

М.М. Чепурний С.Й. Ткаченко

**ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА
В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ**

1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Вінницький національний технічний університет

М.М. Чепурний, С.Й. Ткаченко

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА
В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.090510; 7.000008; 7.090258; 7.092108. Протокол № 2 від 30 вересня 2004р.

Вінниця ВНТУ 2005

Рецензенти:

А.Ф. Пономарчук, доктор технічних наук, професор

Є.С. Корженко, кандидат технічних наук, доцент

В.В. Бужинський, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного технічного університету Міністерство освіти і науки України

Чепурний М.М., Ткаченко С.Й.

Ч 44 Технічна термодинаміка в прикладах і задачах. (Навчальний посібник) – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 132 с.

Наведені приклади розв'язання задач з основних розділів технічної термодинаміки, сформовані задачі для самостійного розв'язання в процесі засвоєння дисципліни.

УДК 621.1:536.7

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 Властивості ідеальних газів і газових сумішей.....	5
1.1 Приклади розв'язання задач.....	5
1.2 Задачі для самостійної роботи.....	10
2. Термодинамічні процеси ідеальних газів.....	15
2.1 Приклади розв'язання задач.....	15
2.2 Задачі для самостійної роботи.....	25
3 Термодинамічні процеси з водяною парою.....	32
3.1 Приклади розв'язання задач.....	32
3.2 Задачі для самостійної роботи.....	44
4 Термодинамічні процеси з вологим повітрям.....	48
4.1 Приклади розв'язання задач.....	48
4.2 Задачі для самостійної роботи.....	56
5 Термодинамічні процеси витікання газів і пари.....	59
5.1 Приклади розв'язання задач.....	59
5.2 Задачі для самостійної роботи.....	62
6 Стиск газів в компресорах.....	65
6.1 Приклади розв'язання задач.....	65
6.2 Задачі для самостійної роботи.....	68
7 Цикли газотурбінних установок.....	71
7.1 Приклади розв'язання задач.....	71
7.2 Задачі для самостійної роботи.....	77
8 Цикли паротурбінних установок.....	80
8.1 Приклади розв'язання задач.....	80
8.2 Задачі для самостійної роботи.....	91
9 Цикли двигунів внутрішнього згорання.....	97
9.1 Приклади розв'язання задач.....	97
9.2 Задачі для самостійної роботи.....	102
10 Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.....	106
10.1 Приклади розв'язання задач.....	106
10.2 Задачі для самостійної роботи.....	111
Література.....	119
Додатки.....	120

ПЕРЕДМОВА

Перебудова навчального процесу у вищій школі і, зокрема, скорочення аудиторних годин, віддає пріоритетну роль самостійній підготовці студентів, яка стає одним із головних засобів професійної підготовки. Це потребує відповідного методичного забезпечення, яке б орієнтувало студентів як на придбання необхідних фундаментальних знань, так і практичних навиків розв'язування інженерних задач.

Основна мета запропонованого навчального посібника – допомогти студентам в процесі самостійної роботи оволодіти методикою розрахунків окремих термодинамічних процесів і циклів теплосилових установок, а також більш складних комбінованих об'єктів.

Посібник містить різноманітні за тематикою і мірою складності задачі, які охоплюють всі основні розділи дисципліни. "Технічна термодинаміка". Темі багатьох задач запозичені зі спеціальних дисциплін, які вивчаються на подальших курсах, з метою їх наближення до майбутнього фаху. Автори, наскільки це можливо, намагались відійти від розв'язування простих типових задач, які часто-густо пропонуються в попередніх виданнях, і включити сучасні термодинамічні методи термодинамічного аналізу. Посібник оснащений необхідним довідковим матеріалом, який наведений в додатках.

Під час самостійної роботи студентам необхідно розв'язати певний набір задач із кожного розділу. Для успішного виконання завдання на самостійну роботу перш за все треба вивчити (повторити) теоретичний матеріал за рекомендованою літературою. Після цього ознайомитись з прикладами розв'язування задач, наведеними в даному посібнику та в [1] і лише тоді розпочинати розв'язування задач. Необхідну допомогу і роз'яснення студент отримує від викладача на консультаціях, а в призначений термін звітує про виконання самостійної роботи.

1 ВЛАСТИВОСТІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ І ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

1.1 Приклади розв'язання задач

Задача 1.1.1. Манометричний тиск в балоні з киснем 9 МПа. Після витрати частини кисню цей тиск зменшився до 6,8 МПа. Визначити масу витраченого кисню, зміну внутрішньої енергії та роботу зміни тиску, якщо об'єм балона 20 л, барометричний тиск 740 мм.рт.ст., а температура в балоні зменшилась від 20 до 10°C.

Розв'язування

Значення атмосферного тиску, бар

$$P_{\text{атм}} = P_{\text{бар}}/750 = 740/750 = 0,986$$

$$\text{або } P_{\text{атм}} = 0,0986 \text{ МПа.}$$

Абсолютні тиски кисню в балоні, МПа :

до витрати газу

$$P_{1a} = P_{1m} + P_{\text{атм}} = 9 + 0,986 = 9,986;$$

після витрати газу

$$P_{2a} = P_{2m} + P_{\text{атм}} = 6,8 + 0,986 = 7,786.$$

Газова стала кисню, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314/\mu = 8,314/32 = 0,2598.$$

Маси газу в балоні з рівняння стану, кг:

до витрати газу

$$M_1 = P_{1a} \cdot V / (RT_1) = 9,986 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3} / (0,2598 \cdot 293) = 2,623;$$

після витрати газу

$$M_2 = P_{2a} \cdot V / (RT_2) = 7,786 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3} / (0,2598 \cdot 293) = 2,118.$$

Маса витраченого кисню, кг

$$\Delta M = M_1 - M_2 = 2,623 - 2,118 = 0,505.$$

Робота зміни тиску (роб'ота, яка витрачена на випуск газу з балона), кДж

$$L_p = \Delta M \cdot \int_{P_1}^{P_2} V \cdot dP = \Delta M \cdot V \int_{P_1}^{P_2} dP =$$

$$= \Delta M \cdot V (P_1 - P_2) = 0,505 \cdot 20 \cdot 10^{-3} (9,986 - 7,786) \cdot 10^3 = 202,22.$$

Ізохорні масові теплоємності кисню для початкової та кінцевої температури визначаємо за формулами в додатку В, кДж/(кг·К)

$$C_{mv}|_{20} = 0,6527 + 1,2724 \cdot t_1 \cdot 10^{-4} = 0,6527 + 1,2724 \cdot 20 \cdot 10^{-4} = 0,6552;$$

$$C_{mv}|_{10} = 0,6527 + 1,2724 \cdot t_2 \cdot 10^{-4} = 0,6527 + 1,2724 \cdot 10 \cdot 10^{-4} = 0,6539.$$

Зміна внутрішньої енергії газу в процесі, кДж

$$\Delta U = \Delta M (C_{mv}|_{20} \cdot t_2 - C_{mv}|_{10} \cdot t_1) = 0,505 (0,6539 \cdot 10 - 0,6552 \cdot 20) = -3,315.$$

Отже, внутрішня енергія кисню зменшується.

Задача 1.1.2. Розрідження в газоході котельного агрегату, яке вимірюється U-подібним манометром дорівнює 120 мм.рт.ст. Температура двоокису вуглецю в газоході зменшується на 240°C, а швидкість збільшується на 8 м/с. Вважаючи процес ізобарним, визначити зміну кінетичної та внутрішньої енергії газів, відводжувану теплоту та роботу зміни об'єму, якщо витрата газу за нормальних умов складає 10800 м³/год, а барометричний тиск 735 мм.рт.ст., початкова температура і швидкість 400°C та 6 м/с, відповідно.

Розв'язування

Значення атмосферного тиску, бар

$$P_{\text{атм}} = P_{\text{бар}}/750 = 735/750 = 0,98 \text{ або } P_{\text{атм}} = 98 \text{ кПа.}$$

Величина розрідження, кПа

$$P_{\text{роз}} = \rho \cdot g \cdot H = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 1,177.$$

Абсолютний тиск в газоході, кПа

$$P_a = P_{\text{атм}} - P_{\text{роз}} = 98 - 1,177 = 96,823.$$

Газова стала CO_2 , кДж/(кг·К)

$$R = 8,314/\mu = 8,314/44 = 0,18895.$$

Густина газу за нормальних умов, кг/м³

$$\rho_H = \rho_H/(RT_H) = 101,3/(0,18895 \cdot 273) = 1,9638.$$

Масова витрата газу, кг/с

$$M = V_H \cdot \rho_H/3600 = 10800 \cdot 1,9638/3600 = 5,89.$$

Зміна питомих об'ємів газу в газоході, кг/м³

$$\Delta v = v_2 - v_1 = (R \cdot T_2/P_a - R \cdot T_1/P_a) = R \cdot (T_2 - T_1)/P_a = 0,18895(200 - 400)/96,823 = -0,39.$$

Зміна об'ємів газу в газоході, м³

$$\Delta V = M \cdot \Delta v = 5,89 \cdot (-0,39) = -2,2988.$$

Робота зміни об'єму газу в процесі, кДж

$$L_v = [P dv = P] dv = P(v_2 - v_1) = P \cdot \Delta v = 96,823 \cdot (-2,2988) = -224,583.$$

Зміна кінетичної енергії газу, кДж

$$\Delta E_k = M \cdot (C_2^2 - C_1^2)/2 = 5,89 \cdot (14^2 - 6^2) \cdot 10^{-3}/2 = 0,471.$$

Ізобарну мольну теплоємність газу для початкової та кінцевої температури CO_2 визначаємо з додатка Б, кДж/(кмоль·К)

$$\mu C_{p,400} = 48,866; \mu C_{p,200} = 43,695.$$

Масові ізобарні теплоємності газу, кДж/(кг·К)

$$C_{pm,400} = \mu C_{p,400}/\mu = 48,866/44 = 1,11.$$

$$C_{pm,200} = \mu C_{p,200}/\mu = 43,695/44 = 0,933.$$

Масові ізохорні теплоємності газу, кДж/(кг·К)

$$C_{vm,400} = C_{pm,400}/k = 1,11/1,3 = 0,8538,$$

$$C_{vm,200} = C_{pm,200}/k = 0,993/1,3 = 0,7639,$$

де k – коефіцієнт Пуассона для триатомних газів.

Відвожувана теплота, кДж

$$Q = M(C_{pm,200} \cdot t_2 - C_{pm,400} \cdot t_1) = 5,89(0,993 \cdot 200 - 1,11 \cdot 400) = -1445,4.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж

$$\Delta U = M(C_{vm,200} \cdot t_2 - C_{vm,400} \cdot t_1) = 5,89(0,7639 \cdot 200 - 0,8538 \cdot 400) = -1214,67.$$

Перевіряємо баланс енергії, кДж

$$Q = \Delta U + L_v = -1214,67 + (-224,58) = -1439,25.$$

Розбіжність складає 0,42%.

Задача 1.1.3 Поршневий компресор з циліндром діаметра $D=140$ мм і ходом поршня $S=160$ мм ізотермічно стискає повітря до p -ятикратного збільшення густини. Визначити відстань, яку долає поршень в процесі стиску, силу, яка діє на поршень, теоретичну потужність компресора, зміну ентропії та витрату охолодної води, якщо витрата повітря з початковими пара-

метрами: $P_1 = 98 \text{ кПа}$, $t_1 = 27^\circ\text{C}$ складає $W = 1080 \text{ м}^3/\text{год}$, а підігрів охолодної води $\Delta t_{\text{ов}} = 8^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Газова стала повітря, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

$$R = 8,314/\mu = 8,314/28,96 = 0,287.$$

Густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_1 = P_1/(RT_1) = 98/(0,287 \cdot 300) = 1,1378.$$

Площа поршня, м^2

$$f = \pi \cdot D^2/4 = 0,785 \cdot 0,14^2 = 0,015386.$$

Об'єм газу під поршнем до стиску, м^3

$$V_1 = f \cdot S = 0,015386 \cdot 0,16 = 2,46 \cdot 10^{-3}.$$

За законом Бойля-Маріотта для ізоермічного процесу справедливо

$$P_2/P_1 = V_1/V_2 = \rho_2/\rho_1, \text{ тоді кінцевий тиск повітря, кПа}$$

$$P_2 = P_1(\rho_2/\rho_1) = 98 \cdot 5 = 490.$$

Об'єм повітря під поршнем після стиску, м^3

$$V_2 = V_1(\rho_1/\rho_2) = 2,46 \cdot 10^{-3}/5 = 0,492 \cdot 10^{-3}.$$

Відстань, яку долає поршень в процесі стиску, м

$$X_n = V_2/f = 0,492 \cdot 10^{-3}/0,015386 = 0,032.$$

Сила, яка діє на поршень, кН

$$F = P_2 \cdot f = 490 \cdot 0,015386 = 7,539.$$

Масова витрата повітря, $\text{кг}/\text{с}$

$$M = W \cdot \rho_2/3600 = 1080 \cdot 1,1378/3600 = 0,3413.$$

Питома робота в процесі ізоермічного стиску, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\ell = RT \cdot \ln(P_1/P_2) = 0,287 \cdot 300 \cdot \ln(1/5) = -137,57.$$

Від'ємний знак вказує на витрачену роботу.

Теоретична потужність компресора, кВт

$$N = M \cdot \ell = 0,3413 \cdot 137,57 = 47,295.$$

Для ізоермічного процесу $N = Q$, тоді витрата охолодної води дорівнюватиме, $\text{кг}/\text{с}$

$$G_{\text{ов}} = Q/(C_p \Delta t_{\text{ов}}) = 47,295/(4,187 \cdot 8) = 1,41.$$

Питома зміна ентропії, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

$$\Delta S = q/T = \ell/T = -137,57/300 = -0,4585.$$

Отже, в процесі стиску ентропія зменшується.

Задача 1.1.4 Потік продуктів згорання палива (димових газів) з витратою $10800 \text{ м}^3/\text{год}$, об'ємний склад яких дорівнює, % : $\text{CO} = 2$, $\text{CO}_2 = 18$, $\text{H}_2\text{O} = 5$, $\text{N}_2 = 75$ підігріває живильну воду в економайзері від 105 до 200°C . Нехтуючи тепловими втратами в економайзері і вважаючи процес нагріву води ізобарним, визначити витрату живильної води і характеристики суміші, якщо початкова і кінцева температура димових газів 600 і 300°C , а тиск $0,0985 \text{ МПа}$.

Розв'язування

Позначимо компоненти суміші газів порядковими номерами. Об'ємні частки газової суміші

$$r_{CO}=r_1=CO/100=2/100=0,02;$$

$$r_{CO_2}=r_2=CO_2/100=18/100=0,18;$$

$$r_{H_2O}=r_3=H_2O/100=5/100=0,05;$$

$$r_{N_2}=r_4=N_2/100=75/100=0,75.$$

Уявна молекулярна маса суміші, кг/кмоль

$$\mu_{cm}=r_1 \cdot \mu_1 + r_2 \cdot \mu_2 + r_3 \cdot \mu_3 + r_4 \cdot \mu_4 = 0,02 \cdot 28 + 0,18 \cdot 44 + 0,05 \cdot 18 + 0,75 \cdot 28 = 30,42.$$

Газова стала суміші, кДж/(кг·К)

$$R_{cm} = 8,314 / \mu_{cm} = 8,314 / 30,42 = 0,2733.$$

Густина димових газів на вході в економайзер, кг/м³

$$\rho_1 = P / (R_{cm} T_1) = 98,5 / (0,2733 \cdot 873) = 0,4128.$$

Масова витрата димових газів, кг/с

$$M = V \cdot \rho_1 / 3600 = 10800 \cdot 0,4128 / 3600 = 12,385.$$

Масові частки суміші

$$g_1 = r_1 \cdot \mu_1 / \mu_{cm} = 0,02 \cdot 28 / 30,42 = 0,01841;$$

$$g_2 = r_2 \cdot \mu_2 / \mu_{cm} = 0,18 \cdot 44 / 30,42 = 0,2604;$$

$$g_3 = r_3 \cdot \mu_3 / \mu_{cm} = 0,05 \cdot 18 / 30,42 = 0,0296;$$

$$g_4 = r_4 \cdot \mu_4 / \mu_{cm} = 0,75 \cdot 28 / 30,42 = 0,6903.$$

Користуючись додатком Б, визначаємо ізобарні масові теплоємності компонентів суміші на вході в економайзер і на виході з нього, кДж/(кг·К)

$$C_{pm1/600} = \mu \cdot C_{p1} / \mu_1 = 32,406 / 28 = 1,157;$$

$$C_{pm2/600} = \mu \cdot C_{p2} / \mu_2 = 52,459 / 44 = 1,192;$$

$$C_{pm3/600} = \mu \cdot C_{p3} / \mu_3 = 39,667 / 18 = 2,2;$$

$$C_{pm4/600} = \mu \cdot C_{p4} / \mu_4 = 31,779 / 28 = 1,135;$$

$$C_{pm1/300} = \mu \cdot C_{p1} / \mu_1 = 30,258 / 28 = 1,08;$$

$$C_{pm2/300} = \mu \cdot C_{p2} / \mu_2 = 46,522 / 44 = 1,057;$$

$$C_{pm3/300} = \mu \cdot C_{p3} / \mu_3 = 36,04 / 18 = 2;$$

$$C_{pm4/300} = \mu \cdot C_{p4} / \mu_4 = 29,816 / 28 = 1,064.$$

Ізобарні масові теплоємності суміші димових газів на вході в економайзер і на виході з нього, кДж/(кг·К)

$$C_{rcm} = g_1 \cdot C_{pm1/600} + g_2 \cdot C_{pm2/600} + g_3 \cdot C_{pm3/600} + g_4 \cdot C_{pm4/600} = 0,01841 \cdot 1,157 + 0,2604 \cdot 1,192 + 0,0296 \cdot 2,2 + 0,6903 \cdot 1,135 = 1,179;$$

$$C_{rcm} = g_1 \cdot C_{pm1/300} + g_2 \cdot C_{pm2/300} + g_3 \cdot C_{pm3/300} + g_4 \cdot C_{pm4/300} = 0,01841 \cdot 1,08 + 0,2604 \cdot 1,057 + 0,0296 \cdot 2 + 0,6903 \cdot 1,064 = 1,088.$$

Теплова потужність, яку віддають димові гази в економайзері, кВт

$$Q = M(C_{rcm} t_1 - C_{rcm} t_2) = 12,385(1,179 \cdot 600 - 1,088 \cdot 300) = 4718,685.$$

Ентальпії живильної води на вході в економайзер і на виході з нього визначаємо з додатка Д, кДж/кг

$$h_1 = 440,2; h_2 = 943,7.$$

Витрати живильної води з рівняння теплового балансу економайзера, кг/с

$$G_B = Q / (h_2 - h_1) = 4718,685 / (943,7 - 440,2) = 9,3717$$

$$\text{або } G_B = 93717 \cdot 3,6 = 33,738 \text{ т/год.}$$

Задача 1.1.5 Об'ємні частки продуктів згорання палива в камері згорання газотурбінної установки (ГТУ) складають: $\gamma_{\text{CO}_2}=0,16$, $\gamma_{\text{O}_2}=0,05$, $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}=0,05$, $\gamma_{\text{N}_2}=0,74$. Температура димових газів в камері дорівнює 1900°C . За паспортними даними ГТУ температура газів, які надходять в газову турбіну не повинна перевищувати 900°C . Тому продукти згорання охолоджуються потоком повітря із компресора ГТУ з температурою 200°C . Визначити об'ємну витрату повітря і об'ємний склад утвореної газоповітряної суміші, якщо об'ємна витрата продуктів згорання дорівнює $19800 \text{ м}^3/\text{год}$.

