів

Компонент	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂
$r_i, \%$	75	13	7	5

Визначити, скільки теплоти віддає кожен кіломоль газів при протіканні в газоході, якщо на вході температура $t_1 = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, на виході – $t_2 = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вважати, що тиск газів у процесі теплообміну не змінюється. Втрати теплоти у навколишнє середовище становлять 5 %.

3.42. Продукти згоряння палива дизельної електростанції використовуються для отримання гарячої води при $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ у трубчастому водопідігрівачі. Вода, що надходить, має температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потужність електростанції — 4000 кВт, питома витрата палива — 300 г/кВт, теплотворна здатність палива — 43000 кДж/кг. Гази надходять у водопідігрівач при $t_{r1} = 740\text{ }^{\circ}\text{C}$, а виходять при $t_{r2} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; ККД підігрівача — 90 %. Склад продуктів згоряння в кмольх наведено у таблиці 3.29.

Таблиця 3.29 – Мольний склад продуктів згоряння

Компонент	N_2	H_2O	CO_2	O_2
N_i , кмоль	0,48	0,08	0,07	0,02

Визначити кількість води, що підігрівається протягом години, та відсоток використання теплоти палива у підігрівачі.

3.43. У котельній установці є підігрівач для повітря, що надходить у топку, який обігрівається продуктами згоряння, що йдуть з топки при температурі $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. У підігрівачі вони охолоджуються до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагріваючи повітря від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Об'ємний склад продуктів згоряння наведено у таблиці 3.30.

Таблиця 3.30 – Об'ємний склад продуктів згоряння

Компонент	N_2	CO_2	H_2O	O_2
r_i , %	75	12	8	5

1 кг вугілля при згорянні дає 11 м^3 продуктів згоряння за н. у. Визначити годинну кількість повітря, що підігрівається (в кілограмах і кубічних метрах), при витраті вугілля 40 т/год. ККД підігрівача становить 95 %.

3.44. При коксуванні кам'яного вугілля з 1 т виходить 320 м^3 газу за н. у. об'ємного складу, який наведено у таблиці 3.31.

Таблиця 3.31 – Об'ємний склад газу

Компонент	H_2	CH_4	N_2	CO	CO_2	O_2
r_i , %	57	22	10,5	7	2,8	0,7

З коксової печі ці гази виходять при $t_{r1} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ і проходять через трубчастий теплообмінник, де, охолоджуючись до $t_{r2} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, віддають свою теплоту для нагрівання води, що протікає в трубках, від 10 до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити кількість води (в кілограмах і кубічних метрах), яку можна нагріти газами, спалюючи 12 т вугілля при ККД теплообмінника 80 %.

При розрахунку використовувати дані таблиці А.5. Ізобарна мольна теплоємність метану при $t_1 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $79,03\text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$, при $t_2 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $46,59\text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$, питома теплоємність води – $4,19\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

3.45. Знайти теплоту, що виділилася при ізобаричному охолодженні суміші, отриманої при змішуванні 5 кг вуглекислого газу і 5 м^3 сухого повітря, що мають до змішування такі параметри: $p_1 = 0,1\text{ МПа}$ і $t_1 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура в кінці охолодження становить $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тема 4 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ

В усіх завданнях, якщо немає особливих вказівок, розрахунки виконувати для ідеального повітря з такими теплофізичними характеристиками: молярна маса газу $\mu = 28,96$ кг/кмоль; показник адіабати $k = 1,4$; газова стала $R = 287$ Дж/(кг · К); ізобарна теплоємність $c_p = 1005$ Дж/(кг · К).

4.1*. У процесі розширення до 1 кг кисню підводиться 60 кДж теплоти. Яку роботу здійснює газ, якщо після завершення процесу температура його знижується на 40 °С? Середня масова теплоємність кисню за постійного об'єму – 0,65 кДж/(кг·К). Визначити показник політропи цього процесу та його теплоємність.

Розв'язання. Згідно з першим принципом термодинаміки підведена до системи теплота q , зовнішня робота розширення газу l та змінення внутрішньої енергії Δu пов'язані між собою. Для 1 кг газу

$$q = \Delta u + l.$$

Теплота процесу q пов'язана з середньою питомою теплоємністю процесу c_n

$$q = c_n \Delta t.$$

Тоді

$$l = q - \Delta u = q - c_v \Delta t = 60 - 0,65 \cdot (-40) = 86 \text{ кДж/кг}.$$

Негативна теплоємність відображає факт зниження температури газу при зовнішньому підведенні теплоти. Це відбувається в тому випадку, коли робота розширення газу більше підведеної теплоти і робота розширення частково відбувається завдяки внутрішній енергії, що і призводить до зниження температури (рисунк 4.1).

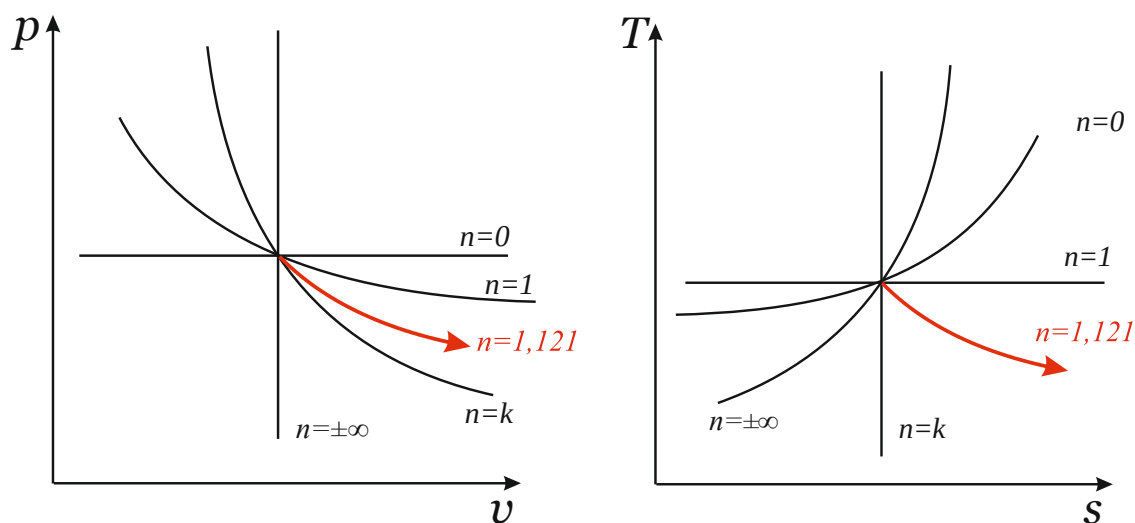


Рисунок 4.1 – Процес розширення в $p-v$ і $T-s$ -координатах

Показник політропи n пов'язаний із теплоємністю процесу c_n :

$$n = \frac{c_p - c_n}{c_v - c_n} = \frac{kc_v - c_n}{c_v - c_n} = \frac{1,4 \cdot 0,65 - (-1,5)}{0,65 - (-1,5)} = 1,121,$$

де k – показник адіабати, для кисню $k = 1,4$.

Оскільки $1 < n < k$, процес розширення на p - v - і T - s -діаграмах лежить між ізотермою ($n = 1$) та адіабатою ($n = k$) (див. рисунок 4.1).

4.2*. До якої температури треба охолодити $0,5 \text{ м}^3$ повітря з початковими параметрами: $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$ та $t_1 = 100^\circ\text{C}$, щоб одержати у тому ж об'ємі тиск $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$? Визначити кількість теплоти, що виділяється при цьому. Як зміняться при цьому внутрішня енергія, ентальпія та ентропія повітря?

Розв'язання. Процес охолодження відбувається при $v = \text{const}$, отже, змінення температури пропорційне зміненню тиску:

$$T_2/T_1 = p_2/p_1.$$

Звідси

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} = (100 + 273) \cdot \frac{0,1}{0,15} = 248,7 \text{ K} = -24,3^\circ\text{C}.$$

Кількість підведеної питомої теплоти в ізохоричному процесі

$$q = c_v(T_2 - T_1) = \frac{c_p}{k}(T_2 - T_1) = \frac{1005}{1,4}(-24,3 - 100) = -89,23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Знак мінус свідчить про те, що теплота відводиться.

Масу повітря, що охолоджується, об'ємом $V = 0,5 \text{ м}^3$ визначимо з рівняння стану ідеального газу

$$m = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{0,15 \cdot 10^6 \cdot 0,5}{287 \cdot 373} = 0,7 \text{ кг}.$$

Для $m = 0,7 \text{ кг}$ повітря підведена теплота становитиме

$$Q = mq = 0,7 \cdot (-89,23 \cdot 10^3) = -62,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Змінення внутрішньої енергії газу в ізохоричному процесі дорівнює кількості підведеної теплоти: $\Delta U = Q = -62,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

Змінення ентальпії можна знайти так:

$$\Delta I = mc_p \Delta T = 0,7 \cdot 1005 \cdot (-124,4) = -87,4 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

або із співвідношення $\Delta I = \Delta U + \Delta(pV)$. При $V = \text{const}$

$$\Delta I = \Delta U + V\Delta p = -62,5 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot (0,1 - 0,15)10^6 = -87,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Змінення ентропії в ізохоричному процесі

$$\Delta S = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} = m \frac{c_p}{k} \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = 0,7 \cdot \frac{1005}{1,4} \cdot \ln \frac{1}{1,5} = -203,7 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

4.3*. У процесі розширення вуглекислого газу 50 % підведеної теплоти перетворюється на роботу, а 50 % йде на збільшення внутрішньої енергії. Де на p - v -діаграмі розташований цей процес? Чому дорівнює

показник політропи? Чому дорівнює теплоємність вуглекислого газу в цьому процесі? Як змінюється температура газу під час розширення?

Розв'язання. У цьому процесі коефіцієнт розподілення теплоти $\varphi = \Delta U/Q = 1/2$. Теплоту процесу та змінення внутрішньої енергії газу можна записати як $Q = mc_n \Delta T$ і $\Delta U = mc_v \Delta T$.

Отже, $c_v/c_n = \Delta U/Q = 1/2$, або $c_n/c_v = 1/\varphi$.

Запишемо формулу для теплоємності політропного процесу

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1},$$

звідки

$$c_n/c_v = (n-k)/(n-1).$$

Також можна записати

$$(n-k)/(n-1) = 1/\varphi = 2,$$

звідки отримуємо

$$n = (1 - k\varphi)/(1 - \varphi).$$

У цьому разі, якщо показник адіабати вуглекислого газу $k = 1,33$,

$$n = 2 - k = 2 - 1,33 = 0,67.$$

Питома теплоємність процесу

$$c_n = c_v/\varphi = 2c_v = 2 \cdot 0,626 = 1,252 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)},$$

(питома ізохорна теплоємність c_v вуглекислого газу при 0°C становить $0,626 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$, див. таблицю А.5).

У процесі розширення температура газу збільшується (рисунок 4.2). Температура та об'єм у цьому процесі пов'язані залежністю

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-n} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{0,33} = \sqrt[3]{V_2/V_1}.$$

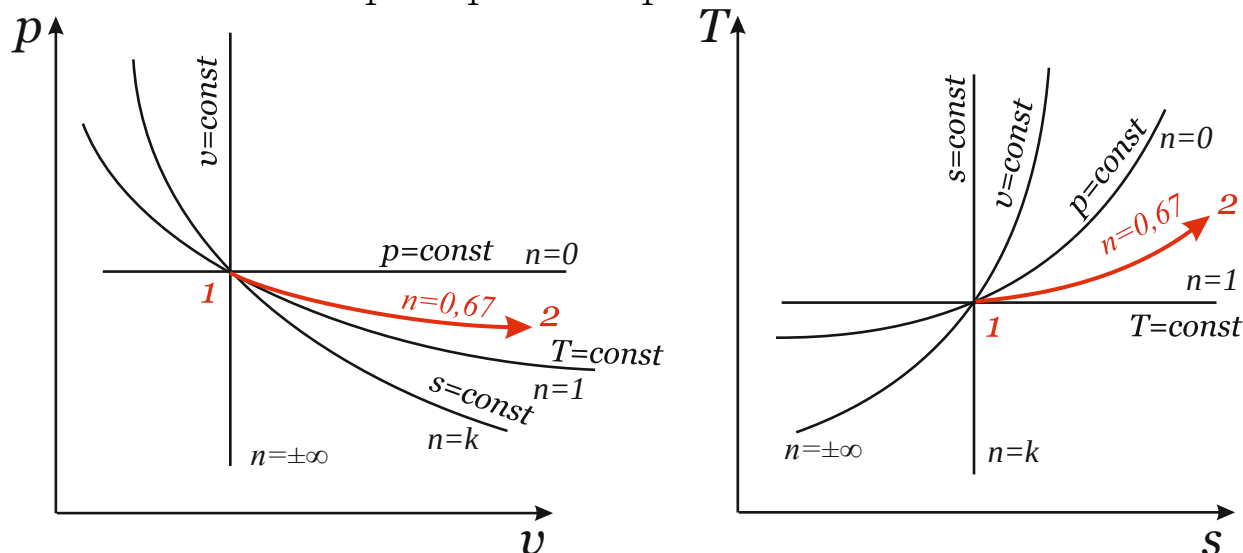


Рисунок 4.2 – Процес розширення в p - v - і T - s -координатах

4.4*. При політропному стисненні 1 кг повітря до об'єму $v_2 = 0,1v_1$ його температура збільшилася з $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до $t_2 = 100^\circ\text{C}$; тиск початку стиснення $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити кінцеві параметри газу, показник

політропи, роботу стиснення та кількість відведеної назовні теплоти. Якою була б кінцева температура у разі адіабатичного стиснення?

Розв'язання. Температури та об'єми при політропічному процесі пов'язані співвідношенням $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{1-n}$. Звідси знаходимо показник політропи цього процесу

$$n = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\ln(v_1/v_2)} + 1 = \frac{\ln(327/283)}{\ln 10} + 1 = 1,12.$$

Тиск у кінці політропного процесу стиснення

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = 0,1 \cdot 10^6 \cdot 10^{1,12} = 1,318 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Кінцевий об'єм визначимо з рівняння стану ідеального газу для 1 кг речовини

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 373}{1,318 \cdot 10^6} = 8,122 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Початковий об'єм повітря

$$v_1 = 10v_2 = 0,8122 \text{ м}^3.$$

Процес стиснення в $p-v$ - і $T-s$ -координатах наведено на рисунку 4.3.

Робота стиснення в політропному процесі для 1 кг газу

$$l_{\text{ст}} = \frac{R(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{287 \cdot (100 - 10)}{1,12 - 1} = 215,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Відведена в процесі стиснення теплота для 1 кг газу

$$\begin{aligned} q_{\text{відв}} &= -c_n(T_2 - T_1) = \frac{n - k}{n - 1} c_v(T_1 - T_2) = \frac{n - k}{n - 1} \frac{c_p}{k} (T_1 - T_2) = \\ &= \frac{1,12 - 1,4}{1,12 - 1} \cdot \frac{1005}{1,4} \cdot (10 - 100) = 150,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

У разі адіабатичного стиснення кінцева температура становила б

$$T_{2\text{ад}} = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 283 \cdot 10^{0,4} = 710,9 \text{ К} = 437,9 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

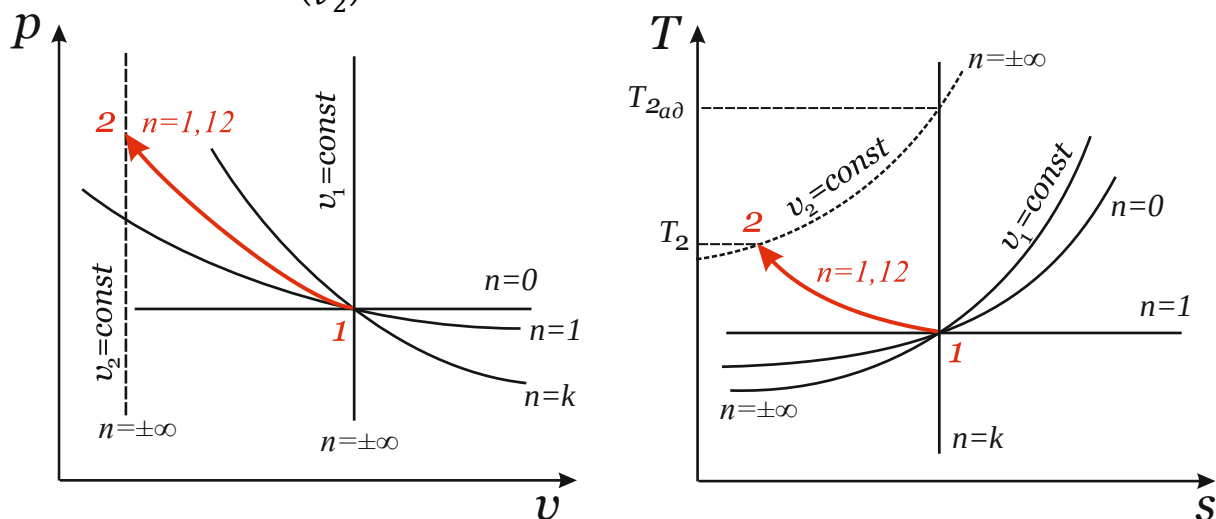


Рисунок 4.3 – Процес стиснення в $p-v$ - і $T-s$ -координатах

4.5. При розширенні 2 кг газу з відведенням 10 ккал теплоти здійснено 10 кДж роботи. На скільки градусів змінилася температура газу? Визначити показник політропи та теплоємність процесу.

4.6. У процесі розширення повітря 25 % підведеної теплоти перетворюється на роботу, а 75 % йде на збільшення внутрішньої енергії. Де на p - v -діаграмі розташований цей процес? Чому дорівнює показник політроп? Чому дорівнює його теплоємність? Як змінюються температура та тиск газу при розширенні?

4.7. У політропному процесі газ віддає 240 кДж теплоти, з яких 80 кДж взято з внутрішньої енергії. Визначити показник політропи, питому теплоємність процесу. Як зміняться тиск і температура газу при зменшенні об'єму в 10 разів? Зобразити цей процес на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.8. У процесі до 1 кг повітря за н. у. підводиться 20 кДж теплоти, при цьому його температура підвищується на 60 °С. Визначити показник політропи і теплоємність процесу, початковий і кінцевий об'єми, роботу розширення і збільшення ентропії. Зобразити цей процес на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.9. У процесі від 0,2 кг азоту відводиться 20 кДж теплоти, при цьому його внутрішня енергія збільшується на 40 кДж. Чому дорівнює показник політропи такого процесу? Чому дорівнює його теплоємність? На скільки градусів збільшилась температура газу у процесі? Як змінюються об'єм та тиск газу при збільшенні температури в 2 рази? Зобразити цей процес на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.10. При ізохоричному нагріванні 1 кг повітря його температура змінилася від 27 °С до 127 °С. Яка кількість теплоти була підведена? Як змінилася його ентропія? У скільки разів змінюються ці величини, якщо нагрівання буде ізобаричним? Чому дорівнює робота розширення в ізобаричному процесі?

4.11. 0,5 кг повітря політропно стискається зі зменшенням об'єму в 10 разів, при цьому його температура збільшується з 20 °С до 200 °С. Визначити показник політропи, теплоємність, роботу розширення, підведену теплоту та змінення ентропії в процесі. Зобразити цей процес на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.12. 1 кг повітря політропно розширюється від 1,2 до 0,1 МПа зі збільшенням об'єму вдвічі. Визначити показник політропи, початковий та кінцевий об'єми, роботу розширення та кінцеву температуру, якщо початкове значення температури становить 727 °С. Зобразити процес

розширення на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.13. Показник політропи дорівнює 0,5. Газ стиснутий до $p_2 = 3p_1$. Як змінилися температура та об'єм газу? Як змінилася внутрішня енергія? Яка робота розширення газу? Чи брала участь у процесі зовнішня теплота? Вважати $T_1 = 600$ К. Зобразити цей процес на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.14. 1 кг азоту спочатку ізотермно стискається до $v_2 = 0,75v_1$, а потім ізобарно розширюється до початкового об'єму; початковий стан визначено параметрами: температура $t_1 = 127$ °С і тиск $p_1 = 1$ бар. Визначити деформаційну роботу, змінення внутрішньої енергії та ентальпії, кількість зовнішньої теплоти обох процесів ($c_p = 1,040$ кДж/(кг · К), $R = 0,297$ кДж/(кг · К)). Зобразити ці процеси на p - v - і T - s -діаграмах.

4.15. У скільки разів зросте робота, що витрачається на адіабатичне стиснення 1 кг ідеального газу, для якого $k = 1,67$, початкова температура газу $T_1 = \text{idem}$ і тиск $p_1 = 0,1$ МПа, якщо кінцевий тиск p_2 в еталонному процесі дорівнює 1 МПа, а в інших — збільшується, відповідно, до 10 МПа, 100 МПа та 1000 МПа? У скільки разів при цьому підвищується температура в кінці стиснення T_2 ? Як зміниться значення роботи, якщо абсолютна температура початку стиснення T_1 збільшиться втричі?

4.16. 5 кг вуглекислоти розширюються по ізобарі $p = 8$ бар зі зміненням температури від 27 °С до 227 °С, а потім по адіабаті ще розширюються до тиску 4 бар. Визначити змінення внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, роботу, зовнішню теплоту в кожному процесі та сумарно. Вважати $c_p = 0,955$ кДж/(кг·К), $k = 1,27$.

4.17. 1 кг гелію, 1 кг повітря та 1 кг вуглекислоти розширюються від тиску 0,4 МПа до тиску 0,1 МПа. Початкова температура всіх трьох газів однакова і дорівнює 177 °С. Порівняти адіабатичну та ізотермічну роботу розширення цих газів, температуру наприкінці процесу.

4.18. 1 кг повітря стискають до $V_2 = 0,5V_1$. Початковий стан повітря: $t_1 = 127$ °С та $p_1 = 1$ бар. Розрахувати процеси стиснення при таких показниках політропи: $n = -0,6; 0; 0,6; 1,2; 1,4; 2$. До розрахунку входить визначення термічних параметрів в кінці процесу розширення (p_2, T_2) та енергетичних характеристик процесу ($c_n, q, l, \Delta u, \Delta i, \Delta s$), результати розрахунків подати у вигляді таблиці. Зобразити ці процеси на p - v - і T - s -діаграмах, задавши для порівняння ізобару, ізохору, ізотерму та адіабату.