Розв'язування

Позначивши як і в попередній задачі компоненти продуктів згорання порядковими номерами, визначемо уявну молекулярну масу продуктів згорання, $\text{кг}/(\text{кмоль})$

$$\mu_{\text{пр}} = \gamma_1 \cdot \mu_1 + \gamma_2 \cdot \mu_2 + \gamma_3 \cdot \mu_3 + \gamma_4 \cdot \mu_4 = 0,16 \cdot 44 + 0,05 \cdot 32 + 0,05 \cdot 18 + 0,74 \cdot 28 = 30,26.$$

Масові частки компонентів продуктів згорання:

$$g_1 = \gamma_1 \cdot \mu_1 / \mu_{\text{пр}} = 0,16 \cdot 44 / 30,26 = 0,2326;$$

$$g_2 = \gamma_2 \cdot \mu_2 / \mu_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 32 / 30,26 = 0,05287;$$

$$g_3 = \gamma_3 \cdot \mu_3 / \mu_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 18 / 30,26 = 0,02974;$$

$$g_4 = \gamma_4 \cdot \mu_4 / \mu_{\text{пр}} = 0,74 \cdot 28 / 30,26 = 0,6847.$$

Користуючись додатком Б, за аналогією із задачею 1.4 визначаємо ізобарні масові теплоємності компонентів продуктів згорання для $t=1900$ і $t=900^\circ\text{C}$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$

$$C_{\text{pm}1/1900} = 60,486/44 = 1,3747; C_{\text{pm}1/900} = 55,96/44 = 1,272;$$

$$C_{\text{pm}2/1900} = 38,18/32 = 1,193; C_{\text{pm}2/900} = 35,588/32 = 1,112;$$

$$C_{\text{pm}3/1900} = 52,384/18 = 2,91; C_{\text{pm}3/900} = 43,519/18 = 2,417;$$

$$C_{\text{pm}4/1900} = 36,07/28 = 1,288; C_{\text{pm}4/900} = 33,461/28 = 1,23.$$

Різниця ентальпій компонентів продуктів згорання в процесі охолодження, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\Delta h_1 = C_{\text{pm}1/1900} \cdot 1900 - C_{\text{pm}1/900} \cdot 900 = 1,3747 \cdot 1900 - 1,272 \cdot 900 = 1467,13;$$

$$\Delta h_2 = C_{\text{pm}2/1900} \cdot 1900 - C_{\text{pm}2/900} \cdot 900 = 1,193 \cdot 1900 - 1,112 \cdot 900 = 1265,9;$$

$$\Delta h_3 = C_{\text{pm}3/1900} \cdot 1900 - C_{\text{pm}3/900} \cdot 900 = 2,91 \cdot 1900 - 2,417 \cdot 900 = 3353,7;$$

$$\Delta h_4 = C_{\text{pm}4/1900} \cdot 1900 - C_{\text{pm}4/900} \cdot 900 = 1,288 \cdot 1900 - 1,23 \cdot 900 = 1340,2.$$

Зміна ентальпії продуктів згорання, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\Delta h_{\text{пр}} = g_1 \cdot \Delta h_1 + g_2 \cdot \Delta h_2 + g_3 \cdot \Delta h_3 + g_4 \cdot \Delta h_4 = 0,2326 \cdot 1467,13 + 0,05287 \cdot 1265,9 + 0,02974 \cdot 3353,7 + 0,6847 \cdot 1340,2 = 1425,55.$$

Ізобарні масові теплоємності повітря для $t=900^\circ\text{C}$ і $t=200^\circ\text{C}$, відповідно, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$

$$C_{\text{pm}/900} = 33,907/28,96 = 1,17; C_{\text{pm}/200} = 29,68/28,96 = 1,024.$$

Зміна ентальпії повітря в процесі змішування, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\Delta h_{\text{пв}} = C_{\text{pm}/900} \cdot 900 - C_{\text{pm}/200} \cdot 200 = 1,17 \cdot 900 - 1,024 \cdot 200 = 848,2.$$

Позначивши масову частку продуктів згорання в газоповітряній суміші через g , запишемо рівняння теплового балансу

$$g_r \cdot \Delta h_{\text{пр}} = (1 - g_r) \cdot \Delta h_{\text{пр}}, \text{ або } g_r \cdot 1425,55 = (1 - g_r) \cdot 848,2$$

$$\text{звідки } g_r = 0,373; g_{\text{пр}} = 1 - g_r = 1 - 0,373 = 0,627.$$

Обчислюємо значення

$$\sum g_i / \mu_i = g_{\text{пр}} / \mu_{\text{пр}} + g_r / \mu_r = 0,627 / 28,96 + 0,373 / 30,26 = 0,034.$$

Об'ємні частки газоповітряної суміші

$$r_{\text{пр}} = (g_{\text{пр}} / \mu_{\text{пр}}) / (\sum g_i / \mu_i) = (0,373 / 30,26) / 0,034 = 0,3625.$$

$$r_{\text{пр}} = 1 - r_{\text{пр}} = 1 - 0,3625 = 0,6375.$$

Уявна молекулярна маса газоповітряної суміші, кг/кмоль

$$\mu_{\text{гмс}} = r_{\text{пр}} \cdot \mu_{\text{пр}} + r_{\text{пр}} \cdot \mu_{\text{пр}} = 0,3625 \cdot 30,26 + 0,6375 \cdot 28,96 = 29,43.$$

Газова стала повітряної суміші, кДж/(кг·К)

$$R_{\text{гмс}} = 8,314 / \mu_{\text{гмс}} = 8,314 / 29,43 = 0,2825.$$

Об'ємні частки продуктів згорання в газоповітряній суміші

$$r_{\text{CO}_2} = r_1 \cdot r_{\text{пр}} = 0,16 \cdot 0,3625 = 0,058;$$

$$r_{\text{O}_2} = r_2 \cdot r_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 0,3625 = 0,018125;$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = r_3 \cdot r_{\text{пр}} = 0,05 \cdot 0,3625 = 0,018125;$$

$$r_{\text{N}_2} = r_4 \cdot r_{\text{пр}} = 0,74 \cdot 0,3625 = 0,26825.$$

Об'ємна витрата газоповітряної суміші, м³/год

$$V_{\text{гмс}} = V_{\text{пр}} / r_{\text{пр}} = 19800 / 0,3625 = 54620,89.$$

Об'ємна витрата повітря на охолодження продуктів згорання, м³/год

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{гмс}} - V_{\text{пр}} = 54620,93 - 19800 = 34820,89.$$

1.2 Задачі для самостійної роботи

Задача 1.2.1. Об'єм двоокису вуглецю з температурою 423°C і манометричним тиском 0,75 МПа дорівнює 2 м³. Визначити кінцеву температуру і густину газу, зміну ентальпії та роботу зміни об'єму, якщо в ізобарному процесі його внутрішня енергія зменшилась на 2200 кДж, а барометричний тиск складає 737 мм.рт.ст.

Задача 1.2.2. В циліндрі під поршнем діаметром 400 мм міститься 1,5 кг двоокису вуглецю з температурою 400°C і манометричним тиском 0,4 МПа. В результаті підведення теплоти поршень ізобарно переміщується на 300 мм. Визначити початкову відстань поршня від кришки циліндра, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії і роботу розширення поршня, якщо барометричний тиск складає 740 мм.рт.ст.

Задача 1.2.3. Маса балона з двоокисом вуглецю дорівнює 10 кг. При цьому манометричний тиск складає 5 МПа. Після витрати частини газу температура в балоні залишилася сталою, а маса балона з газом зменшилася вдвічі. Визначити густину газу до і після його витрати, роботу зміни тиску, зміну ентропії, якщо манометричний тиск зменшився втричі, а показання барометра складає 745 мм.рт.ст.

Задача 1.2.4. Молярний об'єм двоатомного газу з тиском 2 кПа і

певною температурою T в 4,714 рази більший, ніж молярний об'єм газу за нормальних умов. Визначити температуру і рід газу, якщо його густину для даних P і T дорівнює $0,4167 \text{ кг/м}^3$.

Задача 1.2.5. В резервуар, об'єм якого дорівнює 10 м^3 , компресор з діаметром і ходом поршня $D=S=150 \text{ мм}$ нагнітає повітря з навколишнього середовища з параметрами $P=0,0985 \text{ МПа}$ і $t=15^\circ\text{C}$. Визначити за який час компресор заповнить резервуар до манометричного тиску в ньому $0,8 \text{ МПа}$ і температури газу 50°C , якщо нагнітання здійснюється за один оберт вала (два ходи поршня), а кількість обертів вала складає 540 об/хв .

Задача 1.2.6. В повітронагрівник котельного агрегата надходить повітря з температурою 20°C , яке нагрівається продуктами згорання палива (CO_2), температура яких зменшується від 350 до 150°C , а витрата складає $12600 \text{ м}^3/\text{год}$. Вважаючи процес нагрівання ізобарним, визначити до якої температури буде нагріватись повітря і зміну його внутрішньої енергії, якщо тиск повітря на вході в повітронагрівник за показаннями U – подібного манометра складає 140 мм.в.ст. , а барометричний тиск – 755 мм.рт.ст. .

Задача 1.2.7. Потік повітря з параметрами $P_1 = 0,5 \text{ МПа}$, $t_1=300^\circ\text{C}$ і витратою $7200 \text{ м}^3/\text{год}$ змішується з потоком повітря, параметри якого $P_1=5 \text{ бар}$ і $t_1=100^\circ\text{C}$, а витрата - $12600 \text{ м}^3/\text{год}$. Визначити температуру і густину повітря після змішування, а також зміну внутрішньої енергії кожного потоку і площу поперечного перерізу повітропровода, якщо швидкість суміші в ньому повинна дорівнювати 10 м/с .

Задача 1.2.8. В циліндрі під поршнем з діаметром 350 мм міститься 60 л азоту з параметрами $P=0,6 \text{ МПа}$ і $t=60^\circ\text{C}$. До якої величини повинна збільшитись сила, яка діє на поршень, щоб в разі підведення 60 кДж теплоти поршень залишався нерухомим? Визначити також кінцеву температуру газу і зміну його ентальпії.

Задача 1.2.9. Нагнітач перекачує $7200 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря з параметрами $P=760 \text{ мм.рт.ст.}$ і $t=50^\circ\text{C}$ в повітропідігрівник, де його температура ізобарно підвищується на 50°C . Визначити теоретичну потужність нагнітача, підведену теплоту, зміну кінетичної та внутрішньої енергії, якщо крутильний момент на валу нагнітача $80 \text{ Н}\cdot\text{м}$, частота обертання вала $62,8 \text{ рад/с}$, а площа поперечного перерізу вхідного і вихідного каналу 1 м^2 і $0,2 \text{ м}^2$, відповідно.

Задача 1.2.10. В газотурбінній установці закритого типу робочим тілом є гелій. Робоче тіло з параметрами $P_1=780 \text{ мм.рт.ст.}$ і $t_1=50^\circ\text{C}$ спочатку ізотермічно стискається в компресорі до десятикратного зменшення об'єму, а потім підігрівається за умови $P=\text{const}$ в газонагрівнику до температури 500°C . Визначити параметри газу в процесах стиску і підігрівання, підведену теплоту, витрату газу, якщо теоретична потужність компресора 50 кВт .

Задача 1.2.11. У повітропроводі повітря з тиском 860 мм.рт.ст. ізобарно підігрівається від 20 до 25°C за допомогою електронагрівника поту-

жністю 1,25 кВт. Визначити витрату повітря, підведену теплоту, зміну кінетичної та внутрішньої енергії, якщо діаметр повітропровода 90 мм.

Задача 1.2.12. Молярний об'єм триатомного газу з температурою 500 К і певним тиском P вдвічі більший, ніж за нормальних умов. Визначити цей тиск і рід газу, якщо його питомий об'єм для заданих P і T складає $0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 1.2.13. Поршневим компресором з діаметром і ходом поршня $D=S=145 \text{ мм}$ повітря з параметрами $P=760 \text{ мм.рт.ст.}$ і $t=17^\circ\text{C}$ перекачується в резервуар, об'єм якого 2 м^3 . Визначити частоту обертання вала компресора, якщо за 15 хв. роботи компресора тиск в резервуарі змінився від 0,6 до 4 МПа, а температура підвищилась на 3°C в порівнянні з температурою навколишнього повітря.

Задача 1.2.14. Питома витрата палива на паротурбінну установку (ПТУ) потужністю 50 МВт складає $0,35 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$. Визначити об'ємну і масову подачу повітря вентилятором, якщо на спалювання 1 кг палива витрачається 12 м^3 повітря за нормальних умов. Визначити також зміну кінетичної енергії повітря в разі його підігріву на 100°C , якщо габарити паропроводу складають $1,1 \times 1,25 \text{ м}$.

Задача 1.2.15. У вертикальному циліндрі під поршнем перебуває двоокис вуглецю з температурою 30°C . Поршень навантажений важелем масою 75 кг, а його відстань від днища циліндра діаметром 15 см дорівнює 30 см. Визначити висоту підйому поршня в разі нагрівання газу до температури 60°C , якщо барометричний тиск складає 736 мм.рт.ст.

Задача 1.2.16. В економайзері котельного агрегата живильна вода підігрівается від 100 до 200°C продуктами згорання палива (CO_2), які охолоджуються від 500 до 300°C , а витрата яких складає $36000 \text{ м}^3/\text{год}$. Визначити витрату живильної води, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, кінетичної та потенціальної енергії газу, якщо розрідження на вході та виході економайзера складає 40 і 70 мм.вод.ст., а площа поперечного перерізу для проходу газу 1,6 і $0,7 \text{ м}^2$, відповідно, $P_6=740 \text{ мм.рт.ст.}$

Задача 1.2.17. Потік повітря з параметрами $P_1=0,25 \text{ МПа}$, $t_1=20^\circ\text{C}$ і витратою $5400 \text{ м}^3/\text{год}$ змішується з потоком повітря, параметри якого $P_2=0,25 \text{ МПа}$ і $t_2=350^\circ\text{C}$. Визначити витрату суміші, зміну внутрішньої енергії та ентальпії обох потоків, якщо температура суміші має складати 130°C .

Задача 1.2.18. Нагнітач перекачує повітря з параметрами $P=0,12 \text{ МПа}$. і $t=25^\circ\text{C}$ в повітропідігрівник, де воно ізобарно нагрівається до температури 100°C . Визначити витрату повітря, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентальпії, площу для проходу повітря, якщо крутильний момент на валу нагнітача 75 Нм, кількість обертів вала 740 об/хв, потужність нагнітача 0,45 МВт, швидкість повітря – 10 м/с.

Задача 1.2.19. В циліндрі під поршнем, діаметр якого дорівнює 505 мм, міститься 2 кг повітря з температурою 227°C . Поршень зрівноважений силою 2000 кН. За рахунок підведення теплоти поршень пересува-

ється на відстань 400 мм при $P = \text{const}$. Визначити підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, роботу зміни об'єму, якщо барометричний тиск складає 750 мм.рт.ст.

Задача 1.2.20. В циліндрі під поршнем, діаметр якого дорівнює 400 мм міститься 100 л окису вуглецю з температурою 150°C і манометричним тиском 0,5 МПа. До якої величини повинна збільшитись сила, яка утримує поршень в нерухомості, якщо в разі підведення теплоти його внутрішня енергія збільшиться на 100 кДж, а барометричний тиск складає 740 мм.рт.ст.