4.19. Суміш з 4 кг гелію і 2 кг водню адіабатично розширюється до $V_2 = 2,5V_1$. Початкова температура $t_1 = 127$ °С і тиск суміші $p_1 = 10$ бар. Визначити V_1, V_2, p_2, T_2 , роботу розширення та змінення внутрішньої енергії суміші.

4.20. У циліндрі дизеля повітря з початковими параметрами $t_1 = 57^\circ\text{C}$ і $p_1 = 1$ бар стискається по політропі $n = 1,38$ до досягнення ним температури 727°C , дещо більшої температури самозаймання палива. Визначити необхідний ступінь стиснення $\varepsilon = v_1/v_2$, тиск в кінці стиснення, питому роботу стиснення і відведену теплоту.

4.21*. У навколишньому середовищі при атмосферному тиску $p_{\text{атм}} = 1$ бар знаходиться циліндр з рухомим поршнем діаметром $d = 400$ мм. Під поршнем знаходиться $0,03$ кг гелію при $t_1 = 17^\circ\text{C}$. На поршень покладено вантаж масою $m_{\text{гр}} = 4000$ кг. Газ нагрівається, отримуючи 58 кДж теплоти. Визначити параметри газу в кінці рівноважного процесу, змінення ентальпії, ентропії, внутрішньої енергії, роботу розширення газу (для гелію $\mu = 4$ кг/кмоль; $k = 1,67$).

Розв'язання. Такий процес розширення газу – ізобаричний, що відбувається при тиску

$$p = p_{\text{атм}} + \frac{m_{\text{гр}}g}{\frac{1}{4}\pi d^2} = 10^5 + \frac{4000 \cdot 9,81}{\frac{1}{4}\pi \cdot 0,4^2} = 4,12 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Початковий об'єм гелію знаходять з рівняння стану

$$pV = m \frac{R_\mu}{\mu} T,$$

звідки

$$V_1 = \frac{m_{\text{He}} R_\mu T_1}{p \cdot \mu_{\text{He}}} = \frac{0,03 \cdot 8314 \cdot 290}{4,12 \cdot 10^5 \cdot 4} = 0,0439 \text{ м}^3.$$

При ізобаричному підведенні теплоти вся вона йде на збільшення ентальпії газу: $Q = \Delta I = m_{\text{He}} c_p \Delta T$. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією питома ізобарна теплоємність гелію

$$c_p = \frac{\gamma + 2}{\gamma} R_{\text{He}} = \frac{5}{2} \frac{R_\mu}{\mu_{\text{He}}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8314}{4} = 5196 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

де γ – кількість степенів свободи молекули гелію, для одноатомної молекули $\gamma = 3$. Тоді

$$\Delta T = \frac{Q}{m_{\text{He}} c_p} = \frac{58 \cdot 10^3}{0,03 \cdot 5196} = 372^\circ\text{C};$$

$$T_2 = T_1 + \Delta T = 17 + 372 = 389^\circ\text{C} = 662 \text{ К.}$$

Під час процесу температура збільшилась у

$$T_2/T_1 = 662/290 = 2,283 \text{ раза.}$$

У стільки ж разів збільшився і об'єм при ізобаричному процесі

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,0439 \cdot 2,283 = 0,1002 \text{ м}^3;$$

Змінення ентальпії

$$\Delta I = Q = 58 \text{ кДж.}$$

Змінення внутрішньої енергії

$$\Delta U = m_{He} c_v \Delta T = \frac{\Delta I}{k} = \frac{58}{1,67} = 34,8 \text{ кДж}.$$

Змінення ентропії в рівноважному ізобаричному процесі

$$\Delta S = m_{He} c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = 0,03 \cdot 5196 \cdot \ln 2,283 = 128,7 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Роботу розширення гелію можна знайти або з першого закону термодинаміки

$$L = Q - \Delta U = 58 - 34,8 = 23,2 \text{ кДж},$$

або за виразом для роботи розширення в ізобаричному процесі

$$L = p \Delta V = 4,12 \cdot 10^5 (0,1002 - 0,0439) = 23,2 \text{ кДж}.$$

Робочий хід поршня

$$h = \frac{\Delta V}{\frac{1}{4} \pi d^2} = \frac{0,1002 - 0,0439}{0,25 \pi \cdot 0,4^2} = 0,448 \text{ м}.$$

4.22. У навколишньому середовищі при атмосферному тиску $p_{\text{атм}} = 1$ бар знаходиться циліндр з рухомим поршнем діаметром $d = 280$ мм. Під поршнем знаходиться $0,05$ кг повітря при $t_1 = 27$ °С. На поршень діє вантаж масою $m_{\text{гр}} = 3$ т. Газ нагрівається, одержуючи $0,03$ МДж теплоти. Визначити параметри газу в кінці рівноважного процесу, змінення ентальпії, ентропії, внутрішньої енергії, роботу розширення газу.

4.23. На одній з ділянок циклу дизеля продукти згоряння розширюються при постійному тиску $6,2$ МПа від об'єму 150 см^3 до 300 см^3 , причому температура в кінці цього процесу досягає 1500 К. Вважаючи фізичні властивості продуктів згоряння такими ж, як і повітря, визначити: температуру початку процесу розширення; роботу, здійснену на ділянці; змінення питомих внутрішньої енергії та ентальпії; кількість спаленого палива (його теплотворна здатність – $41,6$ МДж/кг).

4.24*. У балоні об'ємом 60 л знаходиться стиснене повітря при абсолютному тиску $p_1 = 15$ МПа і температурі $t_1 = 20$ °С. Після різкого відкриття випускного вентиля повітря витікає в атмосферу, а потім вентиль знову закривається. Тиск у балоні після випуску дорівнює 10 МПа. Через деякий час температура повітря в балоні знову дорівнює температурі навколишнього середовища 20 °С. Вважаючи, що за час випуску теплообмін між вмістом балона та навколишнім середовищем ще не відбувся, визначити: температуру повітря в балоні відразу після випуску, кількість повітря, що витекло з балона, тиск у балоні після відновлення початкової температури. Розрахувати також кількість повітря, що вийшло б у атмосферу при дуже повільному його випусканні до тиску $p_2 = 10$ МПа.

Розв'язання:

1. Процес витікання повітря з балона – адіабатичний, температури та тиски початку та кінця процесу витікання пов'язані співвідношенням

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

де k – показник адіабати, для повітря $k = 1,4$.

Звідси температура в кінці випускання

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = (20 + 273) \left(\frac{10,0}{15,0}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 261 \text{ K} = -12^\circ \text{C}.$$

Кількість повітря Δm , яке витекло, знайдемо з рівняння стану ідеального газу $pV = mRT$, записаного для початку і кінця процесу витікання:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_1 - m_2 = \frac{pV_1}{RT_1} - \frac{pV_2}{RT_2} = \frac{V}{R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2}\right) = \\ &= \frac{60 \cdot 10^{-3}}{287} \left(\frac{15,0 \cdot 10^6}{293} - \frac{10,0 \cdot 10^6}{261}\right) = 2,69 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Процес нагрівання повітря в балоні до початкової температури — ізохоричний, збільшення тиску пропорційне збільшенню температури:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}, \quad \text{звідки} \quad p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 10,0 \cdot \frac{293}{261} = 11,23 \text{ МПа}.$$

2. При дуже повільному витіканні повітря внаслідок теплообміну між повітрям у балоні та атмосферним повітрям температура першого встигатиме вирівнюватися. Такий процес можна вважати ізотермічним, що відбувається при $T = T_1 = 293 \text{ K}$.

У цьому випадку кількість повітря, що витекло,

$$\begin{aligned} \Delta m_t &= m_1 - m_{2t} = \frac{pV_1}{RT_1} - \frac{pV_2}{RT_1} = \frac{V}{RT_1} (p_1 - p_2) = \\ &= \frac{60 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 293} (15,0 \cdot 10^6 - 10,0 \cdot 10^6) = 3,57 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Відносне збільшення маси повітря, що витекла з балона у ізотермічному процесі,

$$\frac{\Delta m_t - \Delta m}{\Delta m} 100 \% = \frac{3,57 - 2,69}{2,69} 100 \% = 32,7 \%.$$

4.25. Азот із балона об'ємом $0,1 \text{ м}^3$ випускається в атмосферу настільки швидко, що теплообмін не встигає відбутися. До випускання манометричний тиск у балоні $p_1 = 1,25 \text{ МПа}$, температура $t_1 = 27^\circ \text{C}$. Після закриття вентиля температура зменшилася до $t_2 = -3^\circ \text{C}$. Знайти масу випущеного азоту та манометричний тиск у балоні після випускання. Барометричний тиск вважати 1 бар.

4.26. У балоні об'ємом 100 л знаходиться стиснений аргон при тиску $p_1 = 8$ МПа та температурі $t_1 = 27$ °С. Після різкого відкриття випускного вентиля аргон витікає у повітря, потім вентиль знову закривається. Тиск у балоні після випускання дорівнює 0,1 МПа. Через деякий час температура аргону в балоні знову дорівнюватиме температурі навколишнього середовища 27 °С. Вважаючи, що за час випускання теплообмін між вмістом балона та навколишнім середовищем не відбувається, визначити: температуру аргону в балоні відразу після випускання, кількість аргону, що витік, тиск у балоні після відновлення початкової температури. Розрахувати також кількість аргону, що витік, при дуже повільному його випусканні до тиску $p_2 = 0,1$ МПа.

4.27*. У політропному процесі ентропія 1 кг кисню збільшилася на 0,123 кДж/К, а температура кисню – з 27 °С до 127 °С. Визначити показник політропи, кількість підведеної теплоти, а також роботу розширення. Істина питома ізохорна теплоємність кисню при 27 °С дорівнює 0,6569 кДж/(кг · К), при 127 °С — 0,6799 кДж/(кг · К).

Розв'язання. Середню питому ізохорну теплоємність кисню $c_{v\text{ср}}$ у певному діапазоні температур знаходять як

$$c_{v\text{ср}} = \frac{u(t_2) - u(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{c_v(t_2) \cdot t_2 - c_v(t_1) \cdot t_1}{t_2 - t_1};$$

$$c_{v\text{ср}} = \frac{0,6799 \cdot 127 - 0,6569 \cdot 27}{127 - 27} = 0,6861 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Середній показник адіабати у певному діапазоні температур

$$k = \frac{k_{t_1} + k_{t_2}}{2} = \frac{1,395 + 1,382}{2} = 1,389.$$

Змінення ентропії політропного процесу ΔS пов'язане з теплоємністю процесу c_n співвідношенням

$$\Delta S = c_n \ln \frac{T_2}{T_1},$$

звідки

$$c_n = \frac{\Delta S}{\ln \frac{T_2}{T_1}} = \frac{0,123}{\ln \frac{127 + 273}{27 + 273}} = 0,4276 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

У свою чергу, показник політропи можна обчислити за відомою теплоємністю процесу

$$n = \frac{c_v k - c_n}{c_v - c_n} = \frac{0,6861 \cdot 1,389 - 0,4276}{0,6861 - 0,4276} = 2,032.$$

Кількість підведеної теплоти до 1 кг кисню

$$Q = m_{O_2} c_n \Delta T = 0,4276(127 - 27) = 42,76 \text{ кДж.}$$

Додатна величина теплоти ($Q > 0$) свідчить про підведення теплоти в процесі.

Роботу розширення знаходять або за першим законом термодинаміки

$L = Q - \Delta U = Q - m_{O_2} c_v \Delta T = 42,76 - 0,6861(127 - 27) = -25,85 \text{ кДж,}$
або за формулою для роботи розширення у політропному процесі

$$\begin{aligned} L &= m_{O_2} \frac{R_{O_2}}{n-1} (T_1 - T_2) = m_{O_2} \frac{1}{n-1} \frac{R_0}{\mu_{O_2}} (T_1 - T_2) = \\ &= 1 \frac{1}{2,032 - 1} \frac{8,31445}{31,998} (27 - 127) = -25,18 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Від'ємна величина роботи розширення L означає, що відбувається процес стиснення кисню. Таким чином, маємо процес стиснення із підведенням теплоти. Процес стиснення кисню в p - v - і T - s -координатах наведено на рисунку 4.4.

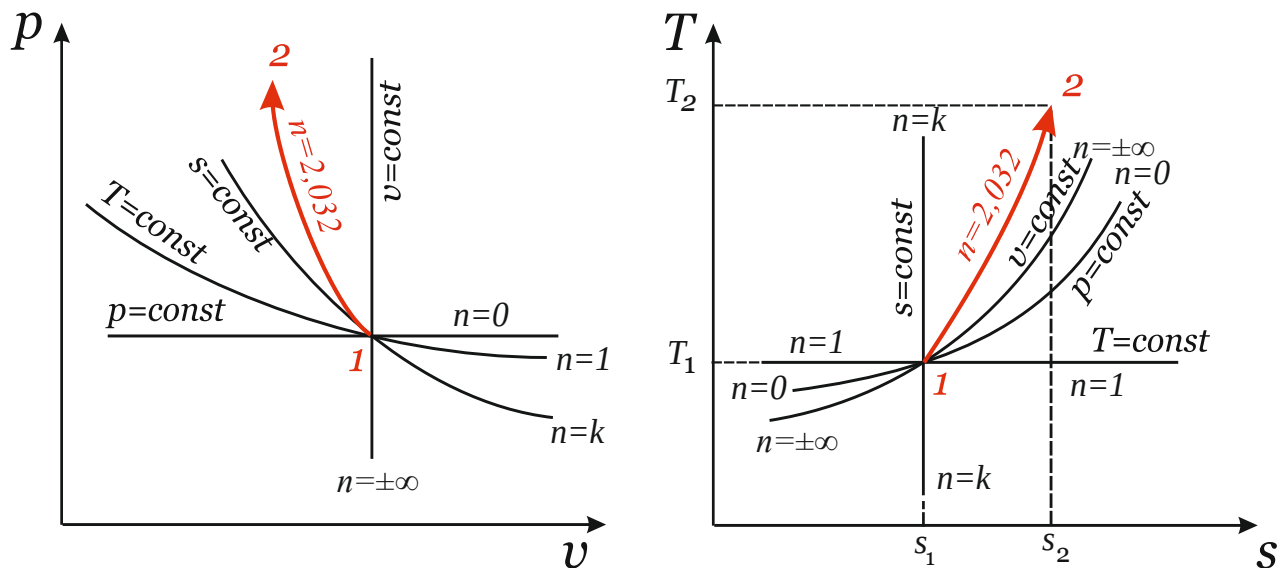


Рисунок 4.4 – Процес стиснення кисню в p - v - і T - s -координатах

4.28. Визначити змінення ентропії 1 кг повітря у політропному процесі з показником політропи $n = 1,25$ при зміні температури від 400°C до 40°C . У скільки разів зміниться об'єм та тиск? Зобразити процес у p - v - і T - s -координатах.

4.29*. При випробуванні дизеля потужністю 60 к.с. його навантажують гальмом з водяним охолодженням. Визначити витрати води, якщо її температура при проходженні через гальмо збільшується на 32°C , а 25 % теплоти гальма відводиться в атмосферу.

Розв'язання. Потужність двигуна повністю перетворюється на теплоту тертя, що виділяється в одиницю часу, 25 % цієї теплоти розсіюється у навколишньому середовищі, а 75 % поглинається водою.

Запишемо рівняння енергетичного балансу:

$$0,75N = m_{\text{вод}} c_p \Delta t,$$

де N – потужність двигуна, Вт; потужність в одну кінську силу (к.с.) дорівнює 735,5 Вт (див. таблицю А.2);

$m_{\text{вод}}$ – витрата води, кг/с;

c_p – теплоємність води, що дорівнює 4186,8 Дж/(кг · К);

Δt – підвищення температури, °С.

Тоді потрібна витрата води

$$m_{\text{вод}} = \frac{0,75N}{c_p \Delta t} = \frac{0,75 \cdot 60 \cdot 735,5}{4186,8 \cdot 32} = 0,247 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

4.30. Проводиться випробування двигуна, під час якого двигун замість того, щоб сприймати корисне навантаження, гальмується. На скільки градусів нагріється вода, що охолоджує гальмо, якщо крутний момент двигуна дорівнює 4 кДж, частота обертання – 1200 об/хв? Відомо, що до колодок гальма підводиться 8 тонн води за годину при початковій температурі 20 °С. Вважати, що вся робота двигуна перетворюється на теплоту тертя. (Нагадаємо, що потужність двигуна N пов'язана з моментом на валу $M_{\text{кр}}$ і кількістю оборотів за хвилину n залежністю $N = 2\pi n M_{\text{кр}}/60$).

4.31. При гальмуванні двигуна вода, що охолоджує гальмівні колодки, нагрівається на 40 °С. Витрата води – 1400 кг/год. Визначити потужність двигуна, якщо 20 % теплоти тертя розсіюється у навколишнє середовище.

4.32. Яку кількість охолоджувальної води треба подавати на колодки випробувального гальма за 1 хв, якщо потужність двигуна – 60 кВт, температура охолоджувальної води $t = 15$ °С, а гранично допустима температура води на виході – 85 °С? Вважати, що 25 %, теплоти тертя розсіюється у навколишнє середовище.

Тема 5 СТИСНЕННЯ ГАЗУ В КОМПРЕСОРІ

Значення максимального ступеня стиснення в одному ступені $\pi_{\text{ст}}$ залежить від типу компресора:

- поршневий — 6 – 8;
- відцентровий — 3,5 – 4,5;
- осьовий — 1,3 – 1,35.

5.1*. Компресор з продуктивністю 1000 м³/год всмоктує повітря при тиску 0,98 бар та температурі 17 °С. Визначити для ізотермічного та адіабатичного стиснення (ступінь підвищення тиску $\pi = 5$): температуру стисненого повітря, питому роботу стиснення (1 кг повітря), теоретичну потужність компресора, годинну витрату охолоджувальної води при підігріванні її на 16 °С.

Розв'язання. Температура стисненого повітря на виході з компресора у політропному процесі знаходять за формулою

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = T_1 \pi^{\frac{n-1}{n}}.$$

Ізотермічне стиснення:
показник політропи $n = 1$

$$T_2 = T_1 = 290 \text{ K}.$$

Адіабатичне стиснення:
показник політропи $n = k = 1,4$

$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}} = 290 \cdot 5^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 459,3 \text{ K}.$$

Робота політропного стиснення в компресорі 1 кг повітря знаходять за однією з формул

$$l_{\text{mex}} = \frac{n}{n-1} R(T_2 - T_1),$$

або $l_{\text{mex}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right),$ або $l_{\text{mex}} = \frac{n}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1),$

але у разі ізотермічного та адіабатичного процесів зручніше використовувати спеціальні формули.

Ізотермічне стиснення:

$$l_{\text{mex}} = RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = RT_1 \ln \pi =$$

$$= 287 \cdot 290 \cdot \ln 5 = 134 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Адіабатичне стиснення:

$$l_{\text{mex}} = i_2 - i_1 = c_p(T_2 - T_1) =$$

$$= 1005 \cdot (459,3 - 290) = 170 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Потужність компресора N знаходять за формулою $N = G \cdot l_{\text{mex}},$ де G — масова витрата повітря, кг/с, яка може бути обчислена за відомою об'ємною витратою (продуктивністю) $\dot{V}, \text{ м}^3/\text{с}:$

$$G = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}.$$

З рівняння стану ідеального газу, виражаючи густину на вході в компресор ρ_1 через T_1 і p_1 , отримаємо

$$G = \frac{p_1}{RT_1} \dot{V} = \frac{0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 290} \cdot \frac{1000}{3600} = 0,327 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Теоретичну потужність компресора визначають як $N = G l_{mex}$; потужність на привід компресора $N_n = N/\eta$, де η – ККД компресора, для ізотермічного процесу стиснення $\eta_T = 0,70$; для адіабатичного – $\eta_{ад} = 0,85$.

Ізотермічне стиснення:

$$N = G l_{mex} = 0,327 \cdot 134 = 43,8 \text{ кВт};$$

$$N_n = \frac{N}{\eta_T} = \frac{43,8}{0,7} = 62,6 \text{ кВт}.$$

Адіабатичне стиснення:

$$N = G l_{mex} = 0,327 \cdot 170 = 55,6 \text{ кВт};$$

$$N_n = \frac{N}{\eta_{ад}} = \frac{55,6}{0,85} = 65,4 \text{ кВт}.$$

Годинна витрата охолоджувальної води має сенс тільки для ізотермічного компресора. У цьому випадку вся робота стиснення перетворюється на теплоту, що відводиться (перший принцип термодинаміки), і в результаті теплообміну перетворюється на внутрішню енергію охолоджувальної води. Рівняння теплового балансу в розрахунку на одиницю часу системи стиснене повітря – охолоджувальна вода має вигляд

$$N_n = \dot{m} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta t$$

де $\dot{m}$ – масова витрата води, кг/с;

c_{H_2O} – теплоємність води, $c_{H_2O} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

Δt – нагрів води в теплообміннику, $\Delta t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Витрату охолоджувальної води визначимо як

$$\dot{m} = \frac{N_n}{c_{H_2O} \cdot \Delta t} = \frac{62,6 \cdot 10^3}{4200 \cdot 16} = 0,932 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

звідки годинна витрата води становитиме

$$\dot{m} = 3600 \cdot 0,932 = 3,35 \text{ т/год або } 3,35 \text{ м}^3/\text{год}.$$

5.2. Компресор стискає 200 м³/год повітря від тиску $p_1 = 0,98$ бар до $p_2 = 6,3$ бар. Визначити потужність на привід компресора, якщо стиснення відбувається: 1) адіабатично; 2) політропічно з $n = 1,3$; 3) ізотермічно.

5.3. Компресор всмоктує повітря при тиску 1 бар та температурі 20 °С і стискає його до тиску 6,5 бар. Визначити теоретичну потужність компресора при ізотермічному, адіабатичному та політропічному ($n = 1,2$) стисненні; знайти також параметри стисненого повітря. Годинна продуктивність компресора – 900 м³/год за н. у.