Задача 1.2.21. Масовий склад суміші дорівнює, %: $\text{CO}_2=14$, $\text{O}_2=10$, $\text{N}_2=76$. Визначити об'ємні частки, газову сталу, густину суміші за нормальних умов, а також до якого тиску треба стиснути цю суміш, щоб густина її складала $1,8 \text{ кг/м}^3$ при $t=300^{\circ}\text{C}$.

Задача 1.2.22. Масовий склад суміші дорівнює, %: $\text{CO}_2=50$, $\text{O}_2=25$, $\text{N}_2=25$. Визначити об'ємні частки, газову сталу, густину суміші за нормальних умов, а також кінцеву температуру в разі ізобарного охолодження, якщо маса суміші 10 кг, температура 200°C , а відведена теплота 360 кДж.

Задача 1.2.23. Об'ємний склад газу дорівнює, %: $\text{CH}_4=45$, $\text{H}_2=45$, $\text{CO}=10$. Цей газ змішується з повітрям у співвідношенні 1 кг газу на 13 кг повітря. Визначити уявну молекулярну масу, газову сталу і густину суміші за нормальних умов, а також для $P=0,14 \text{ МПа}$, $t=30^{\circ}\text{C}$.

Задача 1.2.24. Потік повітря з витратою $72000 \text{ м}^3/\text{год}$ і температурою 120°C змішується з потоком димових газів з витратою 300 кг/год і температурою 600°C . Визначити масові та об'ємні частки суміші, її густину і температуру, ізобарну теплоємність, якщо тиск суміші 120 кПа, а газова стала димових газів $0,3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Задача 1.2.25. Потік окису вуглецю з витратою 360 кг/год і температурою 500°C змішується з потоком кисню з витратою $5000 \text{ м}^3/\text{год}$ і температурою 150°C , а також з потоком повітря з температурою 220°C . Визначити витрату повітря, масові та об'ємні частки суміші, її густину і газову сталу, якщо тиск суміші 12 кПа, а температура суміші 300°C .

Задача 1.2.26. Об'ємний склад сухих продуктів згорання палива дорівнює, %: $\text{CO}_2=14$, $\text{O}_2=8$, $\text{N}_2=78$. Визначити масові частки, газову сталу, густину газів та ізобарну теплоємність, якщо температура суміші 900°C , а барометричний тиск 740 мм.рт.ст.

Задача 1.2.27. Масовий склад суміші дорівнює, %: $\text{CO}_2=18$, $\text{O}_2=12$, $\text{N}_2=70$. Визначити об'ємні частки, газову сталу, густину суміші за нормальних умов, а також тиск, до якого треба її стиснути, щоб при температурі 190°C 10 кг суміші займали об'єм $4,5 \text{ м}^3$.

Задача 1.2.28. В резервуарі ємністю 120 м^3 міститься газ, об'ємний склад якого дорівнює, %: $\text{H}_2=45$, $\text{CH}_4=33$, $\text{CO}=15$, $\text{N}_2=7$. Після витрати частини газу тиск в резервуарі зменшився від 0,6 МПа до 0,3 МПа, а температура від 20°C до 12°C . Визначити газову сталу, масові частки і густину суміші, а також кількість витраченої суміші.

Задача 1.2.29. Визначити масовий і об'ємний склад суміші, яка складається з двоокису вуглецю і азоту, якщо відомо : парціальний тиск $\text{CO}_2 = 0,12$ МПа, тиск суміші $0,4$ МПа, а її температура дорівнює 27°C .

Задача 1.2.30. Масовий склад суміші дорівнює, %: $\text{CO}_2=18$, $\text{O}_2=12$, $\text{N}_2=70$. Визначити об'ємний склад суміші, газову сталу, густину суміші за нормальних умов, а також тиск, до якого треба її стиснути, щоб густина збільшилась в 7 разів. Визначити також теплоємність суміші за умови, що її температура збільшилась в три рази.

Задача 1.2.31. В балоні міститься 8 кг газової суміші, яка складається з азоту і двоокису вуглецю. Газова стала суміші складає $0,297$ кДж/(кг·К), а об'єм балона 50 л. Визначити об'ємні частки суміші та її густину за нормальних умов, а також до якої температури можна нагріти суміш, якщо граничний тиск в балоні складає 13 МПа.

Задача 1.2.32. Газова стала суміші азоту і водню складає $0,8$ кДж/(кг·К). Визначити масові та об'ємні частки суміші, парціальні тиски газів, якщо тиск суміші 1200 мм.рт.ст.

Задача 1.2.33. Газова суміш, яка складається із $1,4$ кг окису вуглецю і $2,2$ кг окису сірки міститься в циліндрі з рухомим поршнем при $P=1$ МПа і $t=60^\circ\text{C}$. Визначити зміну об'єму суміші, якщо тиск суміші зменшиться вдвічі, а температура збільшиться втричі. Визначити також зміну внутрішньої енергії суміші в процесі.

Задача 1.2.34. Суміш із кисню і водню має густину $0,7$ кг/м³ за умови, що $P=0,16$ МПа і $t=30^\circ\text{C}$. Визначити масові та об'ємні частки суміші, її газову сталу та ізобарну теплоємність.

Задача 1.2.35. Скільки аміаку можна отримати з 1 м³ суміші азоту і водню, якщо $P=0,2$ МПа, $t=20^\circ\text{C}$, а густина суміші за цих умов дорівнює $3,66$ кг/м³? Визначити також ізобарну та ізохорну теплоємність суміші для $t=50^\circ\text{C}$.

Задача 1.2.36. Суміш, об'ємний склад якої дорівнює, %: $\text{H}_2 = 45$, $\text{CH}_4=35$, $\text{CO} = 15$, $\text{N}_2 = 5$ міститься в резервуарі ємністю 100 м³ при $P=0,4$ МПа, $t=25^\circ\text{C}$. Після витрати частини газу тиск зменшився вдвічі. Визначити масу витраченої суміші та зміну її внутрішньої енергії.

Задача 1.2.37. В результаті спалювання вуглецю в середовищі кисню отримана суміш, масові частки якої складають: $g_{\text{CO}_2}=0,75$, $g_{\text{CO}}=0,25$. Визначити скільки вуглецю було витрачено, якщо спалювання відбувалось в камері об'ємом 40 л за умови, що $P=3$ МПа, а $t=40^\circ\text{C}$.

Задача 1.2.38. В циліндрі газового двигуна для спалювання 1 кг газоподібного палива витрачається $15,5$ кг повітря. Параметри утвореної паливовоздушної суміші складають: $P=98$ кПа, $t=85^\circ\text{C}$. Визначити об'ємні частки суміші, її теплоємність і густину, якщо молекулярна маса паливно-го газу складає 18 кг/кмоль.

Задача 1.2.39. Вологе повітря являє собою суміш сухого повітря і водяної пари. Визначити густину вологого повітря, якщо в 1 кг сухого повітря міститься 25 г водяної пари за умови $P=760$ мм.рт.ст., $t=35^\circ\text{C}$. Визна-

чити також газову сталу і ентальпію вологого повітря.

Задача 1.2.40. Визначити густину, газову сталу і ентальпію вологого повітря, якщо відомо: $P = 740$ мм.рт.ст., $t = 70^\circ\text{C}$, а парціальний тиск водяної пари дорівнює 25 кПа.

2 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

2.1 Приклади розв'язання задач

Задача 2.1.1. Балон з киснем ємністю 30 л перебував у приміщенні з температурою 9°C . Балон перенесли в приміщення з температурою 25°C . Визначити яку масу кисню потрібно випустити з балона за умови, що допустимий надлишковий тиск в балоні дорівнює 12 МПа, а барометричний тиск складає 735 мм.рт.ст. Визначити зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, вважаючи теплоємність сталою.

Розв'язування

Допустимий абсолютний тиск в балоні, бар, кПа

$$P_0 = P_n + P_6 = 120 + 735 / 750 = 120,98$$

або $P_d = 12098$ кПа.

Газова стала кисню, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 32 = 0,2598.$$

Ізохорна теплоємність кисню, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / (k - 1) = 0,2598 / (1,4 - 1) = 0,6495.$$

Початкова маса газу в балоні, кг

$$M_1 = \frac{P_0 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{12098 \cdot 0,03}{0,2598 \cdot 282} = 4,937.$$

Маса газу в балоні за умови допустимого тиску і кінцевої температури, кг

$$M_2 = (P_0 \cdot V) / (R \cdot T_2) = (12098 \cdot 0,03) / (0,2598 \cdot 298) = 4,687.$$

Маса газу, яку треба випустити з балона, кг

$$\Delta M = M_1 - M_2 = 4,937 - 4,687 = 0,25.$$

Для ізохорного процесу теплота, яка витрачена на нагрівання балона, дорівнює зміні внутрішньої енергії, тобто, кДж

$$\Delta U = Q = M_1 \cdot C_v (T_2 - T_1) = 4,937 \cdot 0,6495 (25 - 9) = 103,96.$$

Зміна ентальпії, кДж

$$\Delta H = H_2 - H_1 = M_1 \cdot C_p (T_2 - T_1) = M_1 \cdot C_v \cdot k (T_2 - T_1) = M_1 \cdot k \cdot \Delta U = k \cdot \Delta U = 1,4 \cdot 103,96 = 145,55.$$

Зміна ентропії, кДж/(кг·К)

$$\Delta S = M_1 \cdot C_v \cdot \ln(T_2 / T_1) = 4,937 \cdot 0,6495 \cdot \ln(298 / 282) = 0,1769.$$

Зміна ексергії в процесі, кДж

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \cdot \Delta S = 145,55 - 298 \cdot 0,1769 = 92,816.$$

Задача 2.1.2. В циліндрі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) до повітря підводиться 0,90 кДж теплоти. Визначити відстань, яку долає поршень діаметром 70 мм в процесі ізобарного розширення, роботу поршня, зміну внутрішньої енергії, ентropії та ексергії, якщо об'єм камери стиску 260 см^3 , а тиск і температура повітря в камері 1 МПа і 550°C , відповідно, $t_{\text{н.с}} = 15^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Газова стала повітря, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 28,96 = 0,287.$$

Маса повітря в камері стиску, кг

$$M = \frac{P \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 260 \cdot 10^{-6}}{0,287 \cdot 823} = 1,1 \cdot 10^{-3}.$$

Приймаємо орієнтовно з подальшим уточненням кінцеву температуру повітря $t_{2\text{р}} = 1300^\circ\text{C}$.

Середня температура в процесі підведення теплоти, $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{ср}} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(550 + 1300) = 925.$$

Середня ізобарна масова теплоємність за формулою з додатка В, кДж/(кг·К)

$$\bar{C}_{\text{pm}} = 0,9952 + 9,349 \cdot 925 \cdot 10^{-4} = 1,088.$$

Зміна температур в процесі підведення теплоти, $^\circ\text{C}$

$$\Delta t = Q / M \cdot \bar{C}_{\text{pm}} = 0,9 / 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,088 = 752.$$

Значення кінцевої температури, $^\circ\text{C}$

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 550 + 752 = 1302.$$

Оскільки $t_{2\text{р}} \approx t_2$, то уточнювати розрахунки t_2 не потрібно.

Робота переміщення поршня, кДж

$$L_V = M \cdot R \cdot \Delta t = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,287 \cdot 752 = 0,2374.$$

Оскільки $P(V_2 - V_1) = L_V = M \cdot R \cdot \Delta t$, то зміна об'єму дорівнює, м^3

$$\Delta V = V_2 - V_1 = L_V / P = 0,2374 / 1000 = 0,2374 \cdot 10^{-3}.$$

Площа поршня, м^2

$$f = \pi D^2 / 4 = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,07^2 = 3,846 \cdot 10^{-3}.$$

Відстань, яку долає поршень, м

$$X = \Delta V / f = 0,2374 \cdot 10^{-3} / 3,846 \cdot 10^{-3} = 0,0617.$$

Зміна ентальпії, кДж

$$\Delta H = M \cdot \bar{C}_{\text{pm}} \cdot \Delta t = Q = 0,9.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж

$$\Delta U = Q - L_V = 0,9 - 0,2374 = 0,6626.$$

Зміна ентropії, кДж/К

$$\Delta S = M \cdot \bar{C}_{pm} \cdot \ln(T_2/T_1) = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,088 \cdot \ln(1575/823) = 0,776 \cdot 10^{-3}$$

Зміна ексергії, кДж

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \cdot \Delta S = 0,9 - 288 \cdot 0,776 \cdot 10^{-3} = 0,6768.$$

Задача 2.1.3. Визначити яка частка теплоти, що підводиться до триатомного ідеального газу в ізобарному процесі витрачається на виконання роботи, а яка – на зміну внутрішньої енергії.

Розв'язування

Рівняння першого закону термодинаміки $dq = du + d\ell$ може бути подано у вигляді

$$\ell = du/dq + d\ell/dq = \varphi + \Psi$$

Частка теплоти, яка витрачається на виконання роботи

$$\Psi = 1 - \varphi = 1 - du/dq \quad (2.1)$$

Для ізобарного процесу ідеальних газів

$$dq = C_p \cdot dT, \quad du = C_v \cdot dT \quad (2.2)$$

Тоді на підставі (2.1) і (2.2) одержимо

$$\Psi = 1 - \frac{C_v \cdot dT}{C_p \cdot dT} = 1 - \frac{1}{k} = 1 - \frac{1}{1,3} = 0,23$$

$$\varphi = 1 - \Psi = 1 - 0,23 = 0,77.$$

Отже, в ізобарному процесі 23% підведеної до триатомного газу теплоти витрачається на виконання роботи, а 77% - на зміну внутрішньої енергії. Легко показати, що для двоатомного газу $\Psi = 0,285$; $\varphi = 0,715$, а для одноатомного $\Psi = 0,4$; $\varphi = 0,6$.

Задача 2.1.4. Повітря з параметрами навколишнього середовища $P_1 = 755$ мм.рт.ст, $t_1 = 17^\circ\text{C}$ і витратою 1080 м³/год стискається до п'ятикратного збільшення густини в процесі, де теплоємність дорівнює нескінченності. Визначити кінцеві параметри повітря, потужність, яка витрачається на стиск, зміну ентропії та ексергії.

Розв'язування

Початковий тиск повітря, бар

$$P_1 = 755/750 = 1,01 \text{ або } P_1 = 101 \text{ кПа.}$$

Густина зовнішнього повітря, кг/м³

$$\rho_1 = P_1/R \cdot T_1 = 101/0,287 \cdot 290 = 1,2135.$$

Масова витрата повітря, кг/с

$$G = 1080 \cdot \rho_1/3600 = 1080 \cdot 1,2135/3600 = 0,364.$$

Оскільки $C = dq/dT$, то $C = \infty$, коли $dT = 0$ або $T = \text{const}$. Для ізо-термічного процесу $du = C_v \cdot dT = 0$; $dh = C_p \cdot dT = 0$; $d\ell = dq$;

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \text{ або } P_1 \cdot \rho_2 = P_2 \cdot \rho_1.$$

Тоді кінцевий тиск повітря, кПа

$$P_2 = P_1 \cdot (\rho_2 / \rho_1) = 101 \cdot 5 = 505.$$

Питома робота стиску, кДж/кг

$$l = RT \ln(P_1 / P_2) = 0,287 \cdot 290 \ln(0,2) = -133,95.$$

Від'ємний знак вказує на підведену (витрачену) роботу.

Споживана потужність, кВт

$$N = G \cdot l = 0,364 \cdot (-133,95) = -48,765$$

Оскільки $l = q = T \cdot \Delta S$ або $N = Q = T \cdot \Delta S$, то зміна ентропії дорівнює, кВт/К

$$\Delta S = N / T = -48,765 / 290 = -0,168,$$

тобто в процесі стиску ентропія зменшується.

Зміна ексергії, кВт

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \cdot \Delta S = 0 - 290(-0,168) = 48,765.$$

Отже, в процесі ізотермічного стиску ексергія зростає на величину підведеної потужності (роботи).

Задача 2.1.5. Зміна ентропії 1 кг азоту в процесі, де зміна внутрішньої енергії дорівнює зміні ентальпії, складає 0,477 кДж/(кг·К). Визначити кінцеві параметри азоту, роботу, зміну ексергії, якщо початкова густина складає 1,333 кг/м³, а початкова температура дорівнює температурі навколишнього середовища $t_{nc} = 27^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Для ідеальних газів $du = C_v \cdot dT$, $dh = C_p \cdot dT$.

Оскільки $C_p \neq C_v$ ($C_p = C_v + R$), то $du = dh$ лише за умови $dT = 0$, тобто в ізотермічному процесі

Газова стала азоту, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 28,016 = 0,2967.$$

Початковий тиск газу, кПа

$$P_1 = \rho_1 \cdot RT = 1,333 \cdot 0,2967 \cdot 300 = 118,68.$$

Запишемо формулу для зміни ентропії

$$\Delta S = R \ln(V_2 / V_1) \quad \text{або} \quad 0,477 = 0,2967 \ln(V_1 / V_2).$$

$$\text{звідки} \quad \ln(V_2 / V_1) = 0,477 / 0,2967 = 1,61.$$

$$\text{Тоді} \quad V_2 / V_1 = e^{1,61} = 5, \quad \text{або} \quad \rho_1 / \rho_2 = 5.$$

Кінцева густина азоту, кг/м³

$$\rho_2 = \rho_1 / 5 = 1,333 / 5 = 0,266.$$

Кінцевий питомий об'єм, кг/м³

$$v_2 = v_1 \cdot 5 = 1 / 1,333 \cdot 5 = 1 / 1,333 \cdot 5 = 3,75.$$

Якщо $V_2 > V_1$, а $\rho_2 < \rho_1$, то відбувається ізотермічне розширення газу. Оскільки $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$, то кінцевий тиск дорівнюватиме, кПа

$$P_2 = P_1 (V_1 / V_2) = 118,68 (1 / 5) = 23,736.$$

Питома теплота і робота розширення, кДж/кг

$$q = l = T \cdot \Delta S = 300 \cdot 0,477 = 143,1.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{н.с} \cdot \Delta S = \Delta h - l = 0 - 143,1 = -143,1.$$

Отже, в ізотермічних процесах розширення ексергія зменшується на величину виконаної роботи.

Задача 2.1.6. Повітряний акумулятор являє собою циліндр з рухомих поршнем, діаметр якого 300 мм, а хід – 500 мм. Визначити енергію, яку можна накопичити в акумуляторі в разі стискання повітря, силу яка діє на поршень, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, за умови, що теплоємність дорівнює нулю, якщо поршень долає відстань 400 мм, а початкові параметри повітря під поршнем складають: $P_1 = 0,1$ МПа; $\rho_1 = 1,185$ кг/м³

Розв'язування

Площа поршня, м²

$$f = \pi D^2 / 4 = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,3^2 = 7,065 \cdot 10^{-2}$$

Початковий і кінцевий об'єм повітря під поршнем, м³

$$V_1 = f \cdot S_1 = 7,065 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 = 3,5325 \cdot 10^{-2}$$

$$V_2 = f \cdot (S_1 - 0,4) = 7,065 \cdot 10^{-2} (0,5 - 0,4) = 7,065 \cdot 10^{-3}.$$

Співвідношення об'ємів

$$\varepsilon = V_1 / V_2 = 3,5325 / 0,7065 = 5.$$

Початкова температура повітря, К

$$T_1 = P_1 / (\rho_1 \cdot R) = 100 / (1,185 \cdot 0,287) = 294.$$

Оскільки $dq = C \cdot dT = T \cdot dS$, то $C = 0$ і $dS = 0$, за умови $dq = 0$. Отже, процес стискання повітря – адіабатний. Повітря вважається двоатомним газом, для якого показник степеня адіабати (коефіцієнт Пуассона) $k = 1,4$.

Робота зміни об'єму повітря, кДж

$$L_v = P_1 V_1 \left[1 - (V_1 / V_2)^{k-1} \right] / (k-1) =$$

$$= 100 \cdot 3,5325 \cdot 10^{-2} \left[1 - (5)^{1,4-1} \right] / (1,4-1) = -7,98.$$

Від'ємний знак вказує на роботу стиску.

Робота, яка витрачається на подолання атмосферного тиску, кДж

$$L_{ат} = P_1 (V_1 - V_2) = 100 (3,5325 - 0,7065) \cdot 10^{-2} = 2,826.$$

Корисна енергія, що накопичена в акумуляторі, кДж

$$L_{ак} = L_v - L_{ат} = 7,98 - 2,826 = 5,154.$$

Кінцевий тиск повітря під поршнем, кПа

$$P_2 = P_1 (V_1 / V_2)^k = P_1 \cdot \varepsilon^k = 100 \cdot 5^{1,4} = 951,8.$$

Сила, яка діє на поршень з боку повітря, кН

$$F = P_2 \cdot f = 951,8 \cdot 7,065 \cdot 10^{-2} = 67,246.$$

Кінцева температура повітря, К

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 294 \cdot 5^{(1,4-1)} \approx 560$$

$$\text{або } t_2 = 560 - 273 = 287^\circ\text{C}.$$

Для адіабатного процесу $dq = 0 = du + dl_v$, тому зміна внутрішньої енергії дорівнює, кДж

$$\Delta U = -L_v = -(-7,98) = 7,98.$$

За формулою додатка В визначаємо масові ізобарні теплоємності повітря для початкової та кінцевої температури, кДж/(кг·К)

$$C_p|_{t_1} = 0,9952 + 9,349 \cdot t_1 \cdot 10^{-5} = 0,9952 + 9,349 \cdot 21 \cdot 10^{-4} = 1,005.$$

$$C_p|_{t_2} = 0,9952 + 9,349 \cdot 294 \cdot 10^{-5} = 1,022.$$

Маса повітря під поршнем, кг

$$M = V_1 \cdot \rho_1 = 3,5325 \cdot 10^{-2} \cdot 1,185 = 4,186 \cdot 10^{-2}.$$

Зміна ентальпії повітря в процесі стиску, кДж

$$\Delta H = M(C_p|_{t_2} \cdot t_2 - C_p|_{t_1} \cdot t_1) = 4,186 \cdot 10^{-2} \cdot (1,022 \cdot 294 - 1,005 \cdot 21) = 11,609$$

Оскільки для адіабатного процесу $dS = 0$, то зміна ексергії дорівнює, кДж

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{н.с} \cdot \Delta S = \Delta H = 11,609.$$

Задача 2.1.7. В газовій турбіні двоокис вуглецю адіабатно розширюється до шестикратного зменшення густини. Визначити масову витрату газу в турбіні, зміну внутрішньої енергії, якщо внутрішня потужність і внутрішній ККД турбіни 25 МВт і 0,85 відповідно, початкові параметри газу: $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $t_1 = 727^\circ\text{C}$; $k = 1,3$ (теплоємності не залежать від температури).

Розв'язування

Газова стала, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu \approx 0,189$$

Ізохорна та ізобарна масова теплоємність газу, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / (k - 1) = 0,189 / (1,3 - 1) = 0,63;$$

$$C_p = k \cdot C_v = 1,3 \cdot 0,63 = 0,819$$

За умови задачі $\rho_1 / \rho_2 = 6$, або $v_2 / v_1 = 6$

Температура газів на виході з турбіни, К

$$T_2 = T_1 (v_1 / v_2)^{(k-1)} = 1000 (1 / 6)^{(1,3-1)} = 584.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж/кг

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) = 0,63 (584 - 1000) = 262,1.$$

В адіабатному процесі робота зміни тиску $\ell_p = -\Delta h$, тому робота, яку виконує газ, складає, кДж/кг

$$\ell_p = -\Delta h = h_1 - h_2 = C_p (T_1 - T_2) = 0,819 (1000 - 584) = 340,7.$$

Необхідна потужність турбіни, МВт

$$N_T = N_1 / \eta_1 = 25 / 0,85 = 29,4.$$

Масова витрата газу, кг/с

$$G_z = \frac{N_T \cdot 10^3}{\ell_p} = \frac{29,4 \cdot 10^3}{340,7} = 86,29.$$

Задача 2.1.8. Від двох кіломолей гелію з теплоємністю $\mu C_v = 12,5$ кДж/(кмоль·К) в політропному процесі відводиться 3000 кДж теплоти, внаслідок чого його температура зменшується на 100°C . Визначити роботу зміни об'єму і зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри газу складають: $P_1 = 0,15$ МПа; $v_1 = 6,928$ м³/кг, температура навколишнього середовища 288 К.

Розв'язування

Газова стала гелію, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 4 \approx 2,0785.$$

Масові ізохорна та ізобарна теплоємності, кДж/(кг·К)

$$C_{vm} = \mu C_v / \mu = 12,5 / 4 = 3,125$$

$$C_{pm} = C_{vm} + R = 3,125 + 2,0785 = 5,206.$$

Питома теплота, що відведена від газу, кДж/кг

$$q = Q / (n_\mu \cdot \mu) = 3000 / (2 \cdot 4) = 375$$

Початкова температура газу, К

$$T_1 = P_1 \cdot v_1 / R = 150 \cdot 6,928 / 2,0785 = 500$$

Кінцева температура гелію, К

$$T_2 = T_1 - \Delta T = 500 - 100 = 400.$$

Теплоємність політропного процесу, кДж/(кг·К)

$$C_n = q / \Delta T = -375 / (400 - 500) = 3,75.$$

Із рівняння теплоємності

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1} \quad \text{або} \quad 3,75 = 3,125 \frac{n-1,666}{n-1}$$

визначимо показник політропи $n = -2,33$.

Кінцевий тиск газу, МПа

$$P_2 = P_1 (T_2 / T_1)^{\frac{n}{n-1}} = 0,15 (400 / 500)^{\left(\frac{-2,33}{-2,33-1}\right)} = 0,112.$$

Маса газу, кг

$$M = n_\mu \cdot \mu = 2 \cdot 4 = 8.$$

Зміна внутрішньої енергії та ентальпії, кДж

$$\Delta U = M C_{vm} (T_2 - T_1) = 8 \cdot 3,125 (400 - 500) = -2500$$

$$\Delta H = M C_{pm} (T_2 - T_1) = 8 \cdot 5,206 (400 - 500) = -4164,8$$

Робота зміни об'єму і тиску, кДж

$$L_v = Q - \Delta U = -3000 - (-2500) = -500$$

$$L_p = Q - \Delta H = -3000 - (-4164,8) = 1164,8$$

Зміна ентропії, кДж/К

$$\Delta S = MC_n \ln(T_2 / T_1) = 8 \cdot 3,75 \ln(400 / 500) = -6,69.$$

Зміна ексергії, кДж

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \cdot \Delta S = -4164,8 - (288(-6,69)) = -2238,08.$$

Задача 2.1.9. До 1 кг азоту з початковими параметрами $P_1=0,4$ МПа і $t_1=227^\circ\text{C}$ підводиться 120 кДж теплоти. При цьому його внутрішня енергія зменшується на 44,6 кДж. Визначити роботу зміни об'єму і зміни тиску, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, вважаючи теплоємності незалежними від температури. Температуру навколишнього середовища прийняти рівною 288 К

Розв'язування

Газова стала азоту, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 28 \approx 0,297$$

Ізохорна та ізобарна масові теплоємності, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / (k - 1) = 0,297 / (1,4 - 1) = 0,7425;$$

$$C_p = k \cdot C_v = 1,4 \cdot 0,7425 = 1,04$$

Зміна температур в процесі, $^\circ\text{C}$

$$\Delta t = -\Delta u / C_v = -44,6 / 0,7425 = -60$$

Кінцева температура газу, К

$$T_2 = T_1 + \Delta t = (227 + 273) - 60 = 440$$

Теплоємність процесу, кДж/(кг·К)

$$C_n = q / \Delta t = 120 / (-60) = -2.$$

Із рівняння для теплоємності політропного процесу

$$C_n = C_v \frac{n - k}{n - 1} \quad \text{або} \quad -2 = 0,7425 \frac{n - 1,4}{n - 1}$$

визначимо показник політропи $n = 1,108$.

Кінцевий тиск газу, бар

$$P_2 = P_1 (T_2 / T_1)^{\frac{n}{n-1}} = 4 (440 / 500)^{\left(\frac{1,108}{0,108}\right)} = 0,077.$$

Зміна ентальпії, кДж/кг

$$\Delta h = C_p \cdot \Delta t = 1,04(-60) = -62,4.$$

Робота розширення (зміни об'єму), кДж/кг

$$l_v = q - \Delta u = 120 - (-44,6) = 164,6.$$

Робота зміни тиску, кДж/кг

$$l_p = l_v \cdot n = 164,6 \cdot 1,108 = 182,37.$$

Отже, на виконання робіт l_v і l_p витрачається зміна внутрішньої енергії та ентальпії, відповідно.

Зміна ентропії процесу, кДж/(кг·К)

$$\Delta S = C_n \ln(T_2 / T_1) = -2 \ln(440 / 500) = 0,255.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{nc} \Delta S = -62,4 - 288 \cdot 0,255 = 11,04.$$

Задача 2.1.10. Два кілограми двоокису вуглецю з тиском $P_1=740$ мм.рт.ст. і об'ємом $1,15$ м³ політропно стискаються, внаслідок чого густина збільшується в п'ять разів, а температура втричі. Визначити теплоту, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії. В розрахунках прийняти, що теплоємності сталі, $k=1,3$, а температура навколишнього середовища дорівнює початковій температурі газу.

Розв'язування

Газова стала, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 44 \approx 0,189.$$

Ізохорна та ізобарна масові теплоємності газу, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / (k - 1) = 0,189 / (1,3 - 1) = 0,63$$

$$C_p = k \cdot C_v = 1,3 \cdot 0,63 = 0,819$$

Початковий тиск, бар

$$P_1 = P_6 / 750 = 740 / 750 = 0,9866.$$

Початкова температура газу, К

$$T_1 = (P_1 \cdot V_1) / (m \cdot R) = (98,66 \cdot 1,15) / (2 \cdot 0,189) = 300.$$

Кінцева температура газу, К

$$T_2 = T_1 \cdot 3 = 300 \cdot 3 = 900.$$

Оскільки за умови задачі $\rho_2 / \rho_1 = 5$, то $v_1 / v_2 = 5$.

Кінцевий об'єм газу, м³

$$V_2 = V_1 / 5 = 1,15 / 5 = 0,23.$$

Із рівняння політропного процесу

$$T_2 / T_1 = (V_1 / V_2)^{(n-1)}, \text{ маємо } 3 = 5^{(n-1)}, \text{ звідки } \ln 3 = (n-1) \ln 5, \\ (n-1) = 0,682; n = 1,682.$$

Теплоємність процесу, кДж/(кг·К)

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1} = 0,63 \frac{1,682-1,3}{1,682-1} = 0,353.$$

Теплота процесу, кДж

$$Q = MC_n (T_2 - T_1) = 2 \cdot 0,353 (900 - 300) = 423,6.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж

$$\Delta U = MC_v(T_2 - T_1) = 2 \cdot 0,63(900 - 300) = 756.$$

Зміна ентальпії, кДж

$$\Delta H = \Delta U \cdot k = 756 \cdot 1,3 = 982,8.$$

Робота зміни об'єму, кДж

$$L_v = Q - \Delta U = 423,6 - 756 = -332,4.$$

Від'ємний знак характеризує підведену іззовні роботу (роботу стиску).

Робота зміни тиску, кДж

$$L_p = L_v \cdot n = -332,4 \cdot 1,682 = -559,097.$$

Зміна ентропії, кДж/К

$$\Delta S = M \cdot C_n \ln(T_2 / T_1) = 2 \cdot 0,353 \ln(3) = 0,775$$

Зміна ексергії, кДж

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \Delta S = 982,8 - 300 \cdot 0,775 = 750,3.$$

Задача 2.1.11. На стиск 1кг повітря з початковою температурою 273К витрачається 205 кДж роботи зміни тиску. При цьому внутрішня енергія газу зростає на 220 кДж. Визначити початкові та кінцеві параметри повітря, зміну ентальпії, ексергії та ентропії, теплоту, якщо кінцевий тиск дорівнює 1,2 МПа. В розрахунках прийняти, що теплоємності лінійно залежать від температури.

Розв'язування

Газова стала повітря (див. задачу 1.1.3) дорівнює $R=0,287$ кДж/(кг·К). Оскільки інтервал зміни температур невідомий, визначаємо за допомогою додатка Б теплоємності для початкової температури:

$$C_{pm}|_{t_1} = \mu C_p|_{t_1} / \mu = 29,077 / 29 = 1,0026 \text{ кДж/(кг·К)}$$

$$C_{vm}|_{t_1} = C_{pm}|_{t_1} - R = 1,0026 - 0,267 = 0,7156 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Орієнтована різниця температур в процесі, К

$$\Delta T_{op} = \frac{\Delta u}{C_{vm}} = \frac{220}{0,7156} = 300,4.$$

Кінцева температура в процесі стискання, °С

$$t_2 = t_1 + \Delta T_{op} = 0 + 300,4 = 300,4$$

$$\text{або } T_2 = 273 + 300,4 = 573,4 \text{ К}$$

Ізобарна та ізохорна теплоємності для кінцевої температури, кДж/(кг·К)

$$C_{pm}|_{t_2} = \mu C_p / \mu = 30,27 / 29 = 1,043;$$

$$C_{vm}|_{t_2} = C_{pm}|_{t_2} - R = 1,043 - 0,287 = 0,7568.$$

Середні значення теплоємностей в інтервалі температур 0 – 300°C,
кДж/(кг·К)

$$\overline{C}_{pm} = 0,5(C_{pm}|t_1 + C_{pm}|t_2) = 0,5(1,0026 + 1,043) = 1,0228$$

$$\overline{C}_{vm} = 0,5(C_{vm}|t_1 + C_{vm}|t_2) = 0,5(0,7156 + 0,7568) = 0,7362$$

Різниця температур в процесі, К

$$\Delta T = \Delta u / \overline{C}_{vm} = 220 / 0,7362 = 299.$$

Кінцева температура повітря, К

$$T_2 = T_1 + \Delta T = 273 + 299 = 572$$

Кінцевий питомий об'єм повітря, м³/кг

$$v_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{0,287 \cdot 572}{1200} = 0,1368$$

Зміна ентальпії, кДж/кг

$$\Delta h = \overline{C}_{pm} \cdot \Delta T = 1,0228 \cdot 299 = 305,8$$

Теплота процесу, кДж/(кг·К)

$$q = \Delta h + l_p = 305,8 - 205 = 100,8.$$

Теплосмність процесу, кДж/(кг·К)

$$C_n = q / \Delta T = 100,8 / 299 = 0,337.$$

Показник політропи

$$n = \frac{\overline{C}_p - C_n}{\overline{C}_v - C_n} = \frac{1,0228 - 0,337}{0,7362 - 0,337} = 1,718.$$

Початковий питомий об'єм газу з рівняння процесу, м³/кг

$$v_1 = v_2 (T_2 / T_1)^{(n/(n-1))} = 0,1368 (572 / 273)^{(1,718/(1,718-1))} = 0,383.$$

Початковий тиск із рівняння стану, кПа

$$P_1 = (R \cdot T_1) / v_1 = (0,287 \cdot 273) / 0,383 = 204,5.$$

Зміна ентропії, кДж/(кг·К)

$$\Delta S = C_n \ln(T_2 / T_1) = 0,337 \ln(572 / 273) = 0,259.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{nc} \Delta S = 305,8 - 273 \cdot 0,249 = 237,75.$$

2.2 Задачі для самостійної роботи

Під час розв'язування задач цього розділу вважати всі наведені газоподібні речовини ідеальними газами, а їх теплоємності сталими.