5.4*. Азотний компресор підтримує постійний тиск 12 ат в резервуарі, з якого заповнюються балони об'ємом по 100 л кожен. Протягом години заповнюється 200 балонів за температури азоту 50 °С, до якої газ охолоджується в резервуарі після подачі його компресором при температурі 127 °С. Азот надходить у компресор з газгольдера при температурі -13 °С та тиску 1,2 ат. Визначити показник політропи процесу стиснення, питому роботу компресора та його потужність. ККД компресора взяти таким, що дорівнює 0,78.

Розв'язання. Об'ємну годинну витрату азоту визначимо, знаючи кількість заповнених балонів: $\dot{V} = N \cdot V_{бал} = 200 \cdot 0,1 = 20 \text{ м}^3 / \text{год}$.

Годинна масова витрата азоту дорівнює масі азоту в балонах, яку знаходять з рівняння стану ідеального газу

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{p\dot{V}}{RT} = \frac{\mu_{N_2} p \dot{V}}{R_\mu T} = \frac{28 \cdot 12 \cdot 0,98 \cdot 10^5 \cdot 20}{8314 \cdot (50 + 273)} = 245,2 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

$$\text{Секундна витрата азоту } \dot{m}_{N_2} = \frac{245,2}{3600} = 0,0681 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Показник політропи процесу стиснення визначимо за відомими температурами та тисками початку та кінця процесу стиснення:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right);$$

З умови завдання впливає: тиск азоту на вході в компресор $p_1 = 1,2$ ат; тиск стисненого азоту на виході $p_2 = 12$ ат; температура азоту на вході в компресор $T_1 = -13 \text{ °С} = 260 \text{ К}$; температура стисненого азоту на виході $T_2 = 127 \text{ °С} = 400 \text{ К}$.

Прологарифмувавши обидві частини виразу, отримаємо

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)},$$

звідки

$$n = \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)} \right)^{-1} = \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{400}{260}\right)}{\ln\left(\frac{12}{1,2}\right)} \right)^{-1} = 1,23.$$

Питома робота компресора у політропному процесі

$$l_{mex} = \frac{n}{n-1} R (T_2 - T_1) = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{R_\mu}{\mu_{N_2}} (T_2 - T_1) = \\ = \frac{1,23}{1,23-1} \cdot \frac{8314}{28} (400 - 260) = 222,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теоретична потужність компресора

$$N = \dot{m}_{N_2} l_{tex} = 0,0681 \cdot 222,3 = 15,14 \text{ кВт.}$$

Ефективна потужність компресора (потужність електродвигуна)

$$N_e = \frac{N}{\eta_k} = \frac{15,14}{0,78} = 19,4 \text{ кВт.}$$

5.5. Відцентровий компресор за 1 хв подає 220 кг повітря при тиску 3,8 бар та температурі 157 °С. Початковий стан повітря: тиск – 1 бар, температура — 17 °С. Припускаючи відсутність проміжного охолодження повітря, визначити показник політропи стиснення компресора та його потужність.

5.6. У газотурбінній установці використовується осьовий компресор, що подає в камеру згоряння за 1 хв 600 м³ повітря при тиску 9,6 бар; в компресор повітря надходить при тиску 1,08 бар та температурі +5 °С; показник політропи стиснення $n = 1,5$; середній ступінь стиснення в одному ступені дорівнює $\pi = 1,31$. Визначити кількість ступенів компресора, його потужність і температуру повітря, що подається.

5.7. Компресор ТРД споживає потужність 185 МВт при витраті повітря 70 кг/с. Нехтуючи втратами потужності на привід агрегатів, визначити температуру гальмування за турбіною, якщо на вході в турбіну вона дорівнює 1450 К (продукти згоряння вважати ідеальним газом з питомою ізобарною теплоємністю $c_p = 1,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$).

5.8. Визначити температуру газу на виході з турбіни турбонасосного агрегату рідинного ракетного двигуна (РРД), що забезпечує подачу компонента з об'ємною витратою 0,25 м³/с при тиску 12 МПа, якщо витрата газу через турбіну – 1,8 кг/с, температура його на вході в турбіну – 1430 К, а питома теплоємність газу незмінна і становить $c_p = 2300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

5.9. Витрата газу через турбіну потужністю 0,4 МВт становить 0,55 кг/с при температурі його на виході 920 К. Визначити, яку температуру повинен мати газ на вході в турбіну, якщо його питома теплоємність $c_p = 2,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

5.10. Відцентровий компресор виробляє 5 м³/год стисненого азоту при тиску 120 бар і температурі 40 °С. Розрахунок провести для компресора, в якому після кожного ступеня встановлено холодильники, що

охолоджують стиснений газ до температури 40 °С. Початковий стан азоту: $p_1 = 1$ бар, $t_1 = 0$ °С. Визначити кількість ступенів компресора, витрату води в холодильнику при нагріванні на 14 °С, потужність компресора. Показник політропи стиснення $n = 1,5$. Зобразити процес стиснення в компресорі в $p-v$ - і $T-s$ -координатах. Розрахувати параметри такого самого компресора без охолодження, порівняти температури стисненого азоту на виході та необхідні потужності.

5.11*. Розрахувати потужність приводу поршневого компресора для подачі стисненого повітря витратою $G = 0,8$ кг/с при параметрах $p_{\text{стис}} = 13$ МПа і $t_{\text{стис}} = t_1$, де t_1 — температура навколишнього середовища. Визначити кількість ступенів стиснення компресора; ступінь підвищення тиску у кожному ступені; кількість тепла, відведеного від повітря в циліндрах компресора, в проміжних та кінцевому холодильниках. Тиск повітря на вході в перший ступінь компресора $p_1 = 0,1$ МПа, температура $t_1 = 27$ °С. Допустиме підвищення температури повітря в кожному ступені $\Delta t = 120$ °С, показник політропи стиснення $n = 1,25$. У скільки разів збільшиться потужність приводу компресора, якщо стиснення здійснювати в одноступінчастому компресорі за вибраним показником політропи n в адіабатному компресорі?

Розв'язання. Загальний ступінь підвищення тиску в повітряному компресорі

$$\pi_{\Sigma} = \frac{P_K}{P_1} = \frac{13}{0,1} = 130.$$

Допустимий ступінь підвищення тиску $\pi_{\text{ст}}$ в одному ступені визначимо, виходячи з величини гранично допустимої температури повітря за компресорним ступенем, що дорівнює $T_1 + \Delta t$. З рівняння політропи

$$\pi_{\text{ст}} = \left(\frac{T_1 + \Delta t}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}};$$

$$\pi_{\text{ст}} = \left(\frac{300 + 120}{300} \right)^{\frac{1,25}{1,25-1}} = 1,4^5 = 5,378;$$

Необхідну кількість ступенів компресора $m_{\text{ст}}$ знаходимо за виразом

$$\pi_{\Sigma} = (\pi_{\text{ст}})^{m_{\text{ст}}},$$

звідки

$$m_{\text{ст}} = \frac{\ln(\pi_{\Sigma})}{\ln(\pi_{\text{ст}})} = \frac{\ln(130)}{\ln(5,378)} = 2,893.$$

Це число округляємо до найближчого більшого цілого числа, одержуємо кількість ступенів компресора

$$m_{\text{ст}} = 3.$$

Ступінь підвищення тиску в одному ступені

$$\pi_{\text{ст}} = \sqrt[n]{\pi_{\Sigma}} = \sqrt[3]{130} = 5,066.$$

Якщо на вході в компресорний ступінь температура повітря становить $T_1 = 300 \text{ K}$, то на виході температура повітря

$$T_2 = T_1 \cdot (\pi_{\text{ст}})^{\frac{n-1}{n}} = 300 \cdot (5,066)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 415 \text{ K}.$$

Підвищення температури повітря в компресорному ступені

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 415 - 300 = 115 \text{ K} < 120 \text{ K}.$$

Потужність процесу стиснення в одному ступені знайдемо як добуток питомої роботи стиснення $l_{\text{ст}}$ політропного процесу на масову витрату робочого тіла G :

$$l_{\text{ст}} = \frac{R}{n-1} \cdot \Delta T ;$$

$$N_{\text{ст}} = G \cdot l_{\text{ст}} ;$$

$$N_{\text{ст}} = G \cdot \frac{R}{n-1} \cdot \Delta T ,$$

де $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – газова стала повітря;

$$N_{\text{ст}} = 0,8 \cdot \frac{0,287}{1,25-1} \cdot 115 = 105,62 \text{ кВт}.$$

Якщо припустити, що всі три компресорні ступені працюють ідентично, загальна теоретична потужність на стиснення знайдемо як

$$N_{\text{сум}} = 3N_{\text{ст}} = 3 \cdot 105,62 = 316,86 \text{ кВт}.$$

Принципову схему двоступінчастого компресора зі ступенями, що охолоджуються, і з проміжним холодильником подано на рисунку 5.1.

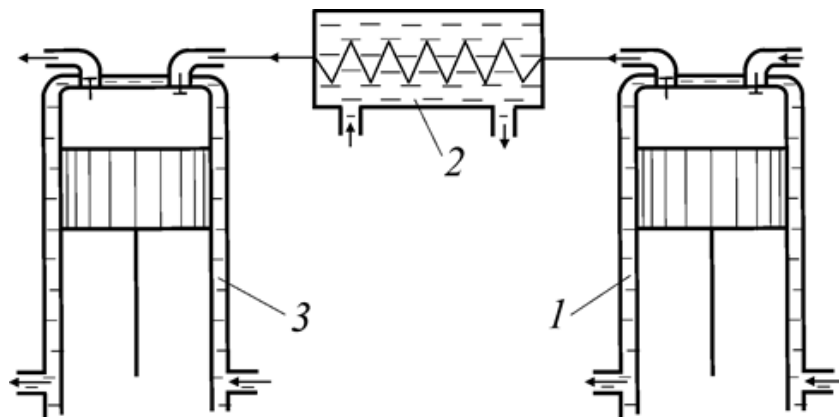


Рисунок 5.1 — Принципова схема двоступінчастого компресора із проміжним холодильником:

- 1, 3 – компресорні ступені, що охолоджуються;
- 2 – проміжний холодильник

Теплоту, що відводиться в циліндрі одного компресорного ступеня (рисунок 5.1), знаходимо як

$$Q_{\text{ст}} = G \cdot \frac{n - k}{n - 1} c_v \cdot (-\Delta T) = G \cdot \frac{k - n}{n - 1} \cdot c_v (\Delta T),$$

де $c_v = 0,7175$ кДж/(кг · К) – питома ізохорна теплоємність повітря.

Тоді

$$Q_{\text{ст}} = 0,8 \cdot 0,7175 \cdot \frac{1,4 - 1,25}{1,25 - 1} \cdot 115 = 39,607 \text{ кВт}.$$

Теплоту, що відводиться в холодильнику між компресорними ступенями (див. рисунок 5.1), знайдемо в припущенні, що в холодильнику відбувається повне охолодження повітря до температури навколишнього середовища t_1 , отже, температура стисненого повітря має знизитися на $\Delta T = 115$ К.

Сам процес охолодження відбувається ізобарно, тому

$$Q_{\text{охол}} = G c_p (T_2 - T_1) = G c_p \Delta T,$$

де $c_p = 1,0045$ кДж/(кг · К) – питома ізобарна теплоємність повітря.

Тоді

$$Q_{\text{охол}} = 0,8 \cdot 1,0045 \cdot 115 = 92,416 \text{ кВт}.$$

Загальна теплота, відведена в рубашку охолодження в циліндрах компресорних ступенів,

$$Q_{\Sigma \text{ст}} = 3 Q_{\text{ст}} = 3 \cdot 39,607 = 118,82 \text{ кВт}.$$

Загальна теплота, відведена у холодильниках між компресорними ступенями,

$$Q_{\Sigma \text{охол}} = 3 Q_{\text{охол}} = 3 \cdot 92,416 = 277,25 \text{ кВт}.$$

Сумарна теплота, яка відводиться в процесі стиснення у триступінчастому компресорі, становитиме

$$Q_{\Sigma \text{ст}} + Q_{\Sigma \text{охол}} = 118,82 + 277,25 = 396,07 \text{ кВт}.$$

Розрахуємо секундну роботу стиснення одноступінчастого компресора $N_{\text{безохол}}$ за заданим показником політропи n . Це може бути багаступінчастий компресор без проміжного охолодження — на розрахункову формулу це не впливає:

$$N_{\text{безохол}} = G \frac{RT_1}{n - 1} \left((\pi_{\Sigma})^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right);$$

$$N_{\text{безохол}} = 0,8 \frac{0,287 \cdot 300}{1,25 - 1} \left((130)^{\frac{1,25-1}{1,25}} - 1 \right) = 453,84 \text{ кВт}.$$

Потужність приводу компресора в цьому випадку збільшиться

$$\Delta_N = \frac{N_{\text{безохол}} - N_{\text{сум}}}{N_{\text{сум}}} = \frac{453,84 - 316,86}{316,86} 100 \% = 43,23 \%$$

або

$$N_{\text{безохол}}/N_{\text{сум}} = 453,84/316,86 = 1,43 \text{ раза.}$$

Температура повітря на виході з такого компресора становила б

$$T_{2_{\text{безохол}}} = T_1 (\pi_{\Sigma})^{\frac{n-1}{n}} = 300 \cdot (130)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 794 \text{ К} = 521 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

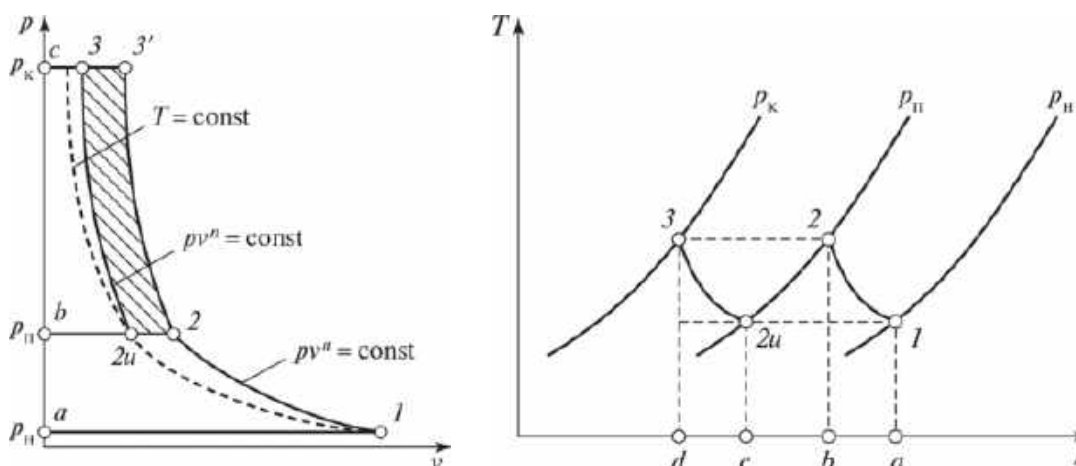


Рисунок 5.2 — Приклад процесу стиснення у компресорних ступенях з проміжним охолодженням

Очевидно, що здійснення проміжного охолодження є необхідним при високих ступенях підвищення тиску (рисунок 5.2).

5.12. Багатоступінчастий осьовий компресор повинен за 1 хв подавати 60 м^3 повітря, стисненого до тиску $0,25 \text{ МПа}$, та 20 м^3 – стисненого до $0,8 \text{ МПа}$. Початковий стан повітря: $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, показник політропи процесу стиснення $n = 1,46$. Повітря стиснене до $0,25 \text{ МПа}$ і призначене для подальшого стиснення, охолоджується в холодильнику до температури $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити кількість ступенів компресора до відбору повітря, параметри повітря низького та високого тиску, потужність компресора та потужність електромотора для приводу компресора, якщо ефективний ККД дорівнює $0,8$.

5.13. Вентиляційна установка складається з осьового компресора, що здійснює за годину 4-кратний обмін повітря в приміщенні із загальним об'ємом 7500 м^3 . Установка повинна долати загальний опір, що дорівнює 1240 мм рт. ст. Повітря, що надходить у вентилятор, має температуру $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та тиск 750 мм рт. ст. Визначити кількість повітря, що надходить у приміщення, його температуру і потужність електромотора вентилятора, якщо його ККД дорівнює $0,90$, показник політропи стиснення – $n = 1,6$.

5.14. Компресор живить резервуар зі стисненою вуглекислотою CO_2 до тиску 40 бар, приймаючи її з газгольдера при температурі $5\text{ }^{\circ}C$ і тиску 1,25 бар. Порівняти роботу одноступінчастого та двоступінчастого компресорів, що працюють за показником політропи $n = 1,24$. Охолодження газу у проміжному холодильнику двоступінчастого компресора відбувається до $20\text{ }^{\circ}C$. Хвилинна продуктивність компресорів дорівнює 150 м^3 за н. у. Визначити економію електроенергії під час роботи другого компресора. Знайти витрату охолоджувальної води в обох компресорах при її нагріванні в оболонках циліндрів на $12\text{ }^{\circ}C$, а в холодильнику – на $16\text{ }^{\circ}C$.

5.15. Кисневий компресор працює безперервно для заповнення кисневих балонів при тиску 260 ат і температурі $17\text{ }^{\circ}C$. Протягом години заповнюється 250 балонів об'ємом 40 л. Кисень надходить у компресор з газгольдера під тиском 1,2 ат при температурі $17\text{ }^{\circ}C$. Стиснення в усіх циліндрах компресора відбувається політропічно з $n = 1,25$; охолодження в усіх холодильниках відбувається до початкової температури $17\text{ }^{\circ}C$, а охолоджувальна вода нагрівається на $12\text{ }^{\circ}C$. Знайти необхідну кількість ступенів компресора, якщо гранична температура стисненого кисню не перевищує $80\text{ }^{\circ}C$. Для можливості безпосереднього заповнення балонів після останнього ступеня компресора також встановлено холодильник. Визначити параметри стисненого кисню після кожного ступеня, потужність електромотора при ККД передачі, що дорівнює 0,85, і годинну витрату охолоджувальної води. Роботу компресора подати в $p-v$ - і $T-s$ -координатах.

5.16. Відцентровий компресор призначено для стиснення CO_2 до 35 бар. Продуктивність його дорівнює 50 м^3 стисненого газу на годину. Ступінь стиснення в одному ступені не перевищує $\pi = 3,4$. Стан вуглекислоти при всмоктуванні: тиск – 0,7 бар і температура – $50\text{ }^{\circ}C$. Визначити кількість ступенів компресора, його потужність і витрату охолоджувальної води при показнику політропи стиснення у відцентровому ступені $n = 1,45$. Охолодження вуглекислоти в холодильниках відбувається до початкової температури при нагріванні охолоджувальної води на $12\text{ }^{\circ}C$. Показник адіабати CO_2 взяти $k = 1,3$. Ефективний ККД компресора – 0,75. Роботу компресора подати в $p-v$ - і $T-s$ -координатах.

5.17*. Відцентровий компресор повинен подавати протягом хвилини 120 м^3 повітря за н. у. при тиску 8 бар, показник політропи стиснення дорівнює 1,6. Початковий стан повітря: тиск – 1 бар і температура – $+15\text{ }^{\circ}C$. Визначити кількість ступенів компресора, ступінь стиснення у кожному ступені за умови однакової роботи стиснення і загальну потужність компресора.

Розв'язання. Загальний ступінь стиснення компресора

$$\pi = \frac{p_{\text{наг}}}{p_{\text{вх}}} = \frac{8}{1} = 8.$$

Загальна робота компресора зі стиснення 1 кг повітря

$$l_{\text{mex}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{1,6}{1,6-1} 287 \cdot 278 \left(8^{\frac{1,6-1}{1,6}} - 1 \right) = 251,28 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Загальна потужність

$$N = Gl_{\text{mex}} = \dot{V} \rho_{\text{н.у}} l_{\text{mex}} = \dot{V} \frac{p_{\text{н.у}}}{RT_{\text{н.у}}} l_{\text{mex}} = \frac{120}{60} \frac{101325}{287 \cdot 273} 251,28 = 650 \text{ кВт}.$$

Для відцентрового компресора ступінь стиснення в одному ступені не перевищує 4,5, тому в нашому випадку необхідно використовувати двоступінчастий компресор, для якого середній ступінь стиснення в одному ступені

$$\pi_{\text{ст сер}} = \sqrt[n]{\pi} = \sqrt[2]{8} = 2,828.$$

У цьому випадку робота першого ступеня компресора

$$l_{1 \text{ mex}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left(\pi_{\text{ст сер}}^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{1,6}{1,6-1} 287 \cdot 278 \left(2,828^{\frac{0,6}{1,6}} - 1 \right) = 101,45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Температура повітря на вході до другого ступеня

$$T_{2 \text{ вх}} = T_1 \cdot \pi_{\text{ст сер}}^{\frac{n-1}{n}} = 278 \cdot 2,828^{\frac{0,6}{1,6}} = 410,6 \text{ К}.$$

Робота другого ступеня компресора

$$l_{2 \text{ mex}} = \frac{n}{n-1} RT_{2 \text{ вх}} \left(\pi_{\text{ст сер}}^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = \frac{1,6}{1,6-1} 287 \cdot 410,6 \left(2,828^{\frac{0,6}{1,6}} - 1 \right) = 149,82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

За відсутності охолодження повітря при однаковому ступені стиснення робота і потужність компресора розподілені між ступенями нерівномірно: на перший ступінь припадає близько 40 % всього навантаження, на другий – 60 %. Для рівномірного розподілу навантаження між ступенями загальну роботу розділимо на рівні частини:

$$l_{1 \text{ mex}} = l_{2 \text{ mex}} = \frac{l_{\text{mex}}}{2} = \frac{251,28}{2} = 125,64 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

З рівняння роботи при політропному стисненні

$$l_{1\text{ mex}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \cdot \left(\pi_{1\text{ cm}}^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

знайдемо ступінь стиснення в першому ступені компресора

$$\pi_{1\text{ cm}} = \left(1 + \frac{n-1}{n} \frac{l_{1\text{ mex}}}{RT_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = \left(1 + \frac{1,6-1}{1,6} \frac{125640}{287 \cdot 278} \right)^{\frac{1,6}{1,6-1}} = 3,447.$$

Для другого ступеня компресора $\pi_{2\text{ cm}} = \frac{\pi}{\pi_{1\text{ cm}}} = \frac{8}{3,447} = 2,321.$

Температура газу на вході до другого ступеня

$$T_{2\text{ вх}} = T_1 \cdot \pi_{1\text{ cm}}^{\frac{n-1}{n}} = 278 \cdot 3,447^{\frac{0,6}{1,6}} = 442,2 \text{ K}.$$

Температура газу на виході з другого ступеня

$$T_{2\text{ наг}} = T_{2\text{ вх}} \cdot \pi_{2\text{ cm}}^{\frac{n-1}{n}} = 442,2 \cdot 2,321^{\frac{0,6}{1,6}} = 606,3 \text{ K},$$

або $T_{2\text{ наг}} = T_1 \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} = 278 \cdot 8^{\frac{0,6}{1,6}} = 606,3 \text{ K}.$

5.18. Відцентровий компресор повинен подавати за 1 хв 60 м³ повітря за н. у. при тиску 10 ат; показник політропи стиснення дорівнює 1,56. Початковий стан повітря: тиск – 0,96 ат і температура – 17 °С. Визначити кількість ступенів компресора, температуру повітря після кожного ступеня, потужність компресора та електромотора при механічному ККД, що дорівнює 0,75. Визначити також ступінь стиснення для усіх ступенів при їх рівномірному навантаженні (умова рівності робіт ступенів компресора). Роботу компресора подати в p–v- і T–s-координатах.