Задача 2.2.1. 1 кг двооксу вуглецю виконує 100 кДж роботи зміни об'єму. При цьому його ентальпія зменшується на 50 кДж. Визначити теп-

лоємність процесу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри складають: $P_1=1,2$ МПа; $\rho_1=4$ кг/м³, а температура навколишнього середовища 17°C.

Задача 2.2.2. На стиск 1 кг водяної пари з параметрами $P_1=0,1$ МПа; $\rho_1=1,2$ кг/м³ витрачено 140 кДж роботи зміни об'єму. При цьому його температура зросла на 110°C. Визначити теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, а також кінцеві параметри пари; $t_{nc}=25^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.3. Питомий об'єм 1 кг окису вуглецю зменшується в три рази, а температура зростає на 120°C. Визначити теплоємність процесу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри газу дорівнюють: $P_1=0,3$ МПа, $v_1=0,4$ м³/кг. Температура зовнішнього середовища 288 К.

Задача 2.2.4. 1 м³ азоту з початковими параметрами $P_1=0,1$ МПа, $t_1=t_{nc}=15^\circ\text{C}$ стискається до п'ятикратного збільшення густини. Визначити кінцеві параметри газу, зміну внутрішньої енергії, та ексергії; роботу зміни тиску і теплоту, якщо в процесі стиску ентальпія газу зростає на 140 кДж.

Задача 2.2.5. До 1кг окису сірки підводиться 130 кДж теплоти, а внутрішня енергія газу зменшується на 40 кДж. Визначити роботи зміни об'єму і тиску; зміну ентальпії, ентропії та ексергії, кінцеві параметри газу, якщо початкові параметри складають $P_1=0,35$ МПа; $t_1=127^\circ\text{C}$, а температура навколишнього середовища 27°C.

Задача 2.2.6. В процесі стиску 1кмоль азоту його об'єм зменшується в п'ять разів, а температура зростає вдвічі. Визначити теплоту, роботи зміни об'єму і тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри газу дорівнюють: $P_1=760$ мм.рт.ст.; $t_1=t_{nc}=20^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.7. В процесі підведення 150 кДж теплоти внутрішня енергія 1м³ повітря зменшується на 30 кДж. Визначити кінцеві параметри повітря, роботи зміни об'єму і тиску, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, якщо $P_1=0,4$ МПа, $t_1=227^\circ\text{C}$, $t_{nc}=25^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.8. Густина 1кг двооксиду вуглецю зростає в 3,5 рази, а температура збільшується на 100°C. Визначити кінцеві параметри газу, теплоту, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, ексергії, роботу зміни об'єму і зміну тиску, якщо початкові параметри газу складають: $P_1=0,5$ МПа, $v_1=0,3$ м³/кг, $t_{nc}=17^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.9. Питомий об'єм 1м³ повітря з початковими параметрами $P_1=740$ мм.рт.ст., $t_1=37^\circ\text{C}$ зменшується в 4,5 рази, а температура збільшується вдвічі. Визначити теплоту процесу, роботи зміни об'єму і тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо $t_{nc}=15^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.10. На стиск 1кг азоту з початковою температурою 100°C витрачається 150 кДж роботи зміни об'єму. При цьому його тиск збільшується до $P_2=1,4$ МПа, а внутрішня енергія зростає на 75 кДж. Визначити початкові та кінцеві параметри газу, теплоємність, теплоту, роботу зміни тиску, зміни ентальпії, ентропії та ексергії, якщо $t_{nc}=27^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.11. До 1 м^3 окису вуглецю з початковими параметрами $P_1=0,4\text{ МПа}$, $\rho_1=2,5\text{ кг/м}^3$ підводиться $0,1\text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти. При цьому його ентальпія зменшується на 40 кДж . Визначити кінцеві параметри газу, роботу зміни об'єму і зміну тиску, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, якщо $t_{\text{нс}}=10^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.12. Завдяки підведенню 120 кДж теплоти 1 м^3 двоокису вуглецю з початковими параметрами $P_1=0,4\text{ МПа}$, $v_1=0,4\text{ м}^3/\text{кг}$ виконує 60 кДж роботи зміни тиску. Визначити кінцеві параметри газу, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, якщо $T_{\text{нс}}=288\text{ К}$.

✓ **Задача 2.2.13.** Густина 1 кг повітря з початковими параметрами $P_1=780\text{ мм.рт.ст.}$, $t_1=127^\circ\text{C}$ зростає в п'ять разів, а температура зменшується вдвічі. Визначити теплоту, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо $t_{\text{нс}}=10^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.14. На стиск 1 кмоль окису сірки витрачено 1440 кДж роботи зміни об'єму. При цьому внутрішня енергія газу збільшилась на 560 кДж . Визначити роботу зміни тиску, теплоту, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, якщо початкові параметри складають $P_1=735\text{ мм.рт.ст.}$, $v_1=0,9\text{ м}^3/\text{кг}$, $t_{\text{нс}}=t_1$.

Задача 2.2.15. На стиск 1 кмоль окису вуглецю витрачено 1200 кДж роботи зміни тиску. При цьому його ентальпія зменшилась на 400 кДж . Визначити теплоту, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, якщо $\rho_1=1,1\text{ кг/м}^3$, $t_1=t_{\text{нс}}=27^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.16. До 1 м^3 водяної пари підводиться 180 кДж роботи зміни тиску, внаслідок чого його внутрішня енергія зростає на 90 кДж . Визначити кінцеві параметри пари, теплоту, роботу зміни об'єму, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, якщо початкові параметри дорівнюють: $P_1=0,12\text{ МПа}$; $T_1=390\text{ К}$; а $t_{\text{нс}}=17^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.17. Густина 1 м^3 окису азоту зростає втричі, а температура зменшується в півтори рази. Визначити роботу зміни тиску і зміни об'єму, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, якщо $P_1=0,35\text{ МПа}$; $\rho_1=1,5\text{ кг/м}^3$, $t_{\text{нс}}=20^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.18. В процесі стиску 1 м^3 двоокису вуглецю з початковими параметрами $P_1=760\text{ мм.рт.ст.}$, $t_1=t_{\text{нс}}=17^\circ\text{C}$ його температура підвищується на 160°C , а густина зростає в 4 рази. Визначити, кінцеві параметри газу, теплоту, роботу зміни тиску, зміну ентальпії, внутрішньої енергії та ексергії.

✓ **Задача 2.2.19.** 1 м^3 повітря з початковими параметрами $P_1=1\text{ МПа}$ і $\rho_1=4\text{ кг/м}^3$ виконує 120 кДж роботи зміни об'єму. При цьому його ентальпія зменшується на 60 кДж . Визначити кінцеві параметри газу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, якщо $t_{\text{нс}}=25^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.20. В процесі стиску 1 м^3 азоту його температура підвищується на 120°C , а питомий об'єм зменшується в п'ять разів. Визначити

роботу зміну тиску, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри газу складають $P_1=740$ мм.рт.ст., $t_1=t_{nc}=20^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.21. Процес зміни стану 1 м^3 кисню відбувається до семикратного зменшення густини. Визначити роботу зміни об'єму, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, якщо початкові параметри дорівнюють $P_1=8\text{ МПа}$, $t_1=127^\circ\text{C}$, а теплоємність дорівнює $0,45$ кДж/(кг·К), $t_{nc}=17^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.22. В процесі стиску 1 м^3 повітря його густина збільшується в 6 разів, а температура в 2,5 рази. Визначити роботу зміни тиску, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, якщо $P_1=840$ мм.рт.ст., $t_1=t_{nc}=30^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.23. На стиск 1 м^3 окису вуглецю витрачається 240 кДж роботи зміни тиску. При цьому внутрішня енергія газу зменшується на 40 кДж. Визначити початкові та кінцеві параметри газу, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, теплоємність процесу і теплоту, якщо кінцевий тиск дорівнює $1,8$ МПа, а початкова температура 300 К, $t_{nc}=27^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.24. До 1 кг гелію підводиться 120 кДж теплоти. При цьому його ентальпія зменшується на 30 кДж. Визначити роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, початкові та кінцеві параметри газу, якщо початкова температура $t_1=300^\circ\text{C}$, а кінцевий тиск $P_2=0,12$ МПа; $t_{nc}=20^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.25. 1 кг двоокису вуглецю з початковими параметрами $P_1=1,8$ МПа і $t_1=27^\circ\text{C}$ виконує роботу в газовій турбіні. В процесі розширення газу відношення роботи зміни об'єму до теплоти дорівнює $0,353$. Визначити кінцеві параметри газу, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та ексергії, якщо параметри навколишнього середовища дорівнюють: $P_{nc}=745$ мм.рт.ст., $\rho_{nc}=1,125$ кг/м³.

Задача 2.2.26. Зміна ентропії двоатомного газу з ізобарною теплоємністю $C_{pm}=1,0386$ кДж/(кг·К) складає $0,4$ кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його кінцеві параметри, роботу зміни тиску, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо початкові параметри $P_1=765$ мм.рт.ст., $\rho_1=1,22$ кг/м³, а теплоємність процесу $0,575$ кДж/(кг·К).

Задача 2.2.27. В процесі, де теплоємність дорівнює нулю, 1 кг двоатомного газу з газовою сталою $R=0,29697$ кДж/(кг·К) і початковим тиском $P_1=0,9\text{ МПа}$ розширюється до чотирикратного зменшення густини. При цьому кінцева температура газу складає 287 К. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу розширення, зміну ентальпії та ексергії, якщо $t_{nc}=17^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.28. Зміна ентропії триатомного газу з теплоємністю $C_{pm}=0,819$ кДж/(кг·К) в процесі, де теплоємність дорівнює нескінченності, складає $0,398$ кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу і зміну ексергії, якщо початкова густина $\rho_1=1,333$ кг/м³, кінцевий тиск $P_2=0,125$ МПа, а $t_{nc}=20^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.29. Повітря перебуває в циліндрі під поршнем діаметром 0,2 м, а початковий об'єм газу дорівнює 500 см^3 . В процесі, де робота зміни тиску дорівнює нулю, до газу підводиться 2 кДж/кг теплоти. Визначити відстань, яку пройде поршень, якщо початкова температура газу дорівнює 500°C , а тиск — 76 бар .

Задача 2.2.30. Зміна ентропії 1 кг триатомного газу в процесі, де не виконується робота розширення, складає $0,3 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. В процесі нагрівання газу з початковими параметрами $P_1=1,36 \text{ бар}$; $\rho_1=2,5 \text{ кг/м}^3$ його температура зростає вдвічі. Визначити рід газу, його кінцеві параметри, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентальпії.

Задача 2.2.31. Над 1 кг газу з теплоємністю $C_{pm}=2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ здійснюється $0,15 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ роботи в процесі, де $\Delta u = \Delta h$. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, зміну ентропії та ексергії, якщо його тиск збільшується в п'ять разів, початкова густина $\rho_1=0,43 \text{ кг/м}^3$, а температура навколишнього середовища 15°C .

Задача 2.2.32. 1 кг одноатомного газу з теплоємністю $C_{pm}=5,196 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ і початковим тиском 760 мм.рт.ст. стискається в процесі, де робота зміни тиску виконується за рахунок зміни ентальпії, до чотирикратного збільшення густини. При цьому його внутрішня енергія збільшується на $1390,6 \text{ кДж/кг}$. Визначити рід газу, початкові та кінцеві параметри, роботу зміни об'єму і тиску, зміну ексергії, якщо температура навколишнього середовища дорівнює початковій температурі газу.

Задача 2.2.33. Над 1 кг чотириатомного газу з початковим тиском 775 мм.рт.ст. здійснюється $0,15 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ роботи зміни тиску в процесі, де теплота дорівнює зміні внутрішньої енергії. Внаслідок цього тиск газу збільшується в п'ять разів. Визначити рід газу, кінцеві та початкові параметри, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, якщо температура зовнішнього середовища 17°C .

Задача 2.2.34. 1 кг чотириатомного газу з теплоємністю $C_p=2,175 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ виконує 390 кДж/кг роботи зміни об'єму в процесі, де теплота дорівнює зміні ентальпії. При цьому його густина зменшується в 4 рази. Визначити рід газу, початкову і кінцеву температуру, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентропії та ексергії, якщо температура навколишнього середовища 25°C .

Задача 2.2.35. Ентропія 1 кг двоатомного газу з теплоємністю $C_p=0,9093 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ і початковим тиском $0,1416 \text{ МПа}$ зменшується на $0,418 \text{ кДж/кг}$ в процесі де зміна ентальпії дорівнює нулю. При цьому густина газу зростає в 5 разів. Визначити початкові та кінцеві параметри газу, підведену роботу і відведену теплоту, якщо зміна ексергії в процесі складає 120 кДж/кг при $t_{\text{вс}}=14^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.36. 1 кг триатомного газу з початковим тиском 720 мм.рт.ст. і з теплоємністю $C_p=0,5629 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ стискається до семикратного збільшення густини в процесі, де теплоємність дорівнює нулю. При цьому внутрішня енергія газу зростає на 100 кДж . Визначити початко-

ві та кінцеві параметри газу, роботу зміни тиску, зміну ексергії, якщо температура навколишнього середовища дорівнює початковій температурі газу.

Задача 2.2.37. В процесі ізобарного нагрівання 1 кг триатомного газу з теплоємністю $C_p = 1,06$ кДж/(кг·К) і початковою густиною $2,2$ кг/м³ зміна внутрішньої енергії складає $0,1$ кВт·год, а зміна ентропії $0,7346$ кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу зміни об'єму і зміни тиску, зміну ексергії, якщо $t_{nc} = 23^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.38. В закритій посудині знаходиться 1 кг двоатомного газу з теплоємністю $C_p = 1,0048$ кДж/(кг·К) і тиском $P_1 = 0,5$ МПа. В результаті охолодження газу його внутрішня енергія зменшується на $430,2$ кДж/кг, а ентропія зменшується на $1,1$ кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, зміну ентальпії та ексергії, якщо температура навколишнього середовища дорівнює кінцевій температурі процесу.

Задача 2.2.39. 1 кг триатомного газу з теплоємністю $C_p = 2$ кДж/(кг·К) розширюється до п'ятидесятикратного зменшення тиску в процесі, де робота зміни тиску виконується за рахунок зменшення ентальпії. При цьому його внутрішня енергія зменшується на 905 кДж/кг. Визначити рід газу, роботу зміни тиску, початкові та кінцеві параметри газу, якщо початкова густина газу дорівнює 12 кг/м³.

Задача 2.2.40. Від 1 кг двоатомного газу з теплоємністю $C_v = 10,312$ кДж/(кг·К) відводиться $0,46$ кВт·год теплоти в процесі, де робота зміни тиску дорівнює роботі зміни об'єму. При цьому його густина зростає в чотири рази. Визначити рід газу, витрачену роботу, зміну ентропії та ексергії, якщо початковий тиск газу $0,3$ МПа, а температура навколишнього середовища дорівнює початковій температурі газу.

Задача 2.2.41. В циліндрі під поршнем з діаметром $0,5$ м знаходиться 1 кг триатомного газу з теплоємністю $0,5629$ кДж/(кг·К), який перебуває в стані рівноваги з навколишнім середовищем, а параметри дорівнюють: $P_6 = 735$ мм.рт.ст., $t_{nc} = 20^\circ\text{C}$. В результаті стиску газу поршень переміщується на відстань $1,584$ м в процесі без теплообміну з навколишнім середовищем. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії та ексергії.

Задача 2.2.42. Зміна ентропії 1 кг триатомного газу з початковою густиною $2,42$ кг/м³ і теплоємністю $C_v = 0,63$ кДж/(кг·К) складає $0,568$ кДж/(кг·К). При цьому тиск газу збільшується вдвічі в процесі, де не виконується робота розширення. Визначити рід газу, початкові та кінцеві параметри, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, якщо зміна ентальпії в процесі складає $241,9$ кДж/кг, а початкова температура дорівнює температурі навколишнього середовища, $t_{nc} = 15^\circ\text{C}$.

Задача 2.2.43. 1 кг двоатомного газу з теплоємністю $C_v = 0,7423$ кДж/(кг·К) знаходиться в циліндрі під поршнем з діаметром $618,3$ мм. На поршень діє сила 180 кН. В результаті підведення теплоти поршень ізобарно пересувається на відстань 1 м. При цьому ентропія газу

зростає на $1,141 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Визначити початкові та кінцеві параметри газу, підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо температура навколишнього середовища дорівнює початковій температурі газу.

Задача 2.2.44. Над 1 кг двоатомного газу з густиною $1,924 \text{ кг/м}^3$ і теплоємністю $C_p = 0,9093 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ здійснюється $0,03 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ роботи в процесі, теплоємність якого дорівнює нулю. При цьому тиск газу зростає в 4 рази. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, зміну ентропії та ексергії, якщо температура навколишнього середовища дорівнює температурі процесу.

Задача 2.2.45. Над 1 кг чотириатомного газу з густиною 1 кг/м^3 і теплоємністю $C_v = 1,686 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ здійснюється 289 кДж роботи зміни тиску, внаслідок чого його тиск збільшується в 6,1 рази. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, якщо стиск відбувається ізентропно, а температура навколишнього середовища на 23°C вище початкової температури газу.