5.19. Відцентровий компресор повинен протягом години подавати 4000 кг сухого повітря при тиску 22 бар; показник політропи процесу стиснення $n = 1,52$. Початковий стан повітря: $p_1 = 1$ бар і $t_1 = 17$ °С. Визначити кількість ступенів компресора, ступінь стиснення у кожному ступені при однаковій роботі і загальну потужність компресора.

5.20. Осьовий компресор повинен подавати за 1 хв 90 м³ повітря за н. у. при тиску 3 бар; показник політропи стиснення дорівнює 1,55. Початковий стан повітря: тиск – 1 бар та температура – 21 °С. Визначити кількість ступенів компресора, температуру повітря після кожного стиснення, потужність компресора та електромотора при механічному

ККД, що дорівнює 0,75. Ступінь стиснення в одному ступені не перевищує $\pi = 1,32$. Визначити також ступінь стиснення ступенів компресора при їх рівномірному навантаженні (див. задачу 5.17*).

5.21. Поршневий компресор повинен подавати протягом години 30 м^3 повітря при тиску 5 бар та температурі 20°C та $4,0 \text{ м}^3$ повітря при тиску 75 бар і тій же температурі. Визначити кількість ступенів компресора, його потужність, витрату води в холодильнику при її нагріванні на 12°C . Показник політропи стиснення повітря в компресорі $n = 1,25$. Початкові параметри повітря: $p_1 = 1 \text{ бар}$ та $t_1 = 10^\circ\text{C}$.

5.22. Триступеневий поршневий компресор подає аргон при тиску 180 ат, початковий стан аргону в газгольдері: тиск – 1,5 бар і температура – 12°C . Показник політропи в усіх компресорних ступенях $n = 1,32$. У холодильниках аргон охолоджується до початкової температури 12°C . Ступінь стиснення в усіх ступенях однакова, годинна витрата аргону становить 240 кг. Вода в холодильнику нагрівається на 11°C , в оболонці циліндрів – на 8°C . Визначити: 1) ступінь стиснення в ступенях компресора; 2) параметри аргону перед входом у холодильники; 3) параметри аргону на виході із компресора; 4) роботу ступенів компресора та їх потужність; 5) витрату охолоджувальної води в рубашках циліндрів і в холодильниках; 6) потужність одноступінчастого компресора тієї ж продуктивності; 7) параметри аргону на виході у разі одноступінчастого компресора тієї ж продуктивності; 8) економію електроенергії при переході на триступінчасте стиснення з проміжним охолодженням. Роботу триступеневого компресора подати в p – v - і T – s -координатах.

5.23. Визначити годинну продуктивність за н. у. одноступінчастого неоохолоджуваного поршневого компресора $V_h, \text{ м}^3/\text{год}$, а також повний об'єм циліндра $V, \text{ дм}^3$, якщо відомі: параметри повітря на вході $p_1 = 1,5 \text{ бар}$ і $t_1 = 22^\circ\text{C}$, ступінь підвищення тиску $\pi = 6$, ефективний ККД $\eta = 0,7$, частота обертання вала $n = 300 \text{ об/хв}$, потужність на привід компресора $N = 54 \text{ кВт}$, об'ємний коефіцієнт наповнення циліндра $\varepsilon_v = 0,87$ ($\varepsilon_v = (V_{\text{НМТ}} - V_0)/V_h$, де V_h – робочий об'єм циліндра, $V_{\text{НМТ}}$ – об'єм циліндра в нижній «мертвій» точці, V_0 – об'єм розширеного на момент початку всмоктування повітря, що знаходиться у шкідливому об'ємі циліндра).

Тема 6

ПРОЦЕСИ ВИТІКАННЯ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

6.1*. Повітря, що має температуру 27 °С, по трубці діаметром 10 мм перетікає з резервуара з постійним тиском 1,3 ат в інший, розташований поруч, з постійним тиском 1,0 ат. Визначити швидкість витікання повітря, температуру його при переході в другий резервуар і кількість повітря, що перетекло за 1 хвилину.

Розв'язання. Насамперед визначимо, який встановлюється режим витікання повітря – дозвуковий, звуковий або надзвуковий. Наявний перепад тиску

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{1,3} = 0,769,$$

критичний перепад тиску повітря ($k = 1,4$)

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{2,4} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 0,528,$$

$$\beta > \beta_{кр},$$

отже, режим течії – дозвуковий. Швидкість витікання визначається різницею ентальпій входу та виходу:

$$w = \sqrt{2(i_1 - i_2)} = \sqrt{2c_p (T_1 - T_2)} = \sqrt{2c_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)}.$$

В адіабатичному процесі тиск і температури пов'язані залежністю

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ отже,}$$

$$w_2 = \sqrt{2c_p T_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} = \sqrt{2 \cdot 1005 \cdot 300 \left(1 - \left(\frac{1}{1,3} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right)} = 208,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Температура повітря під час переходу в другий резервуар

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 300 \cdot \left(\frac{1}{1,3} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 278,3 \text{ К} = 5,3 \text{ °С}.$$

Густина повітря під час переходу в другий резервуар

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{1,0 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 278,3} = 1,227 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Секундна витрата повітря через трубку діаметром 0,01 м

$$G = \rho w F = \frac{\pi d^2}{4} \rho w = \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} 1,227 \cdot 208,7 = 0,020 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Кількість повітря, що перетекло по трубці за 1 хвилину з одного резервуара в інший, буде в 60 разів більше:

$$m = 60G = 60 \cdot 0,020 = 1,2 \text{ кг/хв.}$$

6.2*. Попереднє завдання вирішити з урахуванням коефіцієнта швидкості $\varphi = 0,9$ та коефіцієнта звуження струменя $\alpha = 0,85$.

Розв'язання. З урахуванням втрат на тертя швидкість повітря на вході до другого резервуару

$$w_{2\text{тер}} = \varphi w_2 = 0,9 \cdot 208,7 = 187,8 \text{ м/с.}$$

Температура та густина практично не зміняться. Більш точно температуру T_2 можна визначити, знаючи швидкість повітря та температуру гальмування $T^* = T_1$. За законом збереження повної ентальпії

$$i^* = i + \frac{w^2}{2},$$

звідки

$$T_{2\text{тер}} = T^* - \frac{w_2^2}{2c_p} = 300 - \frac{187,8^2}{2 \cdot 1005} = 282,5 \text{ К} = 9,5 \text{ }^\circ\text{С}.$$

(Порівняно з ідеальним випадком температура виявилася вищою на $4,2 \text{ }^\circ\text{С}$, див. задачу 6.1*).

Густина повітря

$$\rho_{2\text{тер}} = \frac{P_2}{RT_{2\text{тер}}} = \frac{1,0 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 282,5} = 1,209 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Секундна витрата повітря з урахуванням коефіцієнта звуження струменя α

$$\begin{aligned} G_{\text{тер}} &= \rho_{2\text{тер}} w_2 (\alpha F) = \frac{\pi d^2}{4} \alpha \rho_{2\text{тер}} w_2 = \\ &= 1,209 \cdot 187,8 \cdot 0,85 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} = 0,015 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \end{aligned}$$

тоді кількість повітря, що перетекло за 1 хвилину,

$$m_{\text{тер}} = 60G_{\text{тер}} = 60 \cdot 0,015 = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{хв}}.$$

Коефіцієнт витрати

$$\mu = \frac{m_{\text{тер}}}{m_{\text{ід}}} = \frac{0,9}{1,2} = 0,75.$$

Порівняно з попереднім розв'язанням задачі витрата повітря по трубці зменшилася на 25 %.

6.3*. Повітря, що має температуру $27 \text{ }^\circ\text{С}$, по трубці діаметром 10 мм перетікає з резервуара з постійним тиском 1,3 ат в інший, розташований поруч, з постійним тиском 0,5 ат. Визначити швидкість витікання повітря, температуру його при переході в другий резервуар і кількість повітря, що перетекло за 1 хвилину.

Розв'язання. Як і в задачі 6.1*, визначимо, який встановлюється режим витікання повітря – дозвуковий, звуковий чи надзвуковий. Наявний перепад тисків являє собою відношення тисків у резервуарах:

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,5}{1,3} = 0,385,$$

критичний перепад тиску для повітря ($k = 1,4$)

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{2,4} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 0,528,$$

$$\beta < \beta_{кр}.$$

Маємо закритичний перепад тиску, достатній для розгону повітря до надзвукової швидкості, але оскільки трубка, що з'єднує резервуари, циліндрична (не сопло Лавалля), встановиться критичний режим течії.

На кінці трубки створиться критичний тиск, що відрізняється від тиску в другому резервуарі, який дорівнює 0,5 ат:

$$p_{кр} = \beta_{кр} p_1 = 0,528 \cdot 1,3 = 0,687 \text{ ат} = 0,673 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Температура повітря при переході в другий резервуар дорівнює критичній

$$T_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right) T_1 = \frac{2}{2,4} \cdot 300 = 250 \text{ К} = -23^\circ \text{С}.$$

Густина повітря під час переходу в другий резервуар

$$\rho_{кр} = \frac{p_{кр}}{RT_{кр}} = \frac{0,673 \cdot 10^5}{287 \cdot 250} = 0,940 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

інакше її можна визначити як

$$\rho_{кр} = \rho_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{p_1}{RT_1} \left(\frac{2}{2,4} \right)^{\frac{1}{0,4}} = \frac{1,3 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 300} 0,634 = 0,938 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

або
$$\rho_{кр} = \rho_1 \left(\frac{p_{кр}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{p_1}{RT_1} (\beta_{кр})^{\frac{1}{1,4}} = \frac{1,3 \cdot 0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 300} 0,528^{\frac{1}{1,4}} = 0,938 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Швидкість витікання можна знайти за формулою

$$w_2 = \sqrt{2(i_1 - i_{кр})} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_{кр})} = \sqrt{2 \cdot 1005 \cdot (300 - 250)} = 317 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

або за виразом для критичної швидкості

$$w_2 = w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} 287 \cdot 300} = 316,9 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

або за формулою для місцевої швидкості звуку

$$w_2 = w_{кр} = \sqrt{kRT_{кр}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 250} = 316,9 \frac{м}{с}.$$

Секундна витрата повітря через трубку заданого діаметра

$$G_{кр} = \rho_{кр} w_{кр} F = \rho_{кр} w_{кр} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot 0,940 \cdot 317 = 0,0234 \frac{кг}{с}.$$

Кількість повітря, що перетекло по трубці за 1 хвилину з одного резервуара в інший, буде в 60 разів більше:

$$m_{кр} = 60 G_{кр} = 60 \cdot 0,0234 = 1,4 \text{ кг/хв.}$$

6.4*. Повітря з початковою швидкістю 240 м/с при тиску $p_1 = 0,2$ МПа і температурі $t_1 = 200$ °С витікає через сопло, що звужується, в середовище з тиском $p_{атм} = 0,15$ МПа. Площа вихідного перерізу $f_2 = 1000 \text{ мм}^2$. Визначити швидкість витікання повітря, витрату та термодинамічні параметри на зрізі сопла. Коефіцієнт швидкості взяти $\varphi = 1$. На скільки відсотків зменшиться теоретична швидкість витікання, якщо не враховувати початкову швидкість?

Розв'язання. Визначимо параметри гальмування на вході в сопло. Температура гальмування

$$T^* = T_1 + \frac{w_1^2}{2c_p} = (200 + 273) + \frac{240^2}{2 \cdot 1005} = 473 + 28,7 = 501,7 \text{ К}.$$

Тиск гальмування знайдемо за формулою

$$\begin{aligned} p^* &= p_1 + \frac{\rho_1 w_1^2}{2} = p_1 + \frac{p_1 w_1^2}{2RT_1} = p_1 \left(1 + \frac{w_1^2}{2RT_1} \right) = \\ &= 0,2 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{240^2}{2 \cdot 287 \cdot 473} \right) = 0,2 \cdot 10^6 \cdot 1,212 = 0,2424 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Інакше тиск гальмування можна знайти з рівняння адиабати

$$\frac{p^*}{p_1} = \left(\frac{T^*}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

звідки

$$p^* = p_1 \left(\frac{T^*}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,2 \cdot 10^6 \left(\frac{501,7}{473} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 0,2 \cdot 10^6 \cdot 1,229 = 0,2458 \text{ МПа}.$$

Наявний перепад тисків $\beta = \frac{p_2}{p^*} = \frac{0,15}{0,2458} = 0,610$, критичний перепад тиску для повітря ($k = 1,4$)

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,5283,$$

$$\beta > \beta_{кр}.$$

Отже, витікання є дозвуковим і тиск на зрізі сопла дорівнює тиску навколишнього середовища:

$$p_2 = p_{атм} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Температуру повітря на зрізі сопла знайдемо як

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 473 \left(\frac{0,15}{0,2} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} = 435,7 \text{ К},$$

або

$$T_2 = T^* \left(\frac{p_2}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T^* \beta^{\frac{k-1}{k}} = 501,7 \cdot 0,610^{\frac{0,4}{1,4}} = 435,6 \text{ К}.$$

Густина повітря на зрізі сопла

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{0,15 \cdot 10^6}{287 \cdot 435,6} = 0,8335 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Швидкість витікання знайдемо із закону збереження повної ентальпії енергоізолюваного потоку $\frac{w_1^2}{2} + i_1 = \frac{w_2^2}{2} + i_2 = i^*$:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2(i_1 - i_2)} = \sqrt{w_1^2 + 2c_p(T_1 - T_2)} =$$

$$= \sqrt{240^2 + 2 \cdot 1005 \cdot (473 - 435,6)} = 364,4 \text{ м/с}.$$

Швидкість можна визначити інакше, використовуючи величину повної ентальпії потоку:

$$w_2 = \sqrt{2(i^* - i_2)} = \sqrt{2c_p(T^* - T_2)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 1005 \cdot (501,7 - 435,6)} = 364,5 \text{ м/с}.$$

Нарешті швидкість можна знайти з перепаду тисків β :

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT^* (1 - \beta^{\frac{k-1}{k}})} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{0,4} 287 \cdot 501,7 (1 - 0,610^{\frac{0,4}{1,4}})} = 364,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Витрату повітря знайдемо за відомими параметрами на зрізі сопла:

$$G = \rho_2 w_2 f_2 = 0,8335 \cdot 364,5 \cdot (1000 \cdot 10^{-6}) = 0,304 \text{ кг/с}.$$

Без урахування початкової швидкості w_1 швидкість на зрізі (див. задачу 6.1*)

$$w_{2*} = \sqrt{2c_p T_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} = \sqrt{2 \cdot 1005 \cdot 473 \left(1 - \left(\frac{0,15}{0,2} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right)} = 273,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При цьому похибка розрахунку швидкості потоку становить 24,8 %.

6.5. Охолодження циліндрів двигуна виконують потоком повітря з повітродувки. Повітря витікає з сопел, що звужуються, з вихідним перерізом загальною площею $F = 30 \text{ см}^2$. Параметри повітря перед соплом: $p_0 = 4 \text{ бар}$, $t_0 = 27^\circ \text{C}$. Атмосферний тиск – 1 бар. Визначити швидкість витікання повітря та витрату. Як зміняться швидкість і витрата, якщо замість сопел, що звужуються, будуть сопла Лавалю: 1) з такою ж площею зрізу? 2) із такою ж площею критичного перерізу?

6.6. Попередню задачу вирішити для тиску $p_0 = 1,3 \text{ бар}$, інші параметри вважати незмінними. Порівняння із соплом Лавалю не робити.

6.7. Визначити розміри мінімального та вихідного перерізів сопла Лавалю, якщо тиск повітря на вході в сопло $p_0 = 5 \text{ бар}$, температура $t_0 = 27^\circ \text{C}$, зовнішній тиск $p_{\text{атм}} = 1 \text{ бар}$. Витрата повітря $G = 7200 \text{ кг/год}$. Як зміняться швидкість і витрата, якщо температура повітря на вході в сопло становитиме 327°C ? Як потрібно змінити геометрію сопла (площу критичного перерізу), щоб витрата залишалася незмінною?

6.8. Розрахувати геометрію надзвукової частини сопла Лавалю для продуктів згоряння, якщо витрати дорівнюють 5400 кг/год . Продукти згоряння розглядати як ідеальний газ з показником адіабати $k = 1,29$ та газовою сталою $R = 293 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, початкова температура газів – 2400 K , тиск перед входом у сопло – 20 бар , на виході – 1 бар . Кут конусності сопла взяти $2\beta = 12^\circ$.

6.9. Розрахувати геометрію надзвукової частини сопла Лавалю, визначити швидкість витікання з нього азоту. Витрата азоту – $2,0 \text{ кг/с}$, тиск і температура на вході постійні: $p^0 = 0,85 \text{ МПа}$, $t^0 = 327^\circ \text{C}$, протитиск $p_{\text{атм}} = 0,098 \text{ МПа}$, коефіцієнт швидкості $\varphi = 0,95$, кут розкриття сопла взяти $2\beta = 10^\circ$.

6.10. Розрахувати геометрію надзвукової частини сопла Лавалю, визначити швидкість витікання з нього криптону. Витрата криптону – $0,72 \text{ кг/с}$, тиск і температура на вході постійні: $p^0 = 2 \text{ бар}$, $t^0 = 127^\circ \text{C}$, протитиск $p_{\text{пт}} = 0,1 \text{ бар}$, коефіцієнт швидкості $\varphi = 0,97$, кут розкриття сопла взяти $2\beta = 12^\circ$.

6.11. Визначити швидкість витікання і витрату аргону, який витікає з балона через сопло, що звужується, в середовищі з тиском $0,1 \text{ МПа}$.

Тиск аргону в балоні $p^0 = 0,25$ МПа, температура $t^0 = 25$ °С. Площа вихідного перерізу сопла $F_{\text{сопл}} = 2$ см². Як зміняться швидкість витікання та витрата, якщо в балоні при тих же параметрах буде водень? Коефіцієнт швидкості в обох випадках взяти $\varphi = 1$.

6.12. У вакуумній сушарці підтримується розрядження 300 мм рт. ст., зовнішній атмосферний тиск становить 750 мм рт. ст., температура атмосферного повітря – 17 °С. Визначити кількість повітря, що надходить у сушарку зовні за 1 годину через щілину площею 4 мм². Взяти коефіцієнт швидкості $\varphi = 0,75$ і коефіцієнт звуження струменя $\alpha = 0,80$.

6.13. У стінці резервуара, з якого повітряним насосом безперервно відкачується повітря, циліндричним свердлом діаметром $d = 6$ мм просвердлено отвір, завдяки чому повітря з атмосфери втікає в резервуар. Визначити швидкість і кількість повітря, що втікає за 1 хв, якщо в резервуарі підтримується розрядження 60 кПа, атмосферний тиск становить 100 кПа і температура 18 °С, коефіцієнти звуження струменя і витрати просвердленого отвору дорівнюють відповідно 0,82 і 0,70.

6.14. У середовище з протитиском 2,5 ат з резервуара виходить газ під тиском 4 ат і при температурі 23 °С через сопло, що звужується, з площею зрізу 20 мм². Визначити хвилинну витрату, якщо в резервуарі знаходиться один із газів: гелій He , азот N_2 , вуглекислий газ CO_2 . Втратами на тертя знехтувати.

6.15. Розрахувати площу вихідного зрізу конфузорного насадка для випуску в середовище з протитиском 750 мм рт. ст. вуглекислого газу CO_2 та окису вуглецю CO у кількості 300 кг/год. Надлишковий тиск у резервуарах становить 500 мм рт. ст., температура обох газів дорівнює +70 °С. Втратами на тертя знехтувати.

6.16. Розрахувати кількість аргону, що витікає за 1 хв із конфузорного насадка в атмосферу під тиском 1 бар, якщо постійний тиск у резервуарі становить 2,0; 2,5; 3,0 бар. Температура аргону в резервуарі – 27 °С, діаметр зрізу насадка – 6 мм. Втратами на тертя знехтувати.

6.17. Розрахувати кількість повітря, що витікає за 1 год із циліндричного насадка в атмосферу з протитиском 1 бар, якщо постійний тиск у резервуарі становить 1,2; 1,5; 2,0; 4,0 бар. Температура повітря в резервуарі дорівнює 15 °С, діаметр циліндричного насадка – 10 мм. Взяти коефіцієнт швидкості $\varphi = 0,95$ та коефіцієнт звуження струменя $\alpha = 0,80$.

6.18. Розрахувати витрати продуктів згоряння ($k = 1,29$), які витікають за 1 с з конфузорного насадка в навколишнє середовище з протитиском 1 бар, якщо постійний тиск на вході в насадок становить 1,5; 1,9; 2,3 бар. Температура продуктів згоряння на вході у насадок – 427 °С, діаметр зрізу насадка – 8 мм. Втратами на тертя знехтувати.

6.19. В атмосферу з протитиском 1 ат з резервуара виходить газ з повним тиском 1,5 ат і температурою 30 °С через сопло, що звужується, з площею зрізу 8 мм². Визначити хвилинну витрату, якщо в резервуарі знаходиться один із таких газів: аргон Ar ($k = 1,67$), водень H_2 ($k = 1,4$), вуглекислий газ CO_2 ($k = 1,32$), метан CH_4 ($k = 1,23$). Втра- тами на тертя знехтувати.

6.20. Розрахувати площу вихідного зрізу конфузорного насадка для випуску в навколишнє середовище з протитиском 750 мм рт. ст. етану C_2H_6 та пропану C_3H_8 у кількості 200 кг/год. Надлишковий тиск у резервуарах $p_{\text{над}} = 250$ мм рт. ст., температура обох газів $t_0 = 27$ °С, коефі- цієнт швидкості в обох випадках вважати $\varphi = 0,95$.

6.21. Повітря з початковою швидкістю 80 м/с при тиску $p_1 = 0,12$ МПа і температурі $t_1 = 60$ °С витікає через сопло, що звужу- ється, в навколишнє середовище при тиску $p_{\text{атм}} = 0,1$ МПа. Площа ви- хідного перерізу $f_2 = 40$ мм². Визначити швидкість витікання повітря, витрату та термодинамічні параметри на зрізі сопла. Коефіцієнт швид- кості взяти $\varphi = 0,97$.

6.22. На скільки відсотків збільшиться теоретична швидкість виті- кання повітря із сопла Лавалля, якщо врахувати початкову швидкість на вході в сопло, яка дорівнює 150 м/с? Параметри повітря на вході у со- пло: $p_1 = 2,5$ бар, $t_1 = 300$ °С, протитиск $p_{\text{атм}} = 1$ бар. У соплі викорис- тано весь перепад тиску (тобто статичний тиск на зрізі сопла дорівнює тиску навколишнього середовища).

6.23*. Стиснений кисень з резервуара об'ємом $V = 0,4$ м³ при поча-ткових тиску $p_1 = 3,5$ МПа і температурі $t_1 = 27$ °С витікає в окиснюва- льну камеру, де тиск є постійним: $p_2 = 0,12$ МПа. Витікання відбуває-ться через сполучний патрубок площею $f = 8$ мм². Коефіцієнт витрати $\mu = 0,65$. Через який час тиск у резервуарі знизиться до $p = 0,3$ МПа? Розрахунок зробити для двох випадків:

- 1) стан кисню в балоні змінюється за ізотермою;
- 2) стан кисню в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

Розв'язання. По-перше, визначимо зв'язок між масою кисню в ре- зервуарі m та її витратою G , тобто кількістю кисню, яка щомиті залишає цей резервуар. Очевидно, обидві ці величини будуть змінними у часі. Тому їх зв'язок запишемо у диференціальному вигляді

$$dm = -Gd\tau$$

(символом τ тут позначається час, щоб не виникала плутанина з тем- пературою t).

З іншого боку,

$$dm = d(\rho V) = Vd\rho,$$

де $V, \text{м}^3$, – об'єм резервуара, $V = \text{const}$;
 $\rho, \text{кг/м}^3$, – густина кисню у резервуарі, $\rho = \text{var}$.

Витрата кількості кисню

$$G = \mu(\rho w f),$$

де $f, \text{м}^2$ – площа сполучного патрубку, $f = \text{const}$;
 μ – заданий коефіцієнт витрати;
 $w, \text{м/с}$ – швидкість витікання кисню.

Після підстановки маси у вихідне рівняння балансу маси отримаємо

$$V d\rho = -\mu \rho w f d\tau,$$

звідки

$$d\tau = -\frac{V}{\mu f \cdot w} \frac{d\rho}{\rho}.$$

По-друге, визначимо режим витікання. В кінцевий момент часу тиск у резервуарі досягає величини $p = 0,3 \text{ МПа}$, тиск в окиснювальній камері незмінний і становить $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$, відношення тисків

$$\beta = \frac{p_2}{p} = \frac{0,12}{0,3} = 0,4,$$

критичне відношення тисків

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 0,528,$$

$$\beta > \beta_{кр},$$

отже, режим витікання – критичний протягом усього процесу. Критична швидкість однозначно визначається температурою T кисню у резервуарі:

$$w = w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT},$$

і у разі постійної температури швидкість витікання також буде постійною.

1. У першому випадку задано ізотермічний закон змінення параметрів у резервуарі, отже, $T = T_1 = \text{const}$, $w_{кр} = \text{const}$ і $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dp}{p}$ (густина ρ пропорційна тиску p). Рівняння балансу маси набуде вигляду

$$d\tau = -\frac{V}{\mu f \cdot w_{кр}} \frac{dp}{p}.$$

Після інтегрування та підстановки границь інтегрування отримаємо

$$\begin{aligned}
\int_0^\tau d\tau &= -\frac{V}{\mu f \cdot w_{kp}} \int_{p_1}^p \frac{dp}{p}; \\
\tau|_0^\tau &= -\frac{V}{\mu f \cdot w_{kp}} \ln p|_{p_1}^p; \\
\tau|_0^\tau &= \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp}} \ln p|_p^{p_1}; \\
\tau &= \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp}} \ln \frac{p_1}{p} = \frac{V}{\mu f \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}} \ln \frac{p_1}{p} = \\
&= \frac{0,4}{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \cdot \frac{8314}{32} \cdot 300}} \ln \frac{3,5}{0,3} = 627 \text{ с} = 10 \text{ хв } 27 \text{ с.}
\end{aligned}$$

2. У другому випадку задано політропний закон змінення параметрів

у резервуарі, отже, $\frac{T}{T_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{n-1}$, $\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$ і

$$w = w_{kp} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{n-1}} = w_{kp_1} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\frac{n-1}{2}},$$

де w_{kp_1} , м/с, – швидкість витікання з резервуара у початковий момент часу.

Рівняння балансу маси набуде вигляду

$$d\tau = -\frac{V}{\mu f \cdot w_{kp_1} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\frac{n-1}{2}}} \frac{d\rho}{\rho}.$$

Для подальших перетворень зручно замість змінної ρ використати безрозмірну змінну (ρ/ρ_1) :

$$d\tau = -\frac{V}{\mu f \cdot w_{kp_1} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\frac{n-1}{2}}} \frac{d\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)}{\frac{\rho}{\rho_1}};$$

$$d\tau = - \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{\frac{n+1}{2}}} d\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right);$$

$$d\tau = - \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1}} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{-\frac{n+1}{2}} d\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right).$$

Після інтегрування та підстановки границь інтегрування отримаємо

$$\int_0^\tau d\tau = - \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1}} \int_1^{\frac{\rho}{\rho_1}} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{-\frac{n+1}{2}} d\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right);$$

$$\tau|_0^\tau = - \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1}} \frac{1}{\left(1 - \frac{n+1}{2}\right)} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{1 - \frac{n+1}{2}} \Bigg|_1^{\frac{\rho}{\rho_1}};$$

$$\tau|_0^\tau = \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1}} \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{-\frac{n-1}{2}} \Bigg|_1^{\frac{\rho}{\rho_1}};$$

$$\tau = \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f \cdot w_{kp1}} \left[\left(\frac{\rho_1}{\rho}\right)^{\frac{n-1}{2}} - 1 \right].$$

Відношення густин замінимо відношенням тисків. Шуканий час витікання

$$\tau = \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f w_{kp1}} \left[\left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] = \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1} \left[\left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right];$$

$$\tau = \frac{2}{1,25-1} \cdot \frac{0,4}{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1}} \cdot \frac{8314}{32} \cdot 300} \left[\left(\frac{3,5}{0,3}\right)^{\frac{1,25-1}{2 \cdot 1,25}} - 1 \right] =$$

$$= 568 \text{ с} = 9 \text{ хв } 28 \text{ с.}$$

6.24*. Стиснений кисень з резервуара об'ємом $V = 0,4 \text{ м}^3$ при початковому тиску $p_1 = 3,5 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ витікає в окиснювальну камеру, де тиск є постійним і становить $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$. Витікання відбувається через сполучний патрубок площею $f = 8 \text{ мм}^2$. Коефіцієнт витрати $\mu = 0,65$. Яким буде тиск у резервуарі через 5 хв? Розрахунок зробити для двох випадків:

- 1) стан кисню в балоні змінюється за ізотермою;
- 2) стан кисню в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

Розв'язання. Користуючись формулами попередньої задачі, визначимо для першого та другого випадків час критичного режиму витікання. Критичний режим здійснюватиметься до тих пір, поки тиск в резервуарі не буде в $1/\beta_{кр}$ більше, ніж в окиснювальній камері ($p \geq p_2/\beta_{кр}$).

Для ізотермічного закону змінення параметрів усередині резервуара

$$\begin{aligned}\tau_{кр} &= \frac{V}{\mu f w_{кр}} \ln \frac{p_1}{p} = \frac{V}{\mu f \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1} \ln \frac{p_1 \beta_{кр}}{p_2} = \\ &= \frac{0,4}{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \frac{8314}{32}} 300} \ln \frac{3,5 \cdot 0,5283}{0,12} = 698 \text{ с} = 11 \text{ хв } 38 \text{ с}.\end{aligned}$$

Для політропного закону змінення параметрів усередині резервуара

$$\begin{aligned}\tau_{кр} &= \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f w_{кр1}} \left[\left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] = \frac{2}{n-1} \frac{V}{\mu f \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1} \left[\left(\frac{p_1 \beta_{кр}}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right]; \\ \tau_{кр} &= \frac{2}{1,25-1} \frac{0,4}{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \frac{8314}{32}} \cdot 300} \left[\left(\frac{3,5 \cdot 0,5283}{0,12} \right)^{\frac{1,25-1}{2 \cdot 1,25}} - 1 \right] = \\ \tau_{кр} &= 642 \text{ с} = 10 \text{ хв } 42 \text{ с}.\end{aligned}$$

В обох випадках протягом перших п'яти хвилин буде критичний режим витікання.

Тиск можна знайти з тих же диференціальних рівнянь, що зв'язують p і τ , які були отримані в попередній задачі (див. задачу 6.23*).

Для ізотермічного закону змінення параметрів усередині резервуара

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu f w_{\text{кр}}}{V} d\tau.$$

Після інтегрування з підстановкою границь інтегрування отримаємо вирази для знаходження шуканого тиску:

$$\int_{p_1}^p \frac{dp}{p} = -\frac{\mu f w_{\text{кр}}}{V} \int_0^\tau d\tau;$$

$$\ln p|_{p_1}^p = -\frac{\mu f w_{\text{кр}}}{V} \tau|_0^\tau;$$

$$\ln \frac{p}{p_1} = -\frac{\mu f w_{\text{кр}}}{V} \tau;$$

$$\begin{aligned} p &= p_1 \exp\left(-\frac{\mu f w_{\text{кр}}}{V} \tau\right) = p_1 \exp\left(-\frac{\mu f}{V} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1 \tau\right) = \\ &= 3,5 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{0,4} \sqrt{\frac{2,88314}{2,4 \cdot 32}} 300 \cdot 300\right) = 1,080 \cdot 10^6 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Для політропного закону шуканий тиск можна знайти як

$$\frac{p}{p_1} = \left[\frac{n-1}{2} \frac{\mu f w_{\text{кр}1}}{V} \tau + 1 \right]^{-\frac{2n}{n-1}} = \left[\frac{n-1}{2} \frac{\mu f}{V} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1 \tau + 1 \right]^{-\frac{2n}{n-1}};$$

$$p = \frac{p_1}{\left[\frac{n-1}{2} \frac{\mu f w_{\text{кр}1}}{V} \tau + 1 \right]^{\frac{2n}{n-1}}} = \frac{p_1}{\left[\frac{n-1}{2} \frac{\mu f}{V} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1 \tau + 1 \right]^{\frac{2n}{n-1}}},$$

$$p = \frac{3,5 \cdot 10^6}{\left[\frac{1,25-1}{2} \cdot \frac{0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 301,55}{0,4} 300 + 1 \right]^{\frac{2 \cdot 1,25}{1,25-1}}} = 0,888 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

6.25. Повітря з балона через вентиль із прохідним перерізом площею $f = 10 \text{ мм}^2$ витікає в атмосферу при тиску $p_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити тиск p , який установиться в балоні через 4 хв після початку витікання, якщо відомі початкові параметри: тиск повітря $p_1 = 4,5 \text{ МПа}$, температура $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Об'єм балона $V = 500 \text{ дм}^3$. Процес витікання

вважати ізоентропічним, а температуру повітря в балоні – постійною (внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем).

6.26. Повітря витікає в атмосферу з резервуара об'ємом $V = 5 \text{ м}^3$. Атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$, початкові параметри повітря в резервуарі: $p_1 = 3,5 \text{ МПа}$ та $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, площа перерізу вихідного отвору $f = 4 \text{ мм}^2$. Визначити час, необхідний для зниження тиску в резервуарі до: 1) $p = 2,5 \text{ МПа}$, 2) $p = 1,5 \text{ МПа}$ і 3) $p = 0,5 \text{ МПа}$. Процес змінення стану повітря у резервуарі вважати ізотермічним, процес витікання – ізоентропічним.

6.27. Стиснений кисень з резервуара об'ємом $V = 0,6 \text{ м}^3$ при початковому тиску $p_1 = 3 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ витікає в окиснювальну камеру, де тиск постійний і становить $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$. Витікання відбувається через отвір діаметром $d = 10 \text{ мм}$. Коефіцієнт витрати $\mu = 0,7$. Через який час тиск у резервуарі знизиться до $p = 0,3 \text{ МПа}$? Розрахунок зробити для двох випадків:

1) стан кисню в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,28$;

2) стан кисню в балоні змінюється за ізотермою.

6.28. У пусковому балоні двигуна дизеля об'ємом 60 дм^3 знаходиться стиснене повітря при тиску 60 бар і температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$. При запуску двигуна повітря витікає через отвір діаметром $d = 6 \text{ мм}$ у циліндр, де тиск $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити час, необхідний для спадання тиску до $p = 1,5 \text{ МПа}$, температуру і густину повітря при цьому тиску. Тиск повітря в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

6.29. Стиснений азот з балона об'ємом $V = 0,8 \text{ м}^3$ при початковому тиску $p_1 = 1,8 \text{ МПа}$ та температурі $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ витікає через вентиль в атмосферу з тиском $p_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити діаметр отвору d , через який відбувається витікання, якщо відомо, що через 3 хвилини тиск у балоні знизився в 2 рази. Якими будуть тиск і температура азоту в балоні через 6 хвилин? Коефіцієнт витрати $\mu = 0,7$. Розрахунок зробити для двох випадків:

1) стан азоту в балоні змінюється за ізотермою;

2) стан азоту в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

6.30. Порівняти швидкості витікання повітря з резервуара об'ємом 3 м^3 через отвір діаметром 2 мм : у початковий момент, у момент зниження тиску в резервуарі в 4 рази та в момент переходу на дозвукову швидкість. Підрахувати також час до моменту досягнення заданого тиску та переходу на дозвукову швидкість. Початкові параметри повітря в резервуарі: тиск – 10 бар , температура $+80 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – 1 бар , показник політропи змінення стану повітря всередині резервуара

$n = 1,2$, коефіцієнт швидкості для отвору $\alpha = 0,9$ і коефіцієнт витрати $\mu = 0,7$.

6.31. Розрахувати об'єм резервуара, що забезпечує критичний режим витікання азоту протягом 12 хв через вентиль з прохідним перерізом площею $f = 5 \text{ мм}^2$. Початкові параметри азоту в резервуарі: тиск – 24 бар, температура – $+27^\circ\text{C}$, атмосферний тиск – 1 бар, коефіцієнт швидкості для отвору $\alpha = 0,9$ і коефіцієнт витрати $\mu = 0,7$. Розрахунок зробити для двох випадків:

1) стан азоту в балоні змінюється за ізотермою;

2) стан азоту в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

6.32. Через 2 хв після початку витікання манометричний тиск повітря в балоні становив 80 бар. Знайти початкове значення тиску в балоні, якщо атмосферний тиск – 1 бар, атмосферна температура – $+17^\circ\text{C}$. Об'єм балона $V = 0,5 \text{ м}^3$, площа прохідного перерізу вентиля $f = 4 \text{ мм}^2$, коефіцієнт швидкості для отвору $\alpha = 0,85$ і коефіцієнт витрати $\mu = 0,65$. Початкова температура повітря у балоні дорівнює атмосферній. Розрахунок зробити для двох випадків: 1) стан повітря в балоні змінюється за ізотермою; 2) стан повітря в балоні змінюється за політропою з показником $n = 1,25$.

Тема 7

ЦИКЛИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Під розрахунком циклу розуміють знаходження термічних параметрів (T, p, v) у кожній точці циклу, визначення підведеної та відведеної теплоти, роботи циклу та його термічного ККД.

7.1. Термічний ККД циклу ДВЗ $\eta = 0,4$. Визначити теплоту, що відводиться в циклі, і роботу циклу, якщо теплота, що відводиться, становить 100 кДж за цикл.

7.2. Визначити ККД автомобільного двигуна потужністю 60 к.с., якщо витрата палива становить 7,2 кг/год при його теплотворній здатності 10^3 ккал/кг (див. таблицю А.2).

7.3*. Для теоретичного циклу ГТУ із підведенням теплоти при постійному тиску визначити:

- параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках циклу;
- підведену та відведену теплоту, роботу та термічний ККД циклу;
- теоретичну потужність ГТУ при заданій витраті повітря

$G = 25$ кг/с, якщо початковий тиск $p_1 = 0,1$ МПа, початкова температура $t_1 = 27$ °С, ступінь підвищення тиску в компресорі $\pi = 6,5$, температура газу перед турбіною $t_3 = 725$ °С.

Зобразити цикл установки на p – v - і T – s -діаграмах.

Теплоємність повітря вважати такою, що не залежить від температури.

Розв'язання. Теплофізичні властивості повітря: молярна маса $\mu_{\text{пов}} = 28,97$ кг/кмоль; газова стала повітря

$$R = \frac{R_0}{\mu_{\text{пов}}} = \frac{8314}{28,97} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

показник адіабати повітря $k = 1,4$; питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{k}{k-1} R = \frac{1,4}{1,4-1} 287 = 1004,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Розрахунок будемо виконувати за питомими параметрами для 1 кг робочого тіла.

І. Розрахунок параметрів робочого тіла в основних точках циклу

Точка 1 – початок адіабатичного стиснення:

– температура $T_1 = 27$ °С = 300 К;

– тиск $p_1 = 0,1$ МПа;

– питомий об'єм

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{0,1 \cdot 10^6} = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

– питому ентропію беремо в початковій точці 1, де вона дорівнює нулю:

$$s_1 = 0 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Точка 2 – кінець адіабатичного стиснення, початок ізобаричного підведення теплоти:

– тиск $p_2 = \pi \cdot p_1 = 6,5 \cdot 0,1 = 0,65 \text{ МПа}$;

– температура $T_2 = T_1 \cdot \pi^{\frac{k-1}{k}} = 300 \cdot 6,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 300 \cdot 1,7071 = 512,13 \text{ К}$;

– питомий об'єм

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 512,13}{0,65 \cdot 10^6} = 0,2261 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

– питома ентропія через ізоентропічність процесу стиснення не змінюється:

$$s_2 = s_1 = 0 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Точка 3 – кінець ізобаричного підведення теплоти, початок адіабатичного розширення:

– тиск $p_3 = p_2 = 0,65 \text{ МПа}$;

– температура $T_3 = t_3 + 273 = 725 + 273 = 998 \text{ К}$;

– питомий об'єм

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{287 \cdot 998}{0,65 \cdot 10^6} = 0,4407 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

– питому ентропію знаходять з урахуванням того, що процес підведення теплоти ізобаричний:

$$s_3 = s_2 + c_p \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 0 + 1004,5 \cdot \ln\left(\frac{998}{512,13}\right) = 670,17 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Точка 4 – кінець адіабатичного розширення, початок ізобаричного відведення теплоти:

– тиск $p_4 = p_1 = 0,1$ МПа;

– температура

$$T_4 = \frac{T_3}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{998}{6,5^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = \frac{998}{1,7071} = 584,61 \text{ К};$$

– питомий об'єм

$$v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{287 \cdot 584,61}{0,1 \cdot 10^6} = 1,6778 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

– *питома ентропія виходячи з ізоентропності процесу розширення не змінюється:*

$$s_4 = s_3 = 670,17 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Результати розрахунків параметрів робочого тіла в основних точках циклу занесемо до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Параметри робочого тіла в основних точках ідеального циклу ГТУ

Точка	$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$s, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
1	300,0	0,10	0,8610	0
2	512,13	0,65	0,2261	0
3	998,0	0,65	0,4407	670,17
4	584,61	0,10	1,6778	670,17

II. Підведена та відведена теплота, робота та термічний ККД циклу

Теплота, що підводиться у процесі 2-3,

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2) = 1004,5(998 - 512,13) = 488054 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 488,054 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теплота, що відводиться у процесі 4-1,

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1) = 1004,5(584,61 - 300) = 285895 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 285,895 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Робота теоретичного циклу дорівнює різниці теплоти, що підводиться і відводиться:

$$l = q_2 - q_1 = 488,054 - 285,895 = 202,159 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{202,159}{488,054} = 0,4142,$$

або

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{6,5^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 1 - \frac{1}{1,7071} = 0,4142.$$

Результат отримано один і той же.