Задача 2.2.46. 1 кг триатомного газу з теплоємністю $C_v = 1,540 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ нагрівається в герметичній посудині, внаслідок чого його ентальпія зростає на 800 кДж , а ентропія збільшується на $1,0674 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Визначити рід газу, початкові та кінцеві параметри, підведену теплоту, зміну ексергії, якщо кінцевий тиск складає $0,369 \text{ МПа}$, а температура навколишнього середовища на 100°C менша за початкову температуру газу.

Задача 2.2.47. 1 кг триатомного газу з теплоємністю $C_v = 0,433 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ охолоджується в процесі, де відношення зміни внутрішньої енергії до теплоти дорівнює зворотній величині показника степеня адіабати. При цьому його об'єм зменшується втричі, зміна внутрішньої енергії дорівнює $-259,8 \text{ кДж/кг}$, а зміна ентропії $-0,618 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу зміни об'єму, теплоту, зміну ентальпії та ексергії, якщо кінцева густина складає 3 кг/м^3 , а температура навколишнього середовища на 5°C менше від кінцевої температури газу.

Задача 2.2.48. Зміна ексергії 1 кг чотириатомного газу з початковим тиском $0,9 \text{ МПа}$ і теплоємністю $C_p = 2,31 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ в процесі, де відношення зміни внутрішньої енергії до теплоти дорівнює нулю, складає $0,0669 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Визначити рід газу, здійснену роботу, початкові та кінцеві параметри, якщо кінцева густина складає 1 кг/м^3 , а температура навколишнього середовища 15°C .

Задача 2.2.49. Ексергія 1 кг двоатомного газу з теплоємністю $C_v = 0,6495 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ зменшується на $0,0624 \text{ кДж}$ в процесі, де відношення зміни внутрішньої енергії до теплоти дорівнює нескінченності. При цьому густина газу зменшується в п'ять разів. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу зміни об'єму і зміни тиску, якщо кінцева густина газу дорівнює $1,41 \text{ кг/м}^3$.

Задача 2.2.50. 1 кг триатомного газу з теплоємністю

$C_V = 0,433 \text{ кДж/(кг·К)}$ перебуває в закритій герметичній посудині з мішалкою, яка ретельно теплоізована від зовнішнього середовища. За допомогою мішалки до газу підводиться технічна робота, внаслідок чого тиск зростає в 1,5 раза, а ентропія на $0,1755 \text{ кДж/(кг·К)}$. Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, зміну ентальпії та ексергії, якщо кількість обертів мішалки 900 об/хв, момент на валу $0,6 \text{ кН·м}$, а кінцева густина газу $3,93 \text{ кг/м}^3$.

Задача 2.2.51. Об'єм 1 кг двоатомного газу з теплоємністю

$C_p = 1,005 \text{ кДж/(кг·К)}$ і початковим тиском 2 бар дорівнює $0,861 \text{ м}^3$. Спочатку газ розширюється в процесі, теплоємність якого дорівнює нескінченності, а потім ізохорно стискається до початкового тиску. Сумарна теплота, яка підводиться до газу в обох процесах складає $119,35 \text{ кДж}$. Визначити рід газу, параметри в усіх точках процесів, зміну ентропії та ексергії, роботу, яка витрачена на стиск газу, якщо температура навколишнього середовища 20°C .

Задача 2.2.52. 1 кг двоатомного газу з теплоємністю

$C_p = 1,039 \text{ кДж/(кг·К)}$ і початковими параметрами $P_1 = 735 \text{ мм.рт.ст.}$, густиною $1,1 \text{ кг/м}^3$ стискається в процесі, де зміна внутрішньої енергії дорівнює ентальпії, а потім ізобарно розширюється до початкового об'єму. Загальна робота зміни тиску, яка підведена в процесах дорівнює $123,52 \text{ кДж}$. Визначити початкові та кінцеві параметри газу в кожному з процесів, теплоту, роботу зміни об'єму, зміну ентальпії та ексергії, якщо температура навколишнього середовища на 12°C менше від початкової температури.

3 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ З ВОДЯНОЮ ПАРОЮ

3.1 Приклади розв'язання задач

Задача 3.1.1. В барабані парового котла з об'ємом 12 м^3 міститься 2000 кг пароводяної суміші під тиском 9 МПа . Визначити масу води і пари, а також міру сухості пари в барабані.

Розв'язування

Позначимо маси води і пари через M_v і M_n , відповідно. Тоді $M = M_v + M_n = 2000 \text{ кг}$.

Об'єми, які займають вода і пара: $V_v = M_v \cdot v'$, $V_n = M_n \cdot v''$.

Тоді загальний об'єм $V = M_v \cdot v' + M_n \cdot v''$.

Враховуючи, що $M_v = M - M_n$, одержимо

$$V = (M - M_n) \cdot v' + M_n \cdot v'' = M \cdot v' + M_n (v'' - v').$$

Звідки виходить $M_n = (V - M \cdot v') / (v'' - v')$.

Користуючись додатком Д, визначимо для заданого тиску, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v' = 1,4174 \cdot 10^{-3}; \quad v'' = 0,02048.$$

Отже, маса пари в барабані дорівнюватиме, кг

$$M_n = (12 - 2000 \cdot 1,4174 \cdot 10^{-3}) / (0,02048 - 1,4174 \cdot 10^{-3}) = 480,79.$$

Маса води, кг

$$M_n = M - M_n = 2000 - 480,79 = 1519,21$$

Міра сухості пари в барабані

$$x = M_n / M = 480,79 / 2000 = 0,24.$$

Задача 3.1.2. Параметри водяної пари складають: $P = 4$ МПа;
 $v = 0,045$ м³/кг. Визначити всі інші параметри пари.

Розв'язування

Із таблиць водяної пари (додаток Д) визначаємо

$$t = 250, 33^{\circ}\text{C}; v' = 1, 252 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; v'' = 0, 04977 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h' = 1087,5 \text{ кДж/кг}; h'' = 2801 \text{ кДж/кг}; r = 1713,5 \text{ кДж/кг};$$

$$s' = 2,796 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; s'' = 6,07 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Оскільки величина v менша значення v'' для $x = 1$, то пара насичена.

Міра сухості пари

$$x = (v - v') / (v'' - v') = (0,045 - 1, 252 \cdot 10^{-3}) / (0, 04977 - 1, 252 \cdot 10^{-3}) = 0,9.$$

Інші параметри пари: $t = t_n = 250,33^{\circ}\text{C}$; $h = h' + r \cdot x = 1087,5 + 1713,5 \cdot 0,9 = 2629,3$

$$u = h - p \cdot v = 2629,3 - 4000 \cdot 0,045 = 2449,3$$

$$S = S' \cdot (1 - x) + S'' \cdot x = 2,796 \cdot 0,1 + 6,07 \cdot 0,9 = 5,7426.$$

Задача 3.1.3. В деаераторі живильної води остання змішується з паром, параметри якої дорівнюють: $P = 0,1206$ МПа, $x = 0,98$. Внаслідок змішування живильна вода повинна підігріватись від 90°C до температури насичення для заданого тиску. Визначити необхідну витрату пари, якщо витрата води складає 54 м³/год.

Розв'язування

Із додатка Д визначаємо питомий об'єм і ентальпію води для $t = 90^{\circ}\text{C}$:

$$v'_n = 1,0359 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; h'_n = 3335,9 \text{ Дж/кг}.$$

Масова витрата води, кг/с

$$G_n = V_n / (3600 \cdot v'_n) = 54 / (3600 \cdot 1,0359 \cdot 10^{-3}) = 14,48.$$

Із додатка Д визначаємо параметри води і пари для заданого тиску в деаераторі: $t_n = 105^{\circ}\text{C}$; $h'_n = 440,2$ кДж/кг; $h''_n = 2683$ кДж/кг; $r = 2243$ кДж/кг.

Ентальпія грієної пари, кДж/кг.

$$h = h' + r \cdot x = 440,2 + 2243 \cdot 0,98 = 2638,34.$$

Рівняння теплового балансу для процесу змішування води і пари:

$$(G_n + G_p) \cdot h'_n = G_n \cdot h'_n + G_p \cdot h.$$

З останнього рівняння визначаємо витрату пари, кг/с

$$G_p = G_n (h'_n - h'_p) / (h - h'_p) = 14,48 (440,2 - 335,9) / (2638,34 - 440,2) = 0,687.$$

Задача 3.1.4. Із барабана парового котла вода з високим солемістом зливається в розширник, де її тиск зменшується від 9 МПа до $0,3$ МПа. Внаслідок цього частина води випаровується, а решта видаляється із розширника (рис. 3.1.). Визначити паровидатність розширника. Якщо витрата води з барабана складає $18,6$ м³/год.

Розв'язування

Із додатка Д визначаємо питомий об'єм і ентальпію води, яка надходить в розширник із барабана з тиском 9 МПа: $v'_6 = 1,4174 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $h'_6 = 1363,7 \text{ Дж/кг}$.

Масова витрата води з барабана парового котла, кг/с

$$G_a = V / (3600 - v'_6) = 18,6 / (3600 \cdot 1,4174 \cdot 10^{-3}) = 3,645.$$

Із додатка Д визначаємо ентальпію води і сухої насиченої пари в розширнику для тиску 3 бар $h'_p = 561,4 \text{ кДж/кг}$; $h''_p = 2725 \text{ кДж/кг}$.

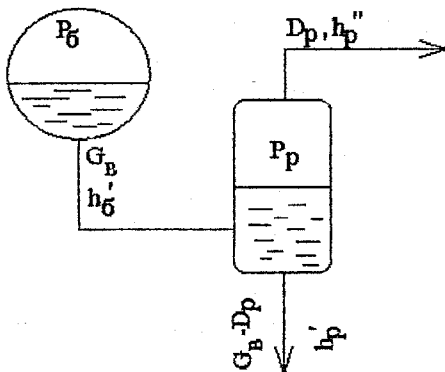


Рисунок 3.1

Відповідно до позначень на (рис.3.1.) Складаємо тепловий баланс розширника $G_v h'_6 = D_p h''_p + (G_v - D_p) h'_p$, звідки паровидатність розширника дорівнює, кг/с

$$D_p = G_v (h'_6 - h'_p) / (h''_p - h'_p) = 3,645 (1363,7 - 561,4) / (2725 - 561,4) = 1,35.$$

Вода, яка видаляється із розширника, кг/с

$$G_{\text{вид.}} = G - D_p = 3,645 - 1,35 = 2,295.$$

Теплова потужність, яка втрачається з водою, кВт

$$Q_a = G_{\text{вид.}} \cdot h'_p = 2,295 \cdot 561,4 = 1288,5.$$

Задача 3.1.5. Водяна пара з параметрами: $t_1 = 113^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 1 \text{ кг/м}^3$ нагрівається в закритій посудині, внаслідок чого її тиск збільшується на 0,14 МПа. Визначити початкові та кінцеві параметри пари, зміну ентальпії та ексергії, підведену теплоту і середню теплоємність в процесі, теплоту пароутворення в початковій точці, якщо температура навколишнього середовища 17°C .

Розв'язування

Процес ізохорний, оскільки відбувається в замкненому об'ємі.

Задачу розв'язуємо за допомогою h - s діаграми (рис. 3.2.).

Початкову точку 1 знаходимо на перетині ізотерми $t_1 = 113^{\circ}\text{C}$ з ізохорою $v_1 = 1/\rho_1 = 1/1 = 1\text{ м}^3/\text{кг}$. Параметри пари в точці 1: $P_1=160\text{ кПа}$; $S_1=6,7\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $h_1=2500\text{ кДж}/\text{кг}$; $x_1=0,91$.

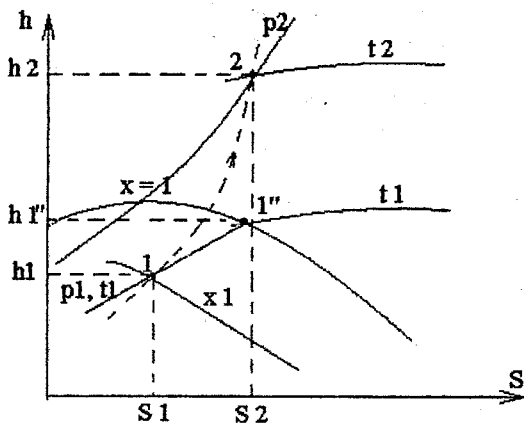


Рисунок 3.2

Тиск в кінцевій точці процесу, кПа

$$P_2 = P_1 + 140 = 160 + 140 = 300.$$

Кінцеву точку процесу визначасмо на перетині ізохори v_1 з ізобарою $P_2 = 300$ кПа. Параметри в точці 2: $t_2 = 360^\circ\text{C}$; $h_2 = 3200$ кДж/кг;
 $S_2 = 7,92$ кДж/(кг·К).

Для визначення теплоти пароутворення пари з тиском $P_1=160$ кПа визначаємо на діаграмі точку 1'' на перетині ізобари P_1 з кривою насичення $x = 1$. Ентальпія в точці 1'' $h_1 = 2700$ кДж/кг.

Теплота парообразования кДж/кг

$$r = (h'' - h_1) / (1 - x_1) = (2700 - 2500) / (1 - 0.91) = 2222.$$

Зміна ентальпії, кДж/кг

$$h = h_2 - h_1 = 3200 - 2500 = 700.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж/кг

$$u = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = (h_2 - h_1) + v_1(P_1 - P_2) = 700 + 1(160 - 300) = 560.$$

Для ізохорного процесу $q = \Delta u = 560 \text{ кДж/кг}$.

Середнє значення теплоємності в процесі, кДж/(кг·К)

$$C_V = q/(t_2 - t_1) = 560/(360 - 113) = 2.267.$$

Зміна ентропії, кДж/(кг·К)

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 7,92 - 6,7 = 1,22.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{\text{nc}} \cdot \Delta S = 700 - 290 \cdot 1,22 = 346,2.$$

Задача 3.1.6. Пара з параметрами $t = 150^{\circ}\text{C}$, $x = 0,95$ перегрівається на 220°C . Визначити теплоту, витрачену на перегрів, середню теплоємність

в процесі, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії та ексергії, якщо $t_{\text{ис}} = 20^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Процес перегріву ізобарний. Задачу розв'язуємо за допомогою $h-s$ діаграми (рис.3.3). Початкову точку процесу 1 визначаємо на перетині ізотерми t_1 з кривою міри сухості x_1 . Параметри в точці 1: $P_1=1500$ кПа; $h_1=2700$ кДж/кг; $v_1 = 0,14$ м³/кг; $S_1=6,25$ кДж/(кг·К).

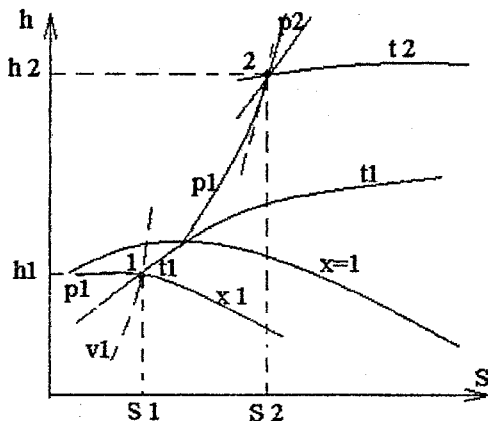


Рисунок 3.3

Оскільки $P_1 = \text{const}$, то точку 2 визначаємо на перетині ізобари P_1 з ізотермою t_2 , яка дорівнює: $t_2 = t_1 + 220 = 370^\circ\text{C}$.

Параметри пари в кінцевій точці процесу: $h_2 = 3200$ кДж/кг; $v_2 = 0,2$ м³/кг; $S_2 = 7,2$ кДж/(кг·К).

Теплота, яка витрачена на перегрів пари, кДж/кг

$$q = h_2 - h_1 = \Delta h = 3200 - 2700 = 500.$$

Середня теплоємність в процесі, кДж/(кг·К)

$$C_p = q / \Delta t = 500 / 220 = 2,272.$$

Робота зміни об'єму, кДж/кг

$$l_v = P (v_2 - v_1) = 1500(0,2 - 0,14) = 90.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж/кг

$$\Delta U = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = (h_2 - h_1) - P(v_2 - v_1) = q - l_v = 500 - 90 = 410.$$

Зміна ентропії, кДж/(кг·К)

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 7,2 - 6,25 = 0,95.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta l_x = h_2 - h_1 - T_{\text{ис}} \Delta S = 500 - 293 \cdot 0,95 = 221,65.$$

Задача 3.1.7. До пари з параметрами: $\rho_1 = 2$ кг/м³, $x_1 = 0,95$ ізотермічно підводиться $0,13733$ кВт·год теплоти. Визначити роботу процесу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, теплоту пароутворення для по-

чаткового тиску. Температура навколишнього середовища на 114°C менша, ніж пари.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою $h-s$ діаграми (рис. 3.4.). Початкову точку визначаємо на перетині ізохори $v_1 = 1/\rho_1 = 1/2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ з лінією міри сухості $x_1 = 0,95$.