III. Теоретична потужність ГТУ

Теоретична потужність ГТУ N при заданій витраті повітря G визначається виразом

$$N = G \cdot l = 25 \cdot 202,159 = 5053,97 \text{ кВт} = 5,054 \text{ МВт}.$$

IV. Зображення циклу ГТУ у р–v- і Т–s-координатах (рисунки 7.1, 7.2)

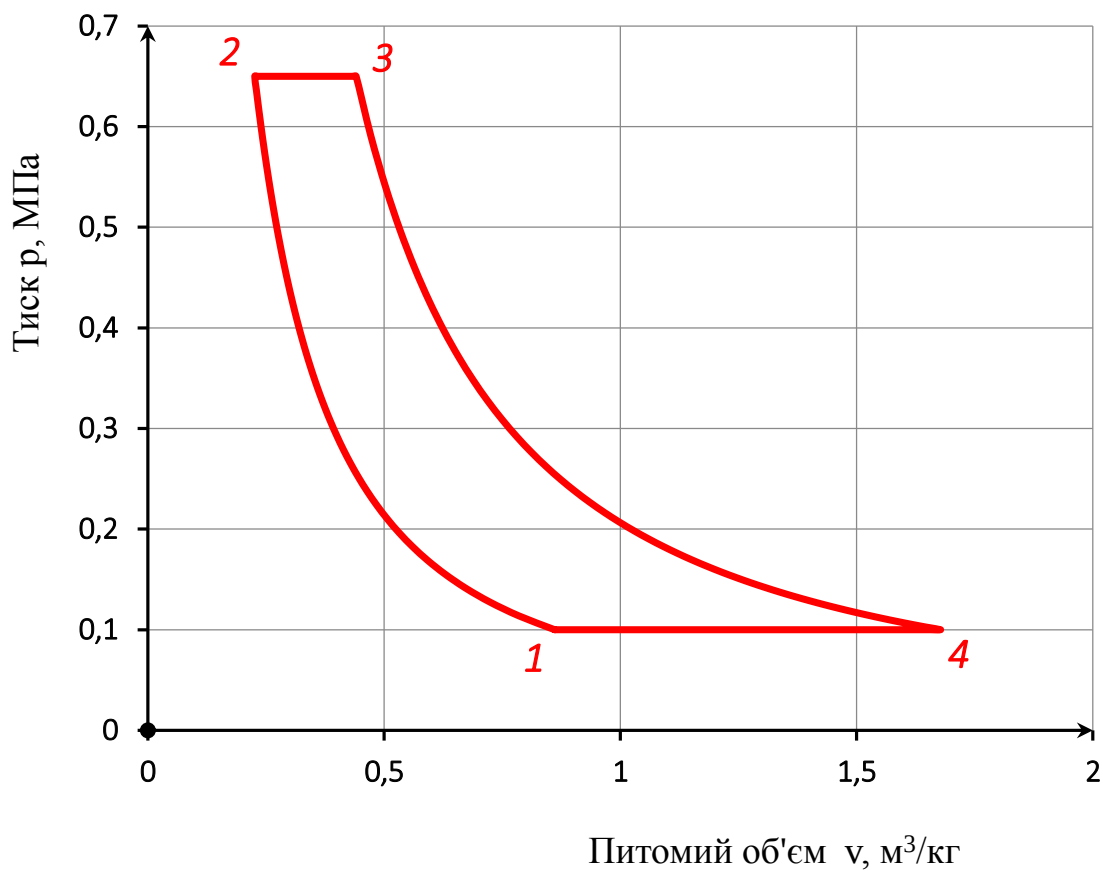


Рисунок 7.1 — Розрахунковий цикл ГТУ на р–v-діаграмі

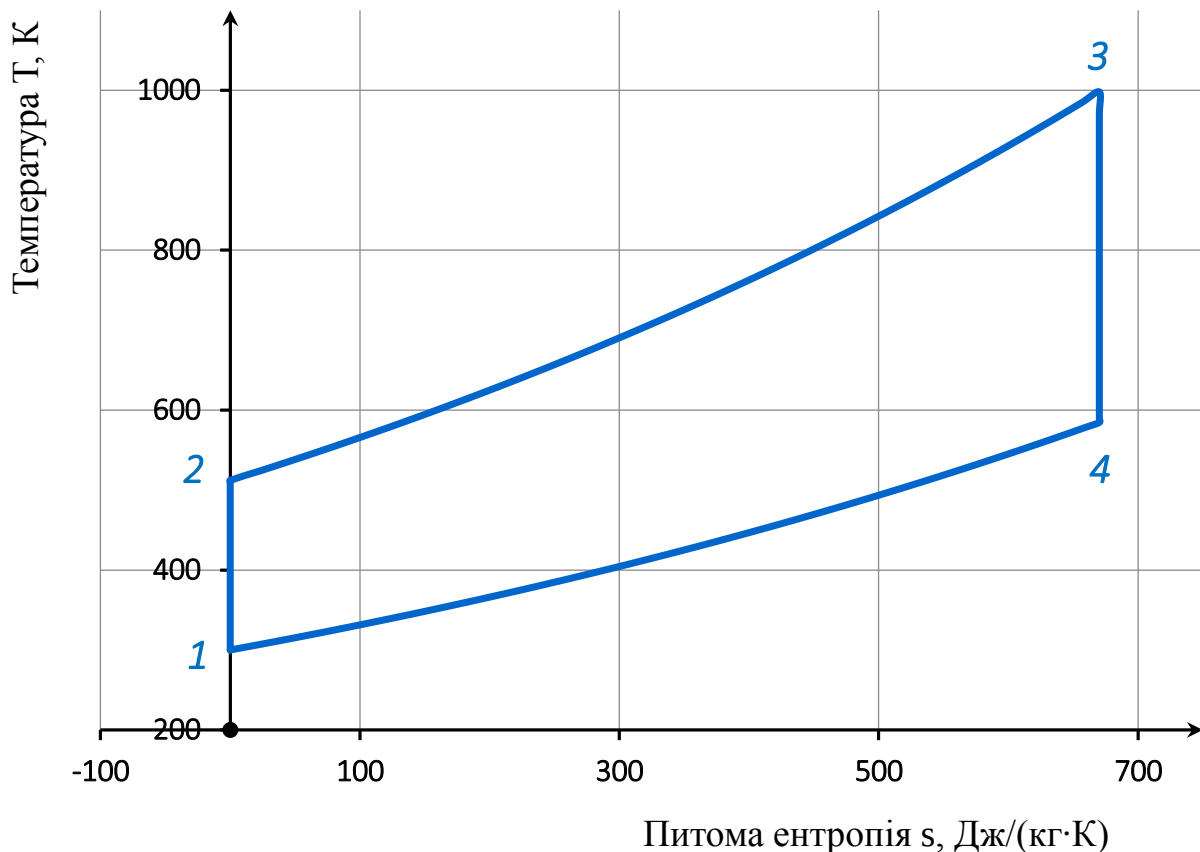


Рисунок 7.2 — Розрахунковий цикл ГТУ на Т–s-діаграмі

7.4. Для теоретичного циклу ГТУ із підведенням теплоти при постійному тиску (цикл Брайтона) визначити: параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках циклу, підведену та відведену теплоту, роботу та термічний ККД циклу, теоретичну потужність ГТУ при заданій витраті повітря G , кг/с, якщо початковий тиск p_1 , бар, початкова температура t_1 , °С, ступінь підвищення тиску в компресорі $\pi_k = p_2/p_1$, ступінь попереднього розширення $\rho = v_3/v_2$ (таблиця 7.2).

Зобразити схему та цикл установки на p - v - і T - s -діаграмах.

Робоче тіло – повітря: $R = 0,287$ кДж/(кг · К); $k = 1,4$.

Теплоємність c_p повітря вважати такою, що не залежить від температури.

Таблиця 7.2 — Вихідні дані для розрахунку циклу ГТУ

Номер варіанта	t_1 , °С	p_1 , бар	π_k	ρ	G , кг/с
1	-15	0,90	12	1,90	10
2	-5	0,98	10	1,85	15
3	0	1,00	9	1,80	20
4	10	1,02	8	1,90	25
5	15	1,05	7	2,00	30

7.5. Попереднє завдання повторити за умови політропічного стиснення у компресорі та політропічного розширення у турбіні із заданими показниками політропи n_1 і n_2 відповідно (таблиця 7.3).

Таблиця 7.3 — Вихідні дані для розрахунку циклу ГТУ

Номер варіанта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	π_k	ρ	n_1	n_2	$G, \text{кг/с}$
1	-10	0,95	14	1,80	1,43	1,28	10
2	0	0,98	12	1,85	1,45	1,30	15
3	10	1,00	10	1,90	1,46	1,32	20
4	20	1,00	9	1,95	1,48	1,34	25
5	30	1,05	8	2,00	1,50	1,36	30

7.6. Для теоретичного циклу ГТУ із підведенням теплоти при постійному об'ємі (цикл Гемфрі) визначити: параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках циклу, підведену та відведену теплоту, роботу та термічний ККД циклу, теоретичну потужність ГТУ при заданій витраті повітря $G, \text{кг/с}$, якщо початковий тиск $p_1, \text{бар}$, початкова температура $t_1, ^\circ\text{C}$, ступінь підвищення тиску в компресорі π_k , температура газу перед турбіною $t_3, ^\circ\text{C}$ (таблиця 7.4).

Зобразити схему та цикл установки на p - v - і T - s -діаграмах.

Робоче тіло – повітря: $R = 0,287 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$; $k = 1,4$.

Теплосмність c_p повітря вважати такою, що не залежить від температури.

Таблиця 7.4 — Вихідні дані для розрахунку циклу ГТУ

Номер варіанта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	π_k	$t_3, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/с}$
1	-15	0,90	10	860	10
2	-5	0,98	9	820	15
3	0	1,00	8	1,38	20
4	10	1,02	7	1,42	25
5	15	1,05	6	1,43	30

7.7*. Виконати термодинамічний розрахунок поршневого двигуна, що працює за циклом Дизеля, якщо початковий тиск $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, початкова температура стиснення $t_1 = 20 ^\circ\text{C}$; ступінь стиснення $\varepsilon = v_1/v_2 = 15$; кількість тепла, що підводиться у циклі, $q_1 = 800 \text{ кДж/кг}$. Визначити параметри стану у характерних точках циклу. Ентальпію (h), внутрішню енергію (u) визначити щодо стану газу при $T_0 = 0 \text{ К}$, ентропію (s) – щодо стану за умов $T_0 = 273 \text{ К}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$. Побудувати цикл у p - v - і T - s -координатах.

Для кожного процесу визначити роботу, кількість підведеного та відведеного тепла, змінення внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Визначити роботу циклу, термічний ККД циклу. Робоче тіло — повітря, маса — 1 кг, газова стала $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, питома ізобарна теплоємність $c_p = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Розв'язання. Процеси стиснення та розширення вважаємо адіабатичними з показником адіабати

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R} = \frac{1,0}{1,0 - 0,287} = 1,4025.$$

Питома ізохорна теплоємність повітря

$$c_v = c_p - R = 1,0 - 0,287 = 0,713 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Оскільки маса газу, що бере участь у циклі, умовно дорівнює 1 кг, всі параметри (об'єм, ентальпію, ентропію, внутрішню енергію, теплоту і роботу) будемо розраховувати як питомі.

I. Розрахунок основних точок циклу Дизеля

Точка 1 – початок адіабатичного стиснення робочого тіла.

Для розрахунку використовуємо термічне та калоричне рівняння стану ідеального газу

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа};$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 20 + 273 = 293 \text{ К};$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,8409 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Питома внутрішня енергія повітря

$$u_1 = u_0 + c_v(T_1 - T_0) = c_v \cdot T_1 = 0,713 \cdot 293 = 208,91 \text{ кДж}/\text{кг},$$

де $u_0 = 0$ при $T_0 = 0 \text{ К}$.

Питома ентальпія повітря

$$h_1 = h_0 + c_p(T_1 - T_0) = c_p \cdot T_1 = 1,0 \cdot 293 = 293 \text{ кДж}/\text{кг},$$

де $h_0 = 0$ при $T_0 = 0 \text{ К}$.

Питома ентропія повітря

$$s_1 = s_0(T_0; p_0) + c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0} = 0 + 1000 \cdot \ln \frac{293}{273} - 287 \cdot \ln \frac{0,1}{0,1} =$$

$$= 70,70 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

де $s_0(T_0; p_0) = 0$ означає той факт, що нульовий рівень ентропії s_0 призначено при температурі $T_0 = 273 \text{ К}$ і тиску $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Точка 2 – кінець адіабатичного стиснення робочого тіла, початок ізобаричного підведення теплоти.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,8409}{15} = 0,0561 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k;$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = p_1 \varepsilon^k = 0,1 \cdot 15^{1,4025} = 4,4617 \text{ МПа};$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{4,4617 \cdot 10^6 \cdot 0,0561}{287} = 871,5 \text{ К};$$

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 0,713 \cdot 871,5 = 621,39 \text{ кДж/кг};$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 1 \cdot 871,5 = 871,51 \text{ кДж/кг};$$

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \ln \frac{p_2}{p_0} = 1000 \cdot \ln \frac{871,5}{273} - 287 \cdot \ln \frac{4,4617}{0,1} = 70,70 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})};$$

$$s_2 = s_1.$$

Точка 3 – кінець ізобаричного підведення теплоти і початок розширення (початок робочого процесу).

$$q_1 = 800 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$p_3 = p_2 = 4,4617 \text{ МПа};$$

$$T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_p} = 871,5 + \frac{800}{1,0} = 871,5 + 800 = 1671,5 \text{ К};$$

$$v_3 = v_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 0,0561 \cdot \frac{1671,5}{871,5} = 0,1075 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Ступінь попереднього розширення ρ циклу Дизеля:

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1671,5}{871,5} = 1,9179;$$

$$u_3 = c_v \cdot T_3 = 0,713 \cdot 1671,5 = 1191,79 \text{ кДж/кг};$$

$$h_3 = c_p \cdot T_3 = 1 \cdot 1671,5 = 1671,5 \text{ кДж/кг};$$

$$s_3 = c_p \ln \frac{T_3}{T_0} - R \ln \frac{p_3}{p_0} = 1000 \cdot \ln \frac{1671,5}{273} - 287 \cdot \ln \frac{4,4617}{0,1} = 721,96 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Точка 4 – кінець адіабатичного розширення робочого тіла (кінець робочого процесу), початок відведення теплоти.

$$v_4 = v_1 = 0,8409 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = p_3 \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^k = 4,4617 \cdot \left(\frac{1,9179}{15}\right)^{1,4025} = 0,2493 \text{ МПа};$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = \frac{0,2493 \cdot 10^6 \cdot 0,8409}{287} = 730,4 \text{ К}.$$

Для перевірки з рівняння адіабатичного процесу

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{k-1} = 1671,5 \cdot \left(\frac{1,9179}{15}\right)^{0,4025} = 730,39 \text{ К};$$

$$u_4 = c_v \cdot T_4 = 0,713 \cdot 730,4 = 520,77 \text{ кДж/кг};$$

$$h_4 = c_p \cdot T_4 = 1 \cdot 730,39 = 730,39 \text{ кДж/кг};$$

$$s_4 = c_p \ln \frac{T_4}{T_0} - R \ln \frac{p_4}{p_0} = 1000 \cdot \ln \frac{730,4}{273} - 287 \cdot \ln \frac{0,2493}{0,1} = 721,96 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})};$$

$$s_4 = s_3.$$

Результати розрахунку занесемо до таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Питомі параметри робочого тіла в основних точках циклу Дизеля

Точка	p, МПа	T, К	v, м ³ /кг	u, кДж/кг	h, кДж/кг	s, Дж/(кг·К)
1	0,1000	293	0,8409	208,91	293,00	70,70
2	4,4617	871,5	0,0561	621,39	871,51	70,70
3	4,4617	1671,5	0,1075	1191,79	1671,51	721,96
4	0,2493	730,4	0,8409	520,77	730,39	721,96

II. Розрахунок основних процесів циклу Дизеля

Процес 1-2: адіабатичне стиснення.

Змінення температури $\Delta T_{12} = T_2 - T_1 = 871,5 - 293 = 578,51 \text{ К}$.

Теплоємність і теплота адіабатичного процесу дорівнюють нулю, тобто

$$c_{12} = 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$q_{12} = c_{12} \Delta T_{12} = 0 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{12} = c_v (T_2 - T_1) = c_v \cdot \Delta T_{12} = 0,713 \cdot 578,51 = 412,48 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h_{12} = c_p (T_2 - T_1) = c_p \cdot \Delta T_{12} = 1 \cdot 578,51 = 578,51 \text{ кДж/кг};$$

$$l_{12} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} (-\Delta T_{12}) = \frac{287}{1,4025 - 1} (-578,51) = -412,48 \text{ кДж/кг},$$

або з першого закону термодинаміки

$$l_{12} = q_{12} - \Delta u_{12} = -\Delta u_{12} = -412,48 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s_{12} = c_{12} \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

або $\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = 70,70 - 70,70 = 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Процес 2-3: ізобаричне розширення.

Змінення температури

$$\Delta T_{23} = T_3 - T_2 = \frac{q_1}{c_p} = \frac{800}{1,00} = 800 \text{ К}.$$

Теплоємність ізобаричного процесу розширення:

$$c_{23} = c_p = 1,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$q_{23} = c_{23} \Delta T_{23} = q_1 = 800 \text{ кДж/кг};$$

$$\begin{aligned}\Delta u_{23} &= c_v(T_3 - T_2) = c_v \cdot \Delta T_{23} = 0,713 \cdot 800 = 570,40 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta h_{23} &= c_p(T_3 - T_2) = c_p \cdot \Delta T_{23} = 1,00 \cdot 800 = 800 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta h_{23} &= q_1 = 800 \text{ кДж/кг}; \\ l_{23} &= p_2(v_3 - v_2) = R(T_3 - T_2) = R \cdot \Delta T_{23} = 287 \cdot 800 = 229,60 \text{ кДж/кг}, \\ \text{або з першого закону термодинаміки:} \\ l_{23} &= q_{23} - \Delta u_{23} = 800 - 570,40 = 229,60 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta s_{23} &= c_{23} \ln \frac{T_3}{T_2} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} = 1,00 \cdot \ln \frac{1671,5}{871,5} = 651,25 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}, \\ \text{або} \quad \Delta s_{23} &= s_3 - s_2 = 721,96 - 70,70 = 651,26 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.\end{aligned}$$

Процес 3-4: адіабатичне розширення.

Змінення температури

$$\Delta T_{34} = T_4 - T_3 = 730,4 - 1671,5 = -941,13 \text{ K}.$$

Теплоємність адіабатичного процесу дорівнює нулю, тобто

$$\begin{aligned}c_{34} &= 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}; \\ q_{34} &= c_{34} \Delta T_{34} = 0 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta u_{34} &= c_v(T_4 - T_3) = c_v \cdot \Delta T_{34} = 0,713 \cdot (-941,13) = -671,02 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta h_{34} &= c_p(T_4 - T_3) = c_p \cdot \Delta T_{34} = 1 \cdot (-941,13) = -941,13 \text{ кДж/кг}; \\ l_{34} &= \frac{R}{k-1} (T_3 - T_4) = \frac{R}{k-1} (-\Delta T_{34}) = \frac{287}{1,4025 - 1} \cdot 941,13 = \\ &= 671,02 \text{ кДж/кг},\end{aligned}$$

або з першого закону термодинаміки

$$\begin{aligned}l_{34} &= q_{34} - \Delta u_{34} = -\Delta u_{34} = 671,02 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta s_{34} &= c_{34} \ln \frac{T_4}{T_3} = 0 \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}, \\ \text{або} \quad \Delta s_{34} &= s_4 - s_3 = 721,96 - 721,96 = 0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.\end{aligned}$$

Процес 4-1: ізохоричний.

Змінення температури

$$\Delta T_{41} = T_1 - T_4 = 293 - 730,4 = -437,39 \text{ K}.$$

Теплоємність ізохоричного процесу

$$\begin{aligned}c_{41} &= c_v = 0,713 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}; \\ q_{41} &= c_{41} \Delta T_{41} = 0,713 \cdot (-437,39) = -311,86 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Питома теплота, що відводиться у циклі,

$$\begin{aligned}q_2 &= -q_{41} = 311,86 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta u_{41} &= c_v(T_1 - T_4) = c_v \cdot \Delta T_{41} = 0,713 \cdot (-437,39) = -311,86 \text{ кДж/кг}; \\ \Delta u_{41} &= q_{41};\end{aligned}$$

$$\Delta h_{41} = c_p(T_1 - T_4) = c_p \cdot \Delta T_{41} = 1 \cdot (-437,39) = -437,39 \text{ кДж/кг}.$$

Робота розширення в ізохоричному процесі дорівнює нулю, тобто

$$l_{41} = \int_{v_4}^{v_1} p dv = 0 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s_{41} = c_v \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,713 \cdot \ln \frac{293}{730,4} = -651,25 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)},$$

або $\Delta s_{41} = s_1 - s_4 = 70,70 - 721,96 = -651,25 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$

Результати розрахунку занесемо до таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Енергетичні параметри процесів циклу Дизеля

Процес	q , кДж/кг	l , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , Дж/(кг · К)
1–2	0	-412,48	412,48	578,51	0,00
2–3	800,00	229,60	570,40	800,00	651,25
3–4	0	671,02	-671,02	-941,13	0,00
4–1	-311,86	0	-311,86	-437,39	-651,25
Сума (теплота цикла; робота цикла)	488,14	488,14	0,00	0,00	0,00

III. Термічний ККД циклу. Перевірка енергетичного балансу – сума теплот дорівнює сумі робіт

Робота циклу

$$l_c = \sum_{i,j=1}^4 l_{i-j} = l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{41} = -412,48 + 229,60 + 671,02 + 0 =$$

$$= 488,14 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота циклу

$$q_c = \sum_{i,j=1}^4 q_{i-j} = q_{12} + q_{23} + q_{34} + q_{41} = 800,00 - 311,86 = 488,14 \text{ кДж/кг.}$$

Перевірка енергетичного балансу:

$$\sum_{i,j=1}^4 q_{i-j} = \sum_{i,j=1}^4 l_{i-j}.$$

Термічний ККД циклу Дизеля

$$\eta_t = \frac{l_{\text{цикла}}}{q_{\text{повед}}} = \frac{l_c}{q_1} = \frac{488,14}{800} = 0,6102,$$

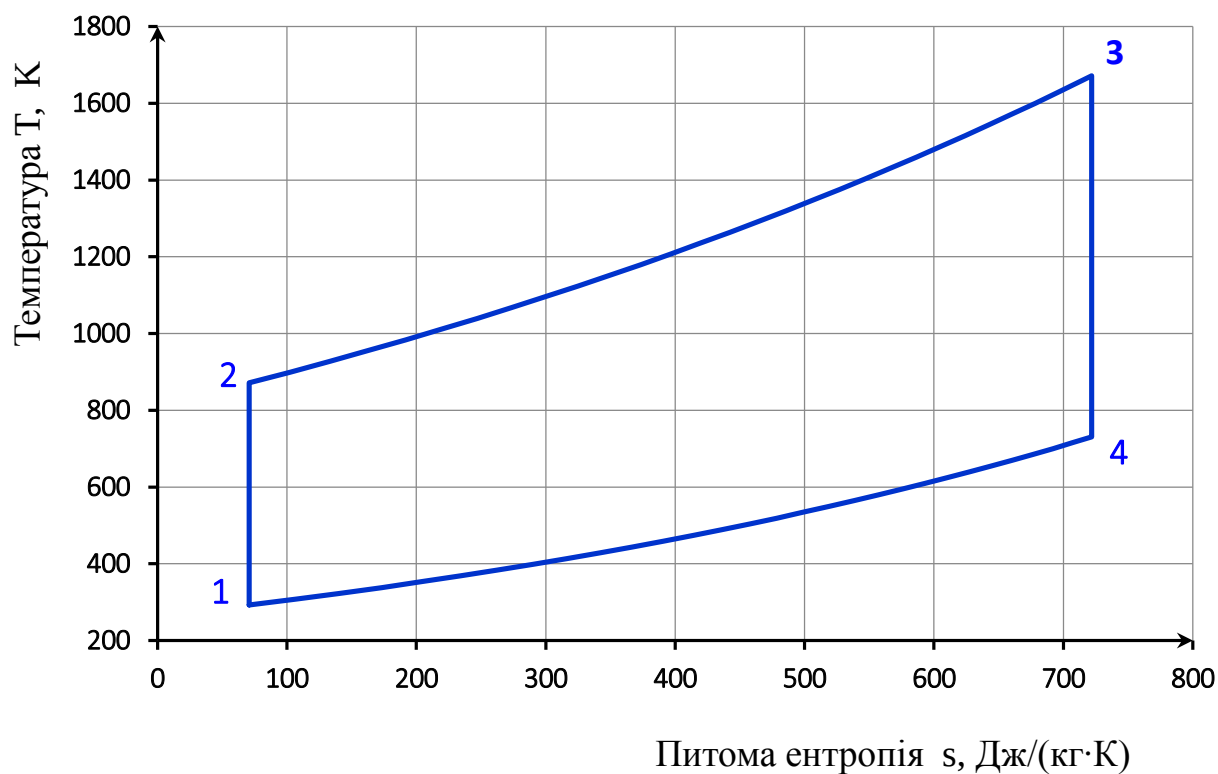
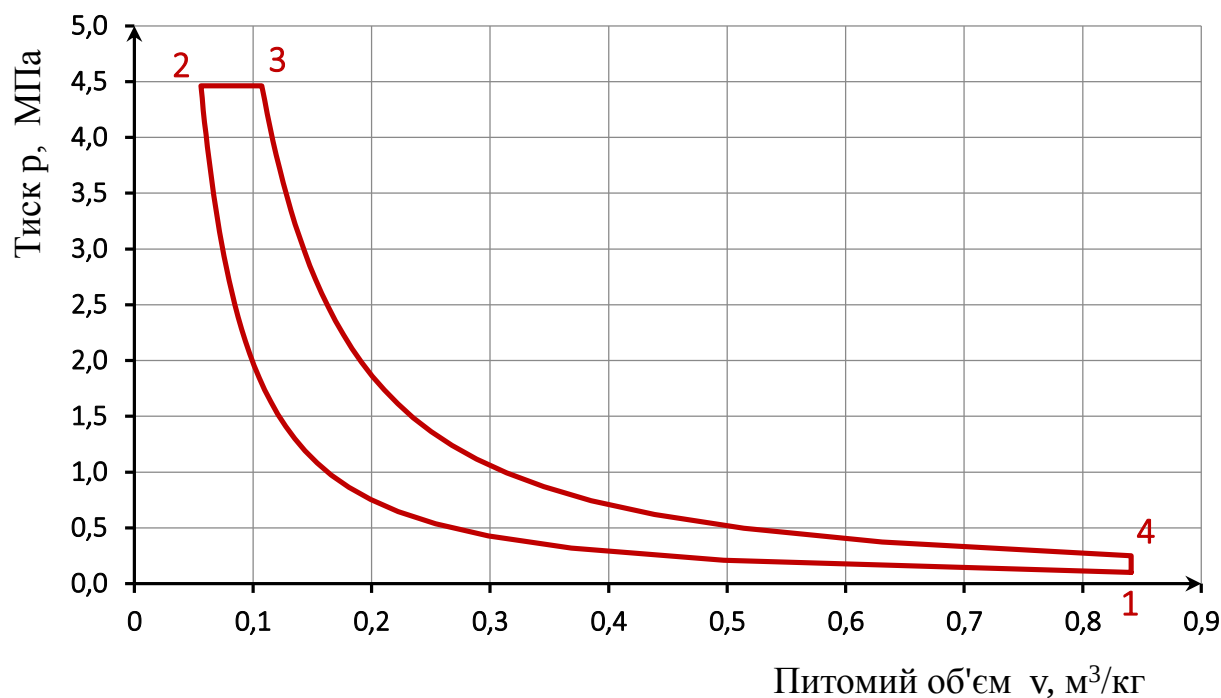
або

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{k-1}(\rho - 1)} = 1 - \frac{1,9179^{1,4025} - 1}{1,4025 \cdot 15^{1,4025-1}(1,9179 - 1)} =$$

$$= 1 - \frac{1,49278}{3,82942} = 0,61018.$$

Результат отримано однаковий.

За даними таблиці 7.5 побудуємо цикл Дизеля в $p-v$ - і $T-s$ -координатах (рисунки 7.3 і 7.4).



7.8. Виконати термодинамічний розрахунок поршневого двигуна, що працює за циклом Дизеля, якщо відомо початковий тиск p_1 , бар; початкова температура t_1 , °C; ступінь стиснення $\varepsilon = v_1/v_2$; ступінь *попереднього розширення* $\rho = v_3/v_2$. Визначити параметри стану (температуру, тиск, питомий об'єм, питому внутрішню енергію, ентальпію, ентропію) у характерних точках циклу (таблиця 7.7). Ентальпію (h), внутрішню енергію (u) визначити щодо стану газу при $T_0 = 273$ К, ентропію (s) – щодо стану за умов $T_0 = 273$ К, $p_0 = 1$ бар. Побудувати цикл у p – v - і T – s -координатах. Для кожного процесу циклу визначити роботу, кількість підведеної та відведеної теплоти, змінення внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Визначити роботу циклу, термічний ККД циклу. Робоче тіло – повітря, газова стала $R = 0,287$ кДж/(кг · К); питома ізобарна теплоємність $c_p = 1,0045$ кДж/(кг · К), процеси стиснення та розширення вважати ізоентропічними з показником $k = 1,4$.

Таблиця 7.7 — Вихідні дані для розрахунку циклу Дизеля

Номер варіанта	t_1 , °C	p_1 , бар	ε	ρ
1	-10	0,95	18	1,85
2	0	0,98	20	1,80
3	10	1,00	22	1,75
4	20	1,00	16	1,90
5	30	1,05	15	2,00

7.9. Попереднє завдання повторити за умови політропічного стиснення та розширення із заданими показниками політропи n_1 і n_2 відповідно. Вихідні дані для розрахунку подано у таблиці 7.8.

Таблиця 7.8 — Вихідні дані для розрахунку циклу Дизеля

Номер варіанта	t_1 , °C	p_1 , бар	ε	ρ	n_1	n_2
1	-10	0,95	18	1,85	1,35	1,28
2	0	0,98	20	1,80	1,36	1,30
3	10	1,00	22	1,75	1,38	1,32
4	20	1,00	16	1,90	1,42	1,34
5	30	1,05	15	2,00	1,43	1,36

7.10*. Визначити термічний ККД і роботу циклу Тринклера, якщо $p_1 = 1$ бар, $t_1 = 0$ °C, $p_4 = 70$ бар, $p_5 = 3,5$ бар, а в ізохоричному процесі підводиться теплота 300 кДж/кг. Властивості робочого тіла вважати незмінними і такими, що відповідають властивостям повітря. Чому дорівнюють параметри робочого тіла у проміжних точках циклу? Яким був

би ККД циклу Карно, здійсненого у тому ж діапазоні температур? Як змінюються зазначені величини, якщо адіабатичне розширення довести до тиску $p_5 = 1$ бар?

Розв'язання. За циклом Тринклера однозначно визначають такі параметри циклу: ступінь стиснення $\varepsilon = v_2/v_1$, ступінь підвищення тиску при згорянні $\lambda = p_3/p_2$, ступінь попереднього розширення $\rho = v_4/v_3$. У завданні жоден із них не заданий.

Значення термодинамічних параметрів у характерних точках циклу можна виразити через початкові параметри робочого тіла p_1, t_1 та параметри циклу $\varepsilon, \rho, \lambda$ (таблиця 7.9).

Таблиця 7.9 — Вихідні дані для розрахунку циклу Тринклера

Точка циклу	Тиск p	Температура T	Питомий об'єм v
1	p_1	$T_1 = t_1 + 273$	$v_1 = RT_1/p_1$
2	$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k$	$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}$	$v_2 = v_1/\varepsilon$
3	$p_3 = p_2 \cdot \lambda = p_1 \cdot \varepsilon^k \cdot \lambda$	$T_3 = T_2 \cdot \lambda = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda$	$v_3 = v_2 = v_1/\varepsilon$
4	$p_4 = p_3 = p_1 \cdot \varepsilon^k \cdot \lambda$	$T_4 = T_3 \cdot \rho = T_1 \cdot \rho \lambda \varepsilon^{k-1}$	$v_4 = v_3 \cdot \rho = v_1 \cdot \frac{\rho}{\varepsilon}$
5	$p_5 = p_4 \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^k = p_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k$	$T_5 = T_1 \frac{p_5}{p_1} = T_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k$	$v_5 = v_1$

На підставі заданих величин $p_4 = 70$ бар, $p_5 = 3,5$ бар і $q'_1 = 300$ кДж/кг складемо систему трьох рівнянь із трьома невідомими ε, λ та ρ :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_4 = p_1 \lambda \varepsilon^k; \\ p_5 = p_1 \lambda \rho^k; \\ q'_1 = c_v (T_3 - T_2) = \\ = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1). \end{array} \right. , \text{ звідки } \left\{ \begin{array}{l} \lambda \varepsilon^k = \frac{p_4}{p_1}; \\ \lambda \rho^k = \frac{p_5}{p_1}; \\ \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1) = \frac{q'_1}{c_v T_1}. \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \lambda \varepsilon^{1,4} = 70; \\ \lambda \rho^{1,4} = 3,5; \\ \varepsilon^{0,4} (\lambda - 1) = 1,53081. \end{array} \right.$$

Спільне розв'язання першого та третього рівнянь системи дає трансцендентальне рівняння відносно ε :

$$\frac{70}{\varepsilon} - \varepsilon^{0,4} - 1,53081 = 0 ,$$

яке можна розв'язати, наприклад, методом послідовних ітерацій.

Остаточню

$$\begin{cases} \varepsilon = 15,48; \\ \lambda = 1,512; \\ \rho = 1,821. \end{cases}$$

Параметри робочого тіла у проміжних точках циклу наведено у таблиці 7.10.

Таблиця 7.10 – Параметри робочого тіла у проміжних точках циклу

Точка циклу	p , бар	T , К	v , м ³ /кг
1	$p_1 = 1$	$T_1 = 273$ К	$v_1 = 0,784$
2	$p_2 = 46,31$	$T_2 = 817$	$v_2 = 0,0506$
3	$p_3 = 70,02$	$T_3 = 1235$	$v_3 = 0,0506$
4	$p_4 = 70,02$	$T_4 = 2249$	$v_4 = 0,0922$
5	$p_5 = 3,50$	$T_5 = 956$	$v_5 = 0,784$

Питома теплота ізобаричного процесу згоряння

$$q_1'' = c_p(T_4 - T_3) = 1005 \cdot (2249 - 1235) = 1019 \text{ кДж/кг.}$$

Відведена теплота

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1) = \frac{1005}{1,4} (956 - 273) = 490 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу

$$l_0 = (q_1' + q_1'') - q_2 = 300 + 1019 - 490 = 829 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1' + q_1''} = \frac{829}{300 + 1019} = 0,63.$$

Термічний ККД циклу Карно в тому ж діапазоні температур

$$\eta_{\text{карно}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{273}{2249} = 0,88.$$

Якщо адіабатичне розширення продовжити до тиску $p_5 = 1$ бар (повне розширення робочого тіла), то зміняться термодинамічні параметри робочого тіла в точці 5 циклу та енергетичні характеристики циклу (таблиця 7.11).

Таблиця 7.11 – Параметри робочого тіла у точці 5 при повному розширенні робочого тіла до тиску навколишнього середовища

Точка циклу	p , бар	T , К	v , м ³ /кг
5	$p_5 = p_1 = 1$	$T_5 = \frac{p_5 v_5}{R} = 668$	$v_5 = v_4 \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{1}{k}} = v_1 \rho \lambda^{\frac{1}{k}} = 1,917$

Теплота, що відведена у циклі з повним розширенням,

$$q_2 = c_p(T_5 - T_1) = 1005(668 - 273) = 397 \text{ кДж/кг}.$$

Питома робота циклу з повним розширенням

$$l_0 = (q'_1 + q''_1) - q_2 = (300 + 1019) - 397 = 922 \text{ кДж/кг}.$$

Термічний ККД циклу з повним розширенням

$$\eta_t = \frac{l_0}{q'_1 + q''_1} = \frac{922}{300 + 1019} = 0,70.$$

7.11. Визначити мінімально необхідний ступінь стиснення ε в ДВЗ із запаленням від стиснення, якщо температура займання палива – 900 К, а температура повітря до стиснення – 300 К. Розрахунки виконати для адіабатичного та політропічного стиснення (показник політропи стиснення $n_1 = 1,3$). Розрахувати цикли, вважати $p_1 = 0,98$ бар, ступінь попереднього розширення $\rho = 2$, процеси розширення – адіабатичним і політропічним (показник політропи розширення $n_2 = 1,35$).

7.12. Виконати термодинамічний розрахунок поршневого двигуна, що працює за циклом Тринклера, якщо відомо початковий тиск p_1 , бар; початкова температура стиснення t_1 , °С; ступінь стиснення $\varepsilon = v_1/v_2$; ступінь підвищення тиску при згорянні $\lambda = p_3/p_2$, ступінь попереднього розширення $\rho = v_4/v_3$ (таблиця 7.12). Визначити параметри стану (температуру, тиск, питомий об'єм, питому внутрішню енергію, ентальпію, ентропію) у характерних точках циклу. Ентальпію (h), внутрішню енергію (u) визначити щодо стану газу при $T_0 = 273$ К, ентропію (s) – щодо стану за умов $T_0 = 273$ К, $p_0 = 1$ бар. Побудувати цикл у p - v - і T - s -координатах. Для кожного процесу циклу визначити роботу, кількість підведеної та відведеної теплоти, змінення внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Визначити роботу циклу, термічний ККД циклу. Робоче тіло – повітря, газова стала $R = 0,287$ кДж/(кг · К); питома ізобарна теплоємність $c_p = 1,0045$ кДж/(кг · К), процеси стиснення та розширення вважати ізоентропічними з показником $k = 1,4$.

Таблиця 7.12 — Вихідні дані для розрахунку циклу Тринклера

Номер варіанта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	ε	λ	ρ
1	-10	0,95	16	1,7	1,95
2	0	0,98	18	1,6	1,80
3	10	1,00	20	1,5	1,75
4	15	1,00	14	2,0	1,90
5	20	1,03	12	2,12	2,00

7.13. Попереднє завдання (задача 7.12) повторити за умови політропічного стиснення та розширення із заданими показниками політропи n_1 і n_2 відповідно (таблиця 7.13).

Таблиця 7.13 — Вихідні дані для розрахунку циклу Тринклера

Номер варіанта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p, \text{бар}$	ε	λ	ρ	n_1	n_2
1	-15	0,95	18	1,6	1,85	1,35	1,28
2	-5	0,98	20	1,5	1,80	1,36	1,30
3	0	1,00	22	1,4	1,75	1,38	1,32
4	10	1,00	16	2,0	1,90	1,42	1,34
5	20	1,05	15	2,1	2,00	1,43	1,36

7.14. Визначити термічний ККД та питому роботу циклу Отто, якщо $t_1 = 0 ^\circ\text{C}$, $p_1 = 1 \text{ бар}$, $p_3 = 40 \text{ бар}$, $p_4 = 3,0 \text{ бар}$ (властивості робочого тіла вважати незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря). Як зміняться визначувані величини, якщо розширення продовжити до тиску 1 бар? Цикл Отто зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.15. Визначити термічний ККД та питому роботу циклу Дизеля, якщо $t_1 = 0 ^\circ\text{C}$, $p_1 = 1 \text{ бар}$, $p_2 = 60 \text{ бар}$, $p_4 = 2,2 \text{ бар}$ (властивості робочого тіла вважати незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря). Як зміняться зазначені величини, якщо розширення продовжити до тиску 1 бар? Цикл Дизеля зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.16. Визначити термічний ККД та роботу циклу Дизеля, якщо $t_1 = 0 ^\circ\text{C}$, $p_1 = 1 \text{ бар}$, $T_3 = 1300 ^\circ\text{C}$, $p_4 = 2,5 \text{ бар}$ (властивості робочого тіла вважати незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря). Яка теплота підведена та відведена у циклі? Яким був би ККД циклу Карно, здійсненого у тому ж діапазоні температур? Цикл Дизеля зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.17. У циклі Дизеля параметри на початку стиснення: тиск – 0,1 МПа і температура – +20 °С. Ступінь стиснення $\varepsilon = 20$, питома теплота, що підводиться, $q_1 = 850$ кДж/кг. Визначити параметри в характерних точках циклу, корисну роботу та термічний ККД (вважати властивості робочого тіла незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря). Якщо при заданих вихідних величинах був здійснений цикл Отто, то яким був би його термічний ККД? Цикл Дизеля зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.18. Визначити термічний ККД і роботу циклу Тринклера, якщо $p_1 = 1,0$ бар, $t_1 = 17$ °С, $t_4 = 2500$ °С, $p_5 = 3,2$ бар, а в ізохоричному процесі підводиться теплота 320 кДж/кг. Властивості робочого тіла вважати незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря. Чому дорівнюють параметри робочого тіла у проміжних точках циклу? Яким був би ККД циклу Карно, здійсненого у тому ж діапазоні температур? Як змінюються величини, якщо адіабатичне розширення довести до тиску $p_5 = 1$ бар? Цикл Тринклера зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.19. Визначити термічний ККД і роботу циклу Тринклера, якщо $p_1 = 1,0$ бар, $t_1 = 27$ °С, $t_4 = 2700$ °С, $p_5 = 3,4$ бар, а в ізобаричному процесі підводиться теплота 1000 кДж/кг. Властивості робочого тіла вважати незмінними та такими, що відповідають властивостям повітря. Чому дорівнюють параметри робочого тіла у проміжних точках циклу? Яким був би ККД циклу Карно, здійсненого у тому ж діапазоні температур? Як змінюються зазначені величини, якщо адіабатичне розширення довести до тиску $p_5 = 1$ бар? Цикл Тринклера зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.20. ГТУ працює за циклом з підведенням теплоти при $p = const$. Початковий стан повітря: $p_1 = 1,15$ бар, $t_1 = 17$ °С. Тиск у камері згоряння дорівнює 7,2 бар; ступінь попереднього розширення $\rho = 2,1$; кількість підведеної теплоти $Q_1 = 500$ кДж; витрата газу $G = 1,25$ кг/с. Визначити: параметри повітря в усіх точках циклу, термічний ККД циклу, кількість теплоти, що відводиться, теоретичну потужність ГТУ. Цикл ГТУ зобразити на p - v - і T - s -діаграмах.

7.21. Стиснення повітря в ГТУ літака здійснюється осьовим компресором по політропі з показником політропи $n = 1,7$. ступінь стиснення $\pi_k = 8$, повітря надходить у компресор при тиску 0,8 бар і температурі – +10 °С. У камері згоряння температура підвищується до 980 °С, розширення газу в турбіні відбувається політропно з показником політропи $n = 1,3$. Визначити роботу компресора, повну роботу турбіни та роботу циклу. Знайти термічний ККД циклу.

7.22*. ГТУ працює за циклом Брайтона з регенерацією теплоти (рис. 7.5). Продукти згоряння, надходять у котел-утилізатор.

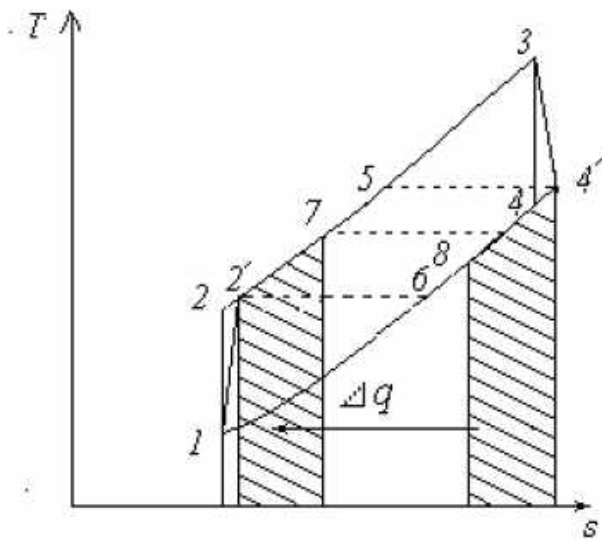
Відпрацьовані параметри повітря: $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20$ °С.

Інші параметри:

- адіабатний ККД турбокомпресора $\eta_{\text{ад}}^{\text{к}} = 0,8$;
- відносний внутрішній ККД газової турбіни $\eta_0 = 0,9$;
- механічний ККД $\eta_{\text{мех}} = 0,97$;
- ККД електрогенератора $\eta_{\text{г}} = 0,98$;
- ККД котла-утилізатора $\eta_{\text{кот}} = 0,85$;
- ступінь підвищення тиску в компресорі $\pi_{\text{к}} = 6$;
- температура продуктів згоряння $t_3 = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ступінь регенерації теплоти $\sigma = 0,7$.

Визначити:

- 1) температуру та ентальпію робочого тіла в усіх точках циклу;
- 2) ККД перетворення енергії палива на електричну енергію;
- 3) питому роботу, що витрачається на стиснення повітря у компресорі;
- 4) питому роботу турбіни;
- 5) ефективний ККД газової турбіни;
- 6) питому теплоту, що віддається споживачеві;
- 7) температуру газу, що надходить у котел-утилізатор;
- 8) коефіцієнт використання палива.



При розрахунку температури та ентальпії в усіх точках циклу стиснене повітря та продукти згоряння розглядаються як ідеальні гази, що підпорядковуються рівнянню стану ідеального газу.