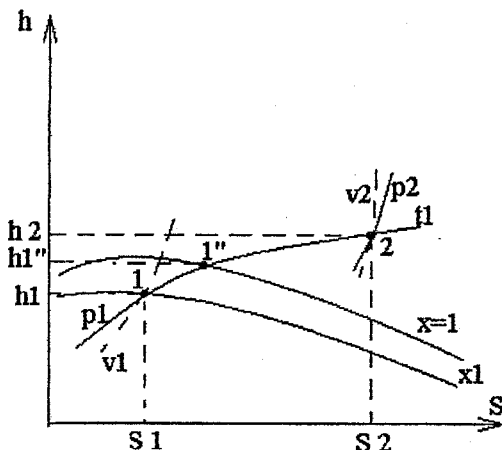


Рисунок 3.4

Параметри пари в точці 1:

$$P_1 = 350 \text{ кПа}; S_1 = 6,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); h_1 = 2635 \text{ кДж}/\text{кг}; t_1 = 139^{\circ}\text{C}.$$

Підведена теплота в процесі, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$q = 0,13733 \cdot 3600 = 494,4.$$

Для ізотермічного процесу $q = T \Delta S$, звідки

$$\Delta S = S_2 - S_1 = q/T = 494,4/412 = 1,2.$$

Кінцева ентропія в процесі, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

$$S_2 = S_1 + \Delta S = 6,7 + 1,2 = 7,9.$$

Точку 2 визначаємо на перетині ізотерми t_1 з вертикаллю $S_2 = \text{const.}$

Параметри пари в кінцевій точці: $P_2 = 50 \text{ кПа}$; $v_2 = 4 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_2 = 2750 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Зміна ентальпії, $\text{кДж}/\text{кг}$:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 2750 - 2635 = 115.$$

Зміна внутрішньої енергії, $\text{кДж}/\text{кг}$:

$$\Delta u = \Delta h - (P_2 v_2 - P_1 v_1) = 115 - (50 \cdot 4 - 350 \cdot 0,5) = 90.$$

Таким чином, на відміну від ідеальних газів, для реальних газів значення Δu і Δh в ізотермічному процесі не дорівнюють нулю.

Робота процесу, кДж :

$$\ell_v = q - \Delta u = 494,4 - 90 = 404,4.$$

Зміна ексергії, кДж/кг :

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{nc} \Delta s = 115 - (T_1 - 114) \Delta s = 115 - (412 - 114) \cdot 1,2 = -242,6.$$

Отже, не дивлячись на підведення енергії, роботоспроможність пари зменшується внаслідок необоротних втрат.

Для визначення теплоти пароутворення пари з початковим тиском визначаємо ентальпію сухої насиченої пари: $h'' = 2735$ кДж/кг.

Теплота пароутворення, кДж/кг :

$$r = (h'' - h_1) / (1 - x_1) = (2735 - 2635) / (1 - 0,95) = 2000.$$

Задача 3.1.8. Пара з початковими параметрами $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $v_1 = 0,07$ м³/кг адіабатно розширюється в турбіні. При цьому її густина зменшується в 285,71 раза. Визначити роботу, яку виконує пара в турбіні, показник адіабати в процесі, питому витрату пари на виробництво 1 кВт·год. енергії, зміну внутрішньої енергії та ексергії. Температура навколишнього середовища на 16°C менша від температури відпрацьованої в турбіні пари.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою h - s діаграми.

Початкову точку визначаємо на перетині ізохори v_1 та ізотерми t_1 (рис. 3.5).

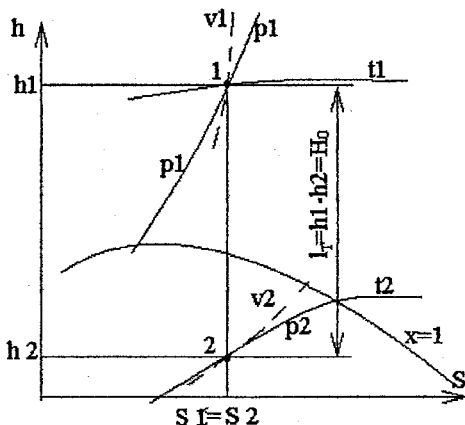


Рисунок 3.5

Параметри перегрітої пари в точці 1: $P_1 = 5000$ кПа; $S_1 = 7$ кДж/(кг·К); $h_1 = 3450$ кДж/кг. Для адіабатного процесу $q = 0$, а $S_1 = S_2 = \text{const}$. Оскільки $\rho = 1/v$, то в скільки разів зменшиться густина, в стільки разів збільшиться питомий об'єм, тобто $v_2 = v_1 \cdot 285,71 = 0,07 \cdot 285,71 = 20$ м³/кг.

Кінцеву точку визначаємо на перетині ізентропи $S_1 = S_2$ з ізохорою v_2 . Параметри пари після розширення в турбіні:

$t_2 = 36^\circ\text{C}$; $P_2 = 6$ кПа; $h_2 = 2150$ кДж/кг; $x_2 = 0,83$.

В адіабатному процесі робота, яка виконується в турбіні (робота змі-

ни тиску) дорівнює зміні ентальпії зі зворотним знаком, тобто

$$\ell_{\tau} = -\Delta h = h_1 - h_2.$$

Ця робота називається теоретичним теплоперепадом в турбіні (H_0).

Теоретична робота пари в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{\tau} = H_0 = h_1 - h_2 = 3450 - 2150 = 1300.$$

Оскільки енергія 1 кВт год. еквівалентна 3600 кДж, то питома витрата пари дорівнюватиме, кг/(кВт·год)

$$d = 3600/\ell_{\tau} = 3600/1300 = 2,769.$$

Зміна внутрішньої енергії, кДж/кг

$$\Delta u = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = P_1 v_1 - P_2 v_2 - \ell_{\tau} = 5000 \cdot 0,07 - 6 \cdot 20 - 1300 = -1070.$$

Температура навколишнього середовища, °C

$$t_{nc} = t_2 - 16^{\circ}\text{C} = 36 - 16 = 20.$$

Зміна ексергії, кДж/кг

$$\Delta e_x = (h_2 - h_1) - T_{nc} \cdot \Delta S = -\ell_{\tau} = -1300, \text{ оскільки } \Delta S = 0.$$

Отже в адиабатному процесі ексергія зменшується на величину роботи зміни тиску. Із рівняння адиабати $P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$ визначаємо показник адиабати

$$k = \ln(P_1/P_2)/\ln(v_2/v_1) = \ln(5000/6)/\ln(20/0,07) = 1,189.$$

Задача 3.1.9. Пара з параметрами: $P_1 = 10$ МПа, $t_1 = 450^{\circ}\text{C}$ дроселується до п'ятикратного зменшення тиску. Визначити теплоту і роботу пари в процесі, зміну внутрішньої енергії та ексергії. Температура зовнішнього середовища 17°C .

Розв'язування

На h - s діаграмі початкова точка процесу визначається на перетині ізобари P_1 з ізотермою t_1 (рис.3.6).

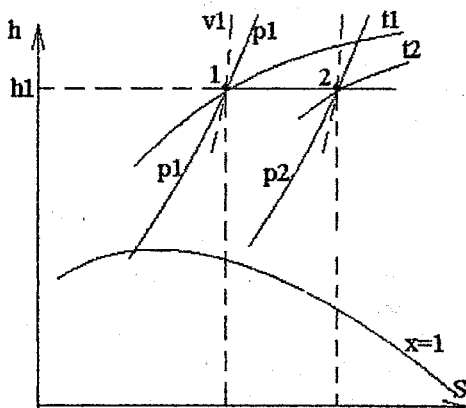


Рисунок 3.6

Параметри пари в точці 1: $v_1 = 0,03$ м³/кг; $S_1 = 6,44$ кДж/(кг·К),

$h_1 = 320$ кДж/кг.

Тиск пари після дроселування, МПа $P_2 = P_1/5 = 10/5 = 2$. Процес

дроселювання здійснюється ізоентальпійно, тобто $h_1 = h_2 = \text{const}$.

Точка 2 процесу визначається на перетині ізоентальпи h_1 з ізобарою P_2 .

Параметри пари в точці 2: $t_2 = 400^\circ\text{C}$; $v_2 = 0,158 \text{ м}^3/\text{кг}$; $S_2 = 7,13 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Зміна внутрішньої енергії, $\text{кДж}/\text{кг}$:

$$\Delta u = \Delta h - (P_2 v_2 - P_1 v_1) = 0 - (P_2 v_2 - P_1 v_1) = P_1 v_1 - P_2 v_2 = \\ = 10000 \cdot 0,03 - 2000 \cdot 0,158 = -16.$$

Середньодинамічна температура в процесі, K

$$T_{\text{cp}} = (T_2 - T_1) / \ln(T_2 / T_1) = (673 - 23) / \ln(673 / 23) = 697,7.$$

Зміна ентропії, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 7,13 - 6,44 = 0,69.$$

Теплота процесу, $\text{кДж}/\text{кг}$:

$$q = T_{\text{cp}} \cdot \Delta S = 697,7 \cdot 0,69 = 481,4.$$

Робота в процесі дроселювання, $\text{кДж}/\text{кг}$:

$$\ell_v = q - \Delta u = 481,4 - (-16) = 497,4.$$

Таким чином, на виконання роботи витрачається як теплота, так і внутрішня енергія.

Зміна ексергії, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{\text{nc}} \Delta S = 0 - 290 \cdot 0,69 = -200,1.$$

Отже, в процесі дроселювання роботоспроможність пари зменшується на величину необоротних втрат енергії.

Задача 3.1.10. На тепловій електричній станції (ТЕС) параметри пари, яка постачається на одну із турбін, складають: $P = 5 \text{ МПа}$, $t = 510^\circ\text{C}$.

Через несправність парогенератора пара з такими параметрами постачатись не може. Але на ТЕС є два джерела пари з параметрами:

$$P_1 = 5 \text{ МПа}, t_1 = 330^\circ\text{C}; P_2 = 5 \text{ МПа}, t_2 = 620^\circ\text{C}.$$

Визначити в якій пропорції треба змішувати ці два потоки пари, щоб забезпечити необхідну температуру перед турбіною. Визначити також зміну внутрішньої енергії та ексергії для обох потоків пари в процесі змішування, якщо $t_{\text{nc}} = 20^\circ\text{C}$

Розв'язування

Зауважимо, що процес змішування можна здійснити лише за умови однакового тиску в потоках пари, тобто $P_1 = P_2$. Задачу розв'язуємо за допомогою $h - s$ діаграми (рис. 3.7.). Пара, яка має надходити на турбіну є сумішшю двох потоків пари.

Параметри такої пари будемо позначати індексом "С". На $h - s$ діаграмі точка С визначиться на перетині ізобари P з ізотермою t . Параметри пари в точці С: $h_c = 3470 \text{ кДж}/\text{кг}$, $v_c = 0,07 \text{ м}^3/\text{кг}$; $S_c = 7,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Точки 1 і 2 для потоків пари визначаємо на перетині відповідних ізобар і ізотерм.

Параметри пари в точках 1 і 2:

$$h_1 = 3020 \text{ кДж}/\text{кг}; v_1 = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг}; S_1 = 6,37 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}); h_2 = 3720 \text{ кДж}/\text{кг}; \\ v_2 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}; S_2 = 7,31 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}).$$

Інші параметри в точці 4: $h_4=3215$ кДж/кг; $v_4=0,1$ м³/кг; $S_4=6,9$ кДж/(кг·К).

Оскільки процес змішування можливо здійснити за умови, коли $P_2=P_3$, то перегріту пару необхідно здроселювати до тиску P_3 . Точку 3 визначаємо на перетині ізобари P_3 з ізотемальною $h_2=h_3$.

Параметри в точці 3: $v_3=0,12$ м³/кг; $t_3=510^{\circ}\text{C}$; $S_3=7,28$ кДж/(кг·К).

На ізобарі P_3 визначаємо точку суміші потоків пари за температурою пари на вході в турбіну $t_c=t_T=450^{\circ}\text{C}$. Інші параметри пари в точці С: $h_c=3350$ кДж/кг; $S_c=7,1$ кДж/(кг·К); $v_c=0,115$ м³/кг.

Температура пари після розширення в турбіні, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_5=t_c/15=450/15=30.$$

Кінцеву точку 5 визначаємо на перетині ізотерми t_5 з ізентропою $S_c=S_5$.

Параметри пари в точці 5: $P_5=4$ кПа; $h_5=2145$ кДж/кг; $x_5=0,83$; $v_5=3$ м³/кг.

Точку 5'' визначаємо на перетині ізобари P_5 з кривою насичення $x=1$. Ентальпія сухої насиченої пари в точці 5'' : $h_3=2555$ кДж/кг.

Зміна внутрішньої енергії та ексергії в процесі 1–2, кДж/кг :

$$\Delta u_{1-2}=h_2-h_1-(P_2v_2-P_1v_1)=800-12000\cdot(0,03-0,01426)=611,12$$

$$\Delta ex_{1-2}=h_2-h_1-T_{nc}(S_2-S_1)=800-303\cdot(6,68-5,49)=439,43.$$

Зміна внутрішньої енергії та ексергії в процесі дроселювання 2–3, кДж/кг :

$$\Delta u_{2-3}=h_3-h_2-(P_3v_3-P_2v_2)=0+P_2v_2-P_3v_3=12000\cdot0,03-3000\cdot0,12=0$$

$$\Delta ex=h_3-h_2-T_{nc}(S_3-S_2)=0-303(7,28-6,68)=-181,8.$$

Рівняння балансу енергій потоків пари в процесі змішування :

$$g_1h_3+(1-g_1)h_4=h_c, \text{ або } g_1\cdot3485+(1-g_1)\cdot3215=3350, \text{ звідки } g_1=0,5=g_2.$$

Отже для утворення суміші витрата першого потоку пари і другого потоку пари складають по 27 т/год.

Зміна внутрішньої енергії та ексергії в процесі змішування потоків пари 3-4, кДж/кг

$$\Delta u_{3-4}=h_4-h_3-(P_4v_4-P_3v_3)=3215-3485-3000(0,1-0,12)=-330;$$

$$\Delta ex_{3-4}=h_4-h_3-T_{nc}(S_4-S_3)=3215-3485-303(6,9-7,28)=-154,86.$$

Питома робота пари в турбіні, кДж/кг :

$$\ell_T=H_0=h_c-h_5=3350-2145=1205.$$

Зміна внутрішньої енергії та ексергії в процесі адіабатного розширення пари в турбіні С–5, кДж/кг :

$$\Delta u_{c-5}=-H_0-(P_5v_5-P_4v_4)=1205-(4\cdot30-3000\cdot0,1)=-1025$$

$$\Delta ex_{c-5}=-H_0-T_{nc}(S_5-S_c)=-H_0-0=-1205.$$

Теплота пароутворення пари для $P_5=4$ кПа, кДж/кг :

$$r=(h_g''-h_f)/(1-x_5)=(2555-2145)/(1-0,83)=2412.$$

Показник адіабати в процесі С-5

$$k=\ln(P_C/P_5)/\ln(v_5/v_c)=\ln(3000/4)/\ln(30/0,115)=1,19.$$

3.2 Задачі для самостійної роботи

Задачі цього розділу розв'язуються за допомогою h - s діаграми.

Задача 3.2.1. Від пари з параметрами $P_1 = 0,5 \text{ кг/м}^3$, $\rho_1 = 0,5 \text{ МПа}$ ізо-термічно відводиться $0,045 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти, після чого вона адиабатно стискається до шестикратного збільшення тиску. Далі пара дроселюється, внаслідок чого її температура зменшується на 5°C . Здросельована пара надходить в турбіну, де адиабатно розширюється до двохсоткратного зменшення густини. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботи стиску і розширення пари, показник адиабати в процесі стиску, теплоту пароутворення пари в кінцевій точці.

Задача 3.2.2. Пара з параметрами $t_1 = 600^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 28,57 \text{ кг/м}^3$ змішується з потоком пари, температура якої 400°C , а витрата втричі менша, ніж першого. Суміш дроселюється до двократного зменшення густини, після чого виконує роботу в турбіні до кінцевої температури 40°C . Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, показник адиабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.3. Пара з параметрами $T_1 = 673 \text{ K}$, $\rho_1 = 16,6 \text{ кг/м}^3$ дроселюється до п'ятикратного збільшення об'єму, після чого змішується з парою, температура якої 600°C , а витрата вдвічі більша, ніж першої. Суміш виконує роботу в турбіні, розширюючись до кінцевої міри сухості $0,88$. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, показник адиабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.4. Водяна пара з параметрами $P_1 = 8 \text{ МПа}$, $x_1 = 0,95$ перегрівається за рахунок підведення $0,25 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії. Перегріта пара дроселюється до п'ятикратного зменшення густини, а потім виконує роботу в турбіні, розширюючись до кінцевої температури 30°C . Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, теплоємність пари в процесі перегріву, роботу пари в турбіні та теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.5. Водяна пара з параметрами $t_1 = 570^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 25 \text{ кг/м}^3$ змішується з парою, температура якої 400°C , а витрата вдвічі менша, ніж першої. Суміш дроселюється до чотирикратного зменшення густини, після чого виконує роботу в турбіні до п'ятнадцятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, показник адиабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.6. На перегрів пари з параметрами $\rho_1 = 20 \text{ кг/м}^3$, $x_1 = 0,98$ витрачається $0,15 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії. Перегріта пара дроселюється до двократного зменшення густини, а потім змішується з парою, температура якої 600°C , а витрата вдвічі більша, ніж першої. Суміш виконує роботу в турбіні, розширюючись до стократного зменшення густини. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, теплоємність в процесі перегріву, роботу пари в турбіні, показник адиабати.