Їх теплоємності вважаються такими, що не залежать від температури.

Рисунок 7.5 — Реальний цикл ГТУ із регенерацією теплоти

Питома ізобарна теплоємність повітря, яка відповідає рівнянню ідеального газу,

$$c_p = R \frac{k}{k-1} = \frac{R_0}{\mu_{\text{пов}}} \frac{k}{k-1} = \frac{8314,46}{28,97} \frac{1,4}{1,4-1} = 1004,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 1,0045 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тут R_0 – універсальна газова стала, $R_0 = 8314,46 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;

R – газова стала повітря, $R = R_0/\mu_{\text{пов}}$,

де $\mu_{\text{пов}} = 28,96 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – молярна маса повітря;

k – показник адіабати повітря, за н. у. $k = 1,4$.

Теплоємність продуктів згоряння розраховують залежно від складу продуктів згоряння, який, у свою чергу, визначається за складом палива і відомими теплоємностями продуктів згоряння. У разі спрощеного розрахунку теплофізичні властивості продуктів згоряння вважаються такими ж, як і повітря. Тому в усіх подальших розрахунках для повітря та продуктів згоряння взяти:

– $c_p = 1,0045 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

– $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

– $k = 1,4$.

Відлік ентальпії почнемо від $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Розрахунок температури та ентальпії робочого тіла в основних точках газотурбінного циклу

Точка 1 – вхід до компресора:

$$t_1 = 20^\circ\text{C};$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 293 \text{ К};$$

$$h_1 = c_p t_1 = 20 \cdot 1,0045 = 20,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Точка 2 – вихід із ідеального компресора зі ступенем підвищення тиску $\pi_k = 16$:

$$T_2 = T_1 \pi_k^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 16^{0,4/1,4} = 293 \cdot 1,6685 = 488,9 \text{ К};$$

$$t_2 = T_2 - 273 = 488,9 - 273 = 215,9^\circ\text{C};$$

$$h_2 = c_p t_2 = 1,0045 \cdot 215,9 = 216,8 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Робота ідеального (ізоентропічного) компресора

$$l_K^{\text{ideal}} = h_2 - h_1 = 216,8 - 20,1 = 196,8 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Робота реального компресора із заданим адіабатним ККД турбокомпресора $\eta_{ad}^k = 0,8$

$$l_K^{real} = \frac{l_K^{ideal}}{\eta_{ad}^k};$$

$$l_K^{real} = \frac{196,8}{0,8} = 245,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Точка 2' – вихід із реального компресора зі ступенем підвищення тиску $\pi_k = 16$ та адіабатним ККД турбокомпресора $\eta_{ad}^k = 0,8$:

$$h'_2 = h_1 + l_K^{real} = 20,1 + 245,9 = 266,0 \text{ кДж/кг};$$

$$t'_2 = \frac{h'_2}{c_p} = \frac{266,0}{1,0045} = 264,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T'_2 = t'_2 + 273 = 264,8 + 273 = 537,8 \text{ К},$$

$$T'_2 > T_2.$$

Точка 3 – вихід із камери згоряння.

Температуру продуктів згоряння на виході з камери згоряння задано:

$$t_3 = 800 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_3 = t_3 + 273 = 1073 \text{ К};$$

$$h_3 = c_p t_3 = 1,0045 \cdot 800 = 803,6 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, що підводиться до робочого тіла у камері згоряння ГТУ,

$$q_1 = h_3 - h'_2 = 803,6 - 266,0 = 537,6 \text{ кДж/кг}.$$

Точка 4 – вихід з ідеальної турбіни зі ступенем зниження тиску $\pi_T = 16$:

$$T_4 = \frac{T_3}{\pi_T^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{1073}{6^{0,4/1,4}} = \frac{1073}{1,6685} = 643,1 \text{ К};$$

$$t_4 = T_4 - 273 = 643,1 - 273 = 370,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$h_4 = c_p t_4 = 1,0045 \cdot 370,1 = 371,8 \text{ кДж/кг}.$$

Робота ідеальної турбіни

$$l_T^{ideal} = h_3 - h_4 = 803,6 - 371,8 = 431,8 \text{ кДж/кг}.$$

Робота реальної турбіни із заданим внутрішнім відносним ККД газової турбіни $\eta_0 = 0,9$

$$l_T^{real} = \eta_0 \cdot l_T^{ideal} = 0,9 \cdot 431,8 = 388,7 \text{ кДж/кг}.$$

Точка 4' – вихід із реальної турбіни зі ступенем зниження тиску, що дорівнює $\pi_T = 6$, і внутрішнім відносним ККД газової турбіни $\eta_0 = 0,9$:

$$h'_4 = h_3 - l_T^{real} = 803,6 - 388,7 = 414,9 \text{ кДж/кг};$$

$$t'_4 = \frac{h'_4}{c_p} = \frac{414,9}{1,0045} = 413,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T'_4 = t'_4 + 273 = 413,1 + 273 = 686,1 \text{ К}.$$

Питома теплота, що відводиться із ГТУ із продуктами згоряння,

$$q_2 = h'_4 - h_1 = 414,9 - 20,1 = 394,9 \text{ кДж/кг}.$$

Результати розрахунків занесемо до таблиці 7.14.

Таблиця 7.14 — Температура та ентальпія робочого тіла в основних точках циклу

Точка циклу	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{К}$	$h, \text{кДж/кг}$
1	20,0	293,0	20,1
2	215,9	488,9	216,8
2'	264,8	537,8	266,0
3	800,0	1073,0	803,6
4	370,1	643,1	371,8
4'	413,1	686,1	414,9

Крім знайдених робіт та теплот розрахуємо:

– температуру газу, що надходить у котел-утилізатор (це температура продуктів згоряння на виході з турбіни),

$$t'_4 = 413,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– питому роботу, витрачену на стиснення повітря в компресорі,

$$l_K^{real} = 245,9 \text{ кДж/кг};$$

– питому роботу турбіни

$$l_T^{real} = 388,7 \text{ кДж/кг};$$

– дійсно корисну питому роботу циклу ГТУ з урахуванням заданого механічного ККД $\eta_{mec} = 0,97$

$$l_{циклу} = \eta_{mec} l_T^{real} - l_K^{real};$$

$$l_{циклу} = 0,97 \cdot 388,7 - 245,9 = 131,1 \text{ кДж/кг};$$

– ефективний ККД газової турбіни, що дорівнює відношенню корисної роботи ГТУ $l_{циклу}$ до кількості витраченої на роботу теплоти q_1 ,

$$\eta_{teff} = \frac{l_{циклу}}{q_1};$$

$$\eta_{teff} = \frac{131,1}{537,6} = 0,2438;$$

– питому теплоту, що віддається споживачеві q_T , яка дорівнює питомій теплоті, що відводиться з ГТУ з продуктами згорання q_2 , помноженої на ККД котла $\eta_{kot} = 0,85$:

$$q_T = \eta_{kot} \cdot q_2 = 0,85 \cdot 394,9 = 335,6 \text{ кДж/кг};$$

– ККД перетворення енергії палива на електроенергію η_S , що дорівнює добутку ККД електрогенератора $\eta_g = 0,98$ на ефективний ККД газової турбіни η_{teff} :

$$\eta_S = \eta_g \cdot \eta_{teff} = 0,98 \cdot 0,2438 = 0,2389;$$

– коефіцієнт корисного використання палива

$$K = \eta_g \frac{l_{цикла}}{q_1} + \eta_{kot} \frac{q_2}{q_1} = \eta_S + \frac{q_T}{q_1};$$

$$K = 0,2389 + \frac{335,6}{537,6} = 0,8633.$$

Обчислені параметри циклу занесемо до таблиці 7.15.

Таблиця 7.15 – Результати розрахунку циклу ГТУ

Температура газу, що надходить до котла-утилізатора, °С	413,1
Питома робота, витрачена на стиснення повітря у компресорі, кДж/кг	245,9
Питома робота турбіни, кДж/кг	388,7
Питоме тепло, що віддається споживачеві, кДж/кг	335,6
Ефективний ККД газової турбіни	0,2438
ККД перетворення енергії палива на електроенергію	0,2389
Коефіцієнт корисного використання палива	0,8633

7.23. Попереднє завдання повторити за таких умов (таблиця 7.16).

Таблиця 7.16 – Вихідні дані щодо розрахунку циклу ГТУ

Номер варіанта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	t_3	$\eta_{ад}^K$	η_0	$\eta_{мех}$	$\eta_{кот}$	π_K	σ
1	-10	0,95	810	0,72	0,91	0,97	0,77	5,0	0,82
2	-5	0,98	830	0,74	0,88	0,96	0,78	6,0	0,80
3	0	1,00	850	0,75	0,89	0,98	0,83	7,0	0,78
4	10	1,01	870	0,76	0,90	0,96	0,85	7,5	0,75
5	20	1,02	900	0,77	0,93	0,97	0,87	8,0	0,74

ДОДАТОК А

Довідкові дані

Таблиця А.1 — Співвідношення одиниць вимірювання тиску

Найменування одиниць	1 Па	1 бар	1 кгс/см ² = 1 ат	1 атм (фіз.)	1 мм вод. ст.	1 мм рт. ст.
1 Па	1	10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	0,9869·10 ⁻⁵	0,101972	750·10 ⁻⁵
1 бар	10 ⁵	1	1,01972	0,98692	10197,2	750,06
1 кгс/см ² = 1 ат (тех.)	9,81·10 ⁴	0,981	1	0,96784	10 ⁴	735,56
1 атм (фіз.)	101325	1,01325	1,03323	1	10332,3	760
1 мм вод. ст.	9,81	9,81·10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9,6784·10 ⁻⁵	1	0,073556
1 мм рт. ст.	133,322	1,33·10 ⁻³	1,36·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	13,5951	1

Таблиця А.2 — Співвідношення одиниць вимірювання енергії

Найменування одиниць	1 кДж	1 ккал	1 кВт·год	1 к. с·год	1 кгс·м
1 кДж	1	0,23885	2,778·10 ⁻⁴	3,7767·10 ⁻⁴	101,972
1 ккал	4,1868	1	1,163·10 ⁻³	1,58124·10 ⁻³	426,935
1 кВт·год	3600	859,845	1	1,35962	3,67098·10 ⁵
1 к. с·год*	2647,80	632,416	0,7355	1	2,7000·10 ⁵
1 кгс·м	9,80665·10 ⁻³	2,3423·10 ⁻³	2,724·10 ⁻⁶	3,7037·10 ⁻⁶	1

* к. с — кінська сила; 1 к. с·год* — кінська сила протягом години.

Таблиця А.3 — Молекулярні маси, критичні температури, критичні тиски та критична густина деяких газів

Речовина	Хімічне позначення	Молярна маса	$t_{кр}, ^\circ C$	$p_{кр}, МПа$	$\rho_{кр}, кг/м^3$
Гелій	He	4,0026	-267,95	0,226	697,2
Водень	H ₂	2,0159	-240,7	1,25	31,0
Азот	N ₂	28,0134	-147,1	3,28	260,8
Повітря	—	28,96	-140,8	3,65	312,9
Окис вуглецю	CO	28,009	-140,0	3,496	301,0
Аргон	Ar	39,944	-122,5	4,858	533,0
Кисень	O ₂	31,9968	-118,84	4,87	406,5
Метан	CH ₄	16,0426	-82,38	4,626	163,5
Фреон-14	CF ₄	88,005	-45,65	3,745	630,0
Етилен	C ₂ H ₄	28,0536	9,2	5,042	214,2
Фреон-23	CHCl	70,016	25,9	4,820	525,0
Фреон-13	CF ₃ Cl	104,459	28,75	3,868	599,0
Вуглекислий газ	CO ₂	44,0079	31,05	7,383	467,9
Етан	C ₂ H ₆	30,069	32,18	4,871	204,5
Фреон-115	C ₂ F ₅ Cl	154,46	79,94	3,192	667,3
Пропан	C ₃ H ₈	44,0962	96,65	4,245	219,0
Фреон-12	CF ₂ Cl ₂	120,914	112,0	4,119	579,1
Аміак	NH ₃	17,0306	132,35	10,934	235,0
Хлор	Cl ₂	70,904	144,0	7,711	583,1
Сірчаний газ	SO ₂	64,0658	157,5	8,147	525,2
Етиловий спирт	C ₂ H ₅ OH	46,054	250,8	7,11	275,5
Чотирихлористий вуглець	CCl ₄	153,819	283,2	4,5602	559,0
Водяна пара	H ₂ O	18,014	374,12	22,115	317,8

Таблиця А.4 — Міжнародна стандартна атмосфера

Висота, км	Температура		Тиск		Густина ρ , кг/м ³
	°C	К	бар	мм рт. ст.	
0	15	288	1,013	760	1,225
1	8,5	281,5	0,899	674	1,112
2	2,0	275	0,795	596	1,007
3	-4,5	268,5	0,701	526	0,909
4	-11,0	262	0,616	462	0,819
5	-17,5	255,5	0,540	405	0,736
6	-24,0	249	0,472	354	0,660
7	-30,5	242,5	0,411	308	0,590
8	-37,0	236	0,356	267	0,525
9	-43,5	229,5	0,307	230	0,466
10	-50,0	223	0,264	198	0,413
11	-56,5	216,5	0,225	169	0,364
12	-56,5	216,5	0,193	145	0,310
13	-56,5	216,5	0,165	124	0,265
14	-56,5	216,5	0,141	106	0,226
15	-56,5	216,5	0,120	90	0,193
16	-56,5	216,5	0,103	77	0,165
17	-56,5	216,5	0,088	66	0,141
18	-56,5	216,5	0,075	56	0,120
19	-56,5	216,5	0,064	48	0,103
20	-56,5	216,5	0,055	41	0,088
21	-56,5	216,5	0,047	35	0,075
22	-56,5	216,5	0,040	30	0,064
23	-56,5	216,5	0,033	25	0,055
24	-56,5	216,5	0,029	22	0,047
25	-56,5	216,5	0,025	19	0,040
26	-56,5	216,5	0,0213	16	0,034
27	-56,5	216,5	0,0187	14	0,029
28	-56,5	216,5	0,0160	12	0,025
29	-56,5	216,5	0,0133	10	0,022
30	-56,5	216,5	0,0107	8	0,018

Таблиця А.5 — Середня мольна теплоємність газів при постійному тиску c_{pm} , кДж/(кмоль · К)

t °C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Повітря
0	29,29	29,20	28,64	29,13	36,06	33,40	29,06
100	29,55	29,21	28,92	29,19	38,27	33,63	29,15
200	29,94	29,29	29,08	29,33	40,23	33,97	29,29
300	29,41	29,43	29,16	29,54	41,85	34,43	29,52
400	30,896	29,64	29,20	29,81	43,25	34,92	29,79
500	31,36	29,90	29,26	30,12	44,59	35,46	30,11
600	31,79	30,19	29,33	30,45	45,82	36,01	30,42
700	32,18	30,49	29,43	30,78	46,91	36,59	30,74
800	32,53	30,79	29,54	31,11	47,89	37,18	31,04
900	32,83	31,08	29,67	31,41	48,29	37,77	31,34
1000	33,14	31,36	29,81	31,70	49,56	38,37	31,62
1100	33,40	31,62	29,97	31,97	50,28	38,96	31,88
1200	33,64	31,88	30,13	32,23	50,93	39,54	32,13
1300	33,87	32,11	30,31	32,47	51,54	40,12	32,36
1400	34,09	32,34	30,49	32,69	52,09	40,66	32,59
1500	34,29	32,55	30,67	32,89	52,60	41,19	32,79
1600	34,48	32,74	30,85	33,09	53,07	41,70	32,99
1700	34,67	32,93	31,04	33,27	53,50	42,20	33,17
1800	34,84	33,10	31,22	33,44	53,91	42,67	33,35
1900	35,02	33,26	31,40	33,60	54,29	43,12	33,51
2000	35,18	33,42	31,58	33,75	54,64	43,56	33,66
2100	35,35	33,56	31,75	33,89	54,97	43,97	33,81
2200	35,50	33,70	31,93	34,02	55,27	44,37	33,95
2300	35,66	33,83	32,09	34,15	55,67	44,76	34,09
2400	35,80	33,95	32,26	34,26	55,85	45,13	34,21
2500	35,95	34,09	32,46	34,38	56,11	45,48	34,34
2600	36,09	34,18	32,58	34,48	56,35	45,81	34,45
2700	36,22	34,29	32,76	34,58	56,58	46,14	34,56
2800	36,36	34,39	32,87	34,68	56,82	—	34,67
2900	36,48	34,49	33,01	34,77	57,04	—	34,77
3000	36,61	34,58	33,16	34,86	57,23	—	34,87

ДОДАТОК Б
 z - π -діаграма реального газу

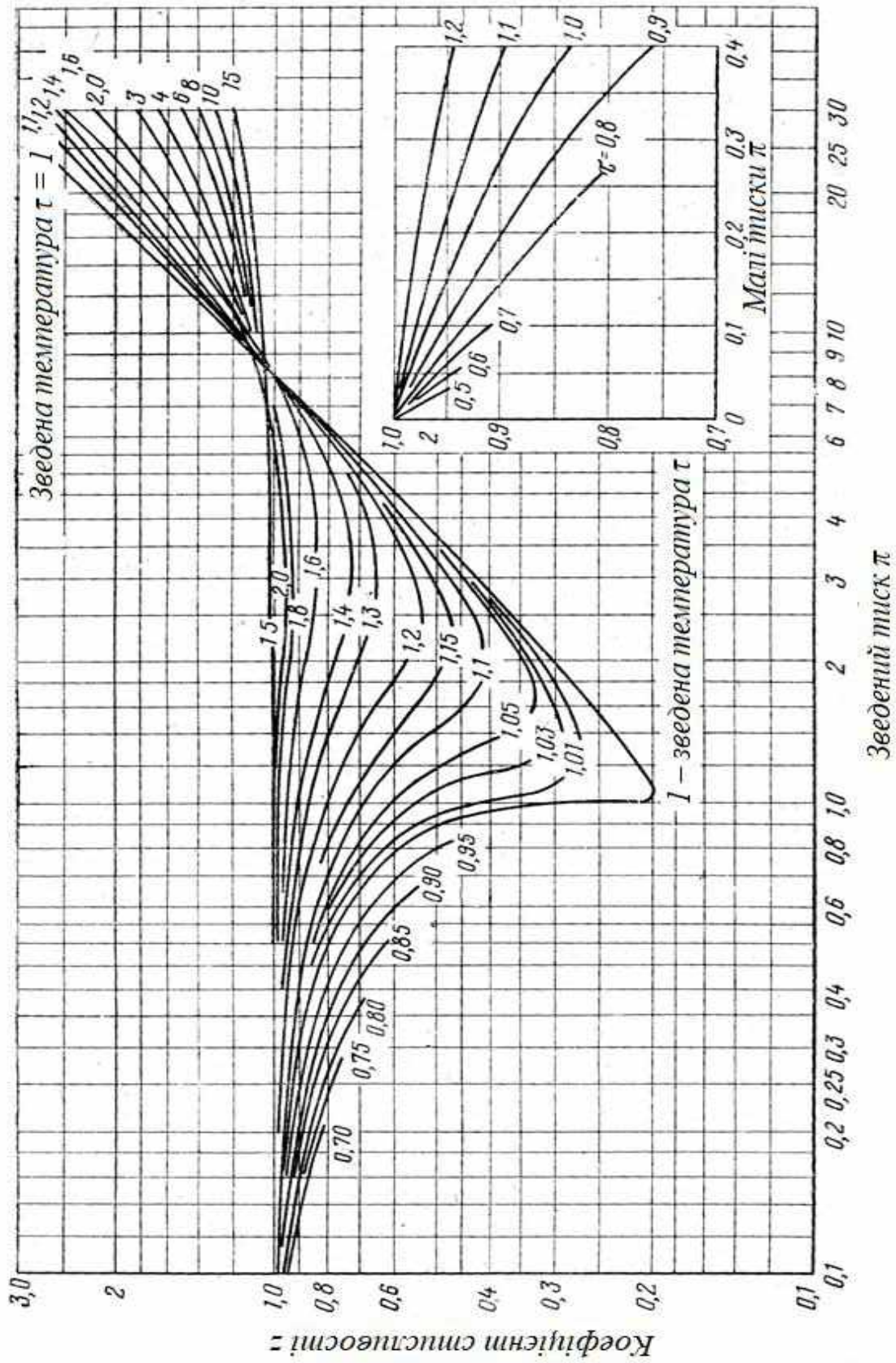


Рисунок Б.1 — Ізотерми реального газу в безрозмірних координатах

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Амброжевич, М. В. Термодинамика и теплопередача : сб. задач для студ. заочного обучения бакалаврата «Авиация и космонавтика» / М. В. Амброжевич, К. С. Епифанов, А. О. Костиков. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2008. – 38 с.

Амброжевич, М. В. Сборник задач по технической термодинамике / М. В. Амброжевич, К. С. Епифанов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2010. – 90 с.

Буляндра, О. Ф. Технічна термодинаміка / О. Ф. Буляндра. – Київ : Техніка, 2001. – 320 с.

Буляндра, О. Ф. Збірник задач з технічної термодинаміки : навч. посіб. / О. Ф. Буляндра. – Київ : НУХТ, 2015. – 394 с.

Василенко, І. А. Збірник задач та вправ для вивчення термодинамічних процесів : навч. посіб. / І. А. Василенко, С. О. Куманьов, О. А. Півоваров. – Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2014. – 249 с.

Єпіфанов, К. С. Термодинаміка і теплообмін : консп. лекцій. Ч. 1. Технічна термодинаміка / К. С. Єпіфанов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 96 с.

Єпіфанов, К. С. Термодинаміка і теплообмін : навч. посіб. до виконання розрахункових робіт / К. С. Єпіфанов, М. В. Амброжевич. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. – 130 с.

Константінов, С. М. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну : навч. посіб. для студ. вищ. техн. навч. закл. / С. М. Константінов, Р. В. Луцик. – Київ : Освіта України, 2009. – 544 с.

Навчальне видання

**Амброжевич Майя Володимирівна
Єпіфанов Костянтин Сергійович
Середа Владислав Олександрович
Шевченко Михайло Анатолійович**

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2024

Підписано до видання 27.05.2024

Ум. друк. арк. 6,6. Обл.-вид. арк. 7,44. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного ресурсу видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001