Задача 3.2.7. Пара з параметрами $t_1 = 185^\circ\text{C}$, $x_1 = 0,9$ адиабатно стис-

кається до 33 кратного збільшення густини. Далі пара ізотермічно розширюється до чотирикратного зменшення тиску, а потім виконує роботу в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, теплоту в ізотермічному процесі, роботу стиску і розширення пари, показник адіабати в першому процесі, теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.8. Пара з параметрами $P_1 = 9$ МПа, $t_1 = 560^\circ\text{C}$ змішується з парою температура якої 450°C , а витрата вдвічі менша, ніж першої. Суміш дроселюється до трикратного зменшення густини після чого виконує роботу в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в турбіні, показник адіабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.9. Від пари з тиском $0,12$ МПа і температурою 150°C ізотермічно відводиться $0,1$ кВт-год теплоти, після чого вона перегрівається на 350°C . Перегріта пара дроселюється до двократного зменшення густини, а потім виконує роботу в турбіні, розширюючись до кінцевої температури 40°C . Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, теплоту і роботу в другому процесі, роботу в турбіні, теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.10. Пара з параметрами $\rho_1 = 1$ кг/м³, $x_1 = 0,9$ стискається до двократного зменшення об'єму після чого перегрівається за рахунок підведення $0,25$ кВт-год енергії. Перегріта пара змішується з парою, температура якої 400°C , а витрата вдвічі більша, ніж першої. Суміш виконує роботу в турбіні, розширюючись до початкової міри сухості. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, теплоту пароутворення в початковій точці, роботу і теплоємність в процесі перегріву, роботу в турбіні та показник адіабати.

Задача 3.2.11. Пара з параметрами $P_1 = 14$ МПа, $t_1 = 560^\circ\text{C}$ дроселюється до трикратного зменшення густини, після чого змішується з парою, температура якої 350°C , а витрата вдвічі менша, ніж першої. Суміш пари виконує роботу в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в турбіні та теплоту пароутворення в кінцевій точці. Визначити також як зміниться робота турбіни, якщо не застосувати процес дроселювання пари.

Задача 3.2.12. До водяної пари з параметрами: $P_1 = 12$ МПа і $\rho_1 = 33,33$ кг/м³ ізотермічно підводиться $0,065$ кВт-год енергії, після чого пара дроселюється до зменшення її температури на 10°C . Далі пара змішується з парою, температура якої 350°C , а витрата вдвічі менша, ніж першої. Суміш виконує роботу в турбіні, розширюючись до кінцевої температури 30°C . Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в ізотермічному процесі, роботу пари в турбіні та теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.13. Пара з параметрами: $\rho_1 = 0,2$ кг/м³ і $x_1 = 0,9$ стискається

в процесі $x=\text{const}$ до стократного підвищення тиску, після чого перегрівається за рахунок підведення 0,2 кВт·год енергії. Перегріта пара розширюється в турбіні до початкового тиску. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, середню теплоємність в першому процесі, роботу в турбіні, показник адіабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.14. Пара з параметрами $P_1 = 10$ МПа і $\rho_1 = 28,57 \text{ кг/м}^3$ ізотермічно стискається за рахунок відведення 0,05 кВт·год енергії, після чого дроселюється до п'ятикратного зменшення густини. Здросельована пара розширюється в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в першому і третьому процесах, показник адіабати і теплоту пароутворення пари за турбіною.

Задача 3.2.15. Пара з параметрами: $P_1 = 3$ МПа і $\rho_1 = 8,333 \text{ кг/м}^3$ змішується з парою, температура якої 350°C , а витрата втричі менша, ніж першої. Після цього тиск суміші підвищується за рахунок ізотермічного відведення 0,025 кВт·год енергії. Далі пара виконує роботу в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в ізотермічному і адіабатному процесах, показник адіабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.16. Пара з параметрами: $P_1 = 5$ МПа і $x_1 = 0,91$ перегрівається на 250°C , після чого дроселюється до двократного збільшення об'єму. Далі пара розширюється в турбіні до кінцевого значення густини $0,1 \text{ кг/м}^3$. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, середню теплоємність і роботу пари в першому процесі, роботу пари в турбіні, показник адіабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.17. Від водяної пари з параметрами: $P_1 = 1,6$ МПа і $t = 500^\circ\text{C}$ ізотермічно відводиться 0,05 кВт·год енергії після чого вона дроселюється до чотирикратного зменшення густини. Здросельована пара виконує роботу в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, показник адіабати, роботу пари в турбіні та теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.18. Пара з параметрами: $P_1 = 0,3$ МПа і $\rho_1 = 8,333 \text{ кг/м}^3$ змішується з парою, температура якої 300°C , а витрата втричі менша, ніж першої. Суміш дроселюється до зменшення температури на 10°C після чого виконує роботу в турбіні, розширюючись до температури 30°C . Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, теплоту пароутворення в кінцевій точці. Визначити також як зміниться робота в турбіні якщо не застосовувати процес дроселювання.

Задача 3.2.19. Пара з параметрами: $P_1 = 3,5$ МПа і $x_1 = 0,85$ розширюється в процесі $x=\text{const}$ до двократного зменшення густини після чого перегрівається на 240°C . Перегріта пара змішується з парою, температура якої 600°C , а витрата втричі менша, ніж першої. Суміш пари розширюється в турбіні до початкової міри сухості. Визначити зміну внутрішньої енергії

та ексергії в процесах, теплоту пароутворення в початковій точці, роботу пари в турбіні та показник адіабати.

Задача 3.2.20. Водяна пара з параметрами: $P_1 = 6$ МПа і $t_1 = 600^\circ\text{C}$ змішується з парою, температура якої 300°C , а витрата втричі менша, ніж першої. Суміш пари дроселюється до двократного зменшення густини після чого розширюється в турбіні до дванадцятикратного зменшення температури. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, теплоту пароутворення в кінцевій точці. Визначити також як зміниться робота в турбіні якщо виключити процес дроселювання.

Задача 3.2.21. Суха насичена пара з густиною 40 кг/м^3 дроселюється, внаслідок чого її температура зменшується на 70°C . Здросельована пара перегрівастся на 230°C після чого розширюється в турбіні до п'ятнадцятикратного зменшення температури. Визначити теплоту пароутворення здросельованої пари, роботу і теплоємність в процесі перегріву пари, зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні та показник адіабати.

Задача 3.2.22. Пара з параметрами: $t_1 = 550^\circ\text{C}$ і $\rho_1 = 25 \text{ кг/м}^3$ дроселюється до п'ятикратного збільшення об'єму, після чого розширюється в турбіні до стократного зменшення густини. Далі пара стискається до десятикратного збільшення тиску в процесі $x = \text{const}$. Визначити теплоту пароутворення в кінцевій точці, зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в турбіні та показник адіабати.

Задача 3.2.23. Пара з параметрами: $t_1 = 540^\circ\text{C}$ і $\rho_1 = 28,57 \text{ кг/м}^3$ змішується з парою, температура якої 300°C , а витрата в п'ять разів менше, ніж першої. Суміш пари дроселюється до трикратного зменшення густини, після чого розширюється в турбіні до температури 40°C . Визначити зміни внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу пари в турбіні, показник адіабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.24. Суха насичена пара з температурою 290°C перегрівастся до двократного зменшення густини, після чого дроселюється до зменшення температури на 10°C . Здросельована пара розширюється в турбіні до десятикратного зменшення температури. Визначити теплоту, яка витрачена на перегрівання пари та середню теплоту процесу, зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в турбіні та теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Задача 3.2.25. Пара з параметрами: $P_1 = 10$ МПа і $\rho_1 = 28,57 \text{ кг/м}^3$ змішується з парою, температура якої 300°C , а витрата в п'ять разів більша, ніж першої. Суміш пари ізотермічно розширюється за рахунок підведення $0,045 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії. Далі пара виконує роботу в турбіні до тридцятикратного зменшення тиску. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, роботу в ізотермічному процесі, показник адіабати і роботу пари в турбіні, теплоту пароутворення в кінцевій точці.

4 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ З ВОЛОГИМ ПОВІТРЯМ

4.1 Приклади розв'язання задач

Задача 4.1.1. Вологе повітря з температурою 50°C і тиском 1 бар має температуру точки роси 40°C . Визначити відносну і абсолютну вологість повітря, його вологовміст, газову сталу, уявну молекулярну масу, густину, ентальпію вологого повітря.

Розв'язування

Із таблиць додатка Д визначаємо тиски насичення для температур 40 і 50°C , які дорівнюють: $P_R = 7,375 \text{ кПа}$ і $P_n = 12,335 \text{ кПа}$.

Відносна вологість повітря, %

$$\phi = (P_R/P_n)100 = (7,375/12,335)100 = 59,7.$$

Абсолютна вологість повітря, кг/м^3

$$\rho = P_R/(R_n \cdot T_{\text{вл}}) = 7,375/(0,462 \cdot 323) = 0,0494,$$

де $R_n = 8,314/\mu_n = 8,314/18 = 0,462 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ – газова стала пари.

Вологовміст повітря, кг/кг

$$d = 0,622 \cdot P_R/(P - P_R) = 0,622 \cdot 7,375/(100 - 7,375) = 0,0495.$$

Газова стала вологого повітря, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$

$$R_{\text{вл}} = (R_{\text{сп}} + R_n \cdot d)/(1 + d) = (0,287 + 0,462 \cdot 0,0495)/(1 + 0,0495) = 0,2951.$$

Уявна молекулярна маса вологого повітря, кг/кМоль

$$\mu_{\text{вл}} = 8,314/R_{\text{вл}} = 8,314/0,295 = 28,16.$$

Густина сухого повітря, кг/м^3

$$\rho_{\text{сп}} = P/(R_{\text{сп}} \cdot T_{\text{пв}}) = 100/(0,287 \cdot 323) = 1,078.$$

Густина вологого повітря, кг/м^3

$$\rho_{\text{вл}} = \rho_{\text{сп}}(1 + d)/(1 + 1,61 \cdot d) = 1,078(1 + 0,0495)/(1 + 1,61 \cdot 0,0495) = 1,0478.$$

Ентальпія вологого повітря, кДж/кг

$$h_{\text{вл}} = C_{p\text{пв}} \cdot t_{\text{пв}} + (r + C_{p\text{п}} \cdot t_{\text{п}}) \cdot d = 1 \cdot 50 + (2500 + 1,96 \cdot 50) \cdot 0,0495 = 178,6.$$

Розв'язуємо задачу за допомогою h - d діаграми вологого повітря

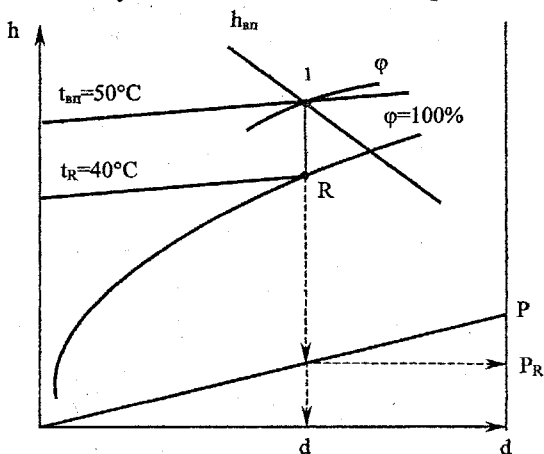


Рисунок 4.1

(рис.4.1) Точку роси R визначаємо на перетині ізотерми 40°C з кривою насичення ($\varphi=100\%$). Точку 1 визначаємо на перетині ізотерми $t_{\text{вп}}=50^\circ\text{C}$ з лінією $d=\text{const}$. Визначаємо параметри вологого повітря: $h = 178 \text{ кДж/кг}$; $d=50\text{г/кг} = 0,05 \text{ кг/кг}$; $\varphi = 60\%$; $P_R = 7,4 \text{ кПа}$.

Газова стала вологого повітря, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

$$R_{\text{вл}} = (0,278 + 0,462 \cdot 0,05) / (1 + 0,05) = 0,2953.$$

Уявна молекулярна маса, кг/кмоль

$$\mu_{\text{вл}} = 8,314 / 0,2953 = 28,15.$$

Густина вологого повітря, кг/м^3

$$\rho_{\text{вл}} = 1,078 \cdot (1 + 0,05) / (1 + 1,61 \cdot 0,05) = 1,0475.$$

Задача 4.1.2 Вологе повітря з параметрами: $t_1 = 55^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 1,0496 \text{ кг/м}^3$ і витратою $3429,877 \text{ м}^3/\text{год}$ спочатку охолоджується в охолодній камері до температури 17°C , а потім підігрівається в повітропідігрівнику за рахунок підведення $0,018 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії до кожного кілограма повітря. Підігріте повітря змішується з повітрям, параметри якого складають $\varphi=10\%$, $t=80^\circ\text{C}$, а витрата вдвічі менше, ніж першого. Визначити початкові та кінцеві параметри повітря в процесах, тепловологісні відношення, кількість вологи, що видалена із повітря в охолодній камері.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою h - d діаграми. Для визначення початкової точки спочатку обчислюємо вологовміст.

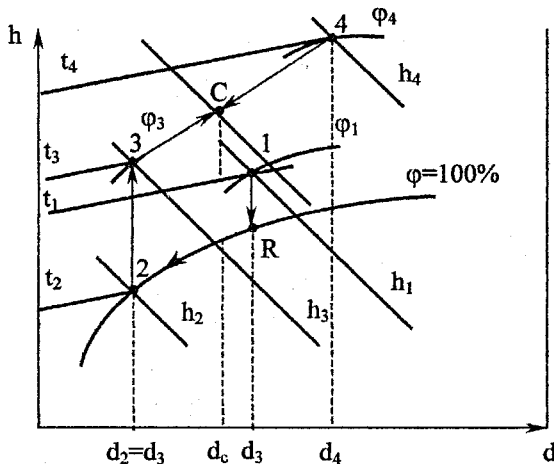


Рисунок 4.2

Густина сухого повітря для $t_1 = 55^\circ\text{C}$, кг/м^3

$$\rho_{\text{сул}} = P / (R \cdot T_1) = 100 / (0,287 \cdot 328) = 1,0623.$$

Підставимо значення $\rho_{сп1}$ в формулу для визначення густини вологого повітря

$$\rho_{вп} = \rho_{сп} \cdot (1 + d_1) / (1 + 1,61 \cdot d_1), \text{ тобто } 1,0496 = 1,0623 \cdot (1 + d_1) / (1 + 1,61 \cdot d_1).$$

З останнього рівняння визначаємо вологовміст в першій точці, кг/кг

$$d_1 = 0,02 \text{ кг/кг} = 20 \text{ г/кг}.$$

Отже, точку 1 на h-d діаграмі визначаємо на перетині ізотерми t_1 і лінії $d_1 = \text{const}$ (рис.4.2). Інші параметри вологого повітря в точці 1: $h_1 = 108 \text{ кДж/кг}$; $\phi_1 = 20\%$.

Масова витрата першого потоку повітря, кг/с

$$G_1 = V_1 \cdot \rho_1 / 3600 = 3429,877 \cdot 1,0496 / 3600 = 1.$$

Масова витрата другого потоку повітря, кг/с

$$G_2 = G_1 / 2 = 1 / 2 = 0,5.$$

Процес охолодження повітря здійснюється за умови $d = \text{const}$ до кривої насиченого повітря ($\phi = 100\%$), тобто до точки R (точка роси). Після цього охолодження здійснюється по лінії $\phi = 100\%$ до перетину її з ізотермою t_2 . визначаємо параметри повітря в точці 2: $d_2 = 10 \text{ г/кг} = 0,01 \text{ кг/кг}$; $h_2 = 46 \text{ кДж/кг}$.

Теплота, яка віддана повітрям в охолодній камері, кВт

$$Q_{1-2} = G_1 \cdot (h_2 - h_1) = 1 \cdot (46 - 108) = -62.$$

Кількість вологи, що звільнена в охолодній камері, кг/с

$$W = G_1 \cdot (d_2 - d_1) = 1 \cdot (0,01 - 0,02) = -0,01.$$

Тепловологісне відношення в процесі охолодження повітря, кДж/кг

$$\varepsilon_{1-2} = Q_{1-2} / W = -62 / (-0,01) = 6200.$$

Процес нагрівання повітря 2-3 здійснюється за умови $d_2 = \text{const}$. Оскільки теплота, яка затрачена на підігрівання повітря, дорівнює, кДж/с

$Q_{2-3} = G_1 \cdot (h_3 - h_2) = 1 \cdot (h_3 - 46) = 0,015 \cdot 3600 = 54$, то ентальпія в точці 3 складає, кДж/кг

$$h_3 = h_2 + Q_{2-3} / G_1 = 46 + 54 / 1 = 100.$$

Точку 3 визначаємо на перетині лінії $d_2 = d_3 = \text{const}$ з ізоентальпою $h_3 = 100 \text{ кДж/кг}$. Інші параметри в точці 3: $\phi_3 = 7\%$; $t_3 = 68^\circ\text{C}$.

Тепловологісне відношення в процесі

$$\varepsilon = \Delta h / \Delta d = (100 - 46) / 0 = \infty.$$

Точку 4, яка характеризує стан другого потоку повітря визначаємо на перетині лінії $\phi_3 = 10\%$ з ізотермою $t_4 = 80^\circ\text{C}$. Інші параметри в точці 4: $d_4 = 32 \text{ г/кг} = 0,032 \text{ кг/кг}$; $h_4 = 166 \text{ кДж/кг}$. Точка С, яка характеризує стан суміші, знаходиться на лінії 3-4. Із рівнянь матеріального і вологісного балансів $G_c = G_1 + G_2 = 1 + 0,5 = 1,5$; $G_c \cdot d_c = G_1 d_3 + G_2 d_4 = 1 \cdot 0,01 + 0,5 \cdot 0,032 = 0,026$, визначаємо вологовміст суміші, кг/кг, $D_c = 0,026 / 1,5 = 0,01733$.

Точку С визначаємо на перетині лінії 3-4 з лінією $d_c = \text{const}$. Інші параметри в точці С: $\phi_c = 8\%$; $h_c = 119 \text{ кДж/кг}$; $t_c = 72^\circ\text{C}$.

Зміна ентальпії потоків повітря в процесі змішування, кДж/кг:

$$\Delta h_{3-c} = h_c - h_3 = 119 - 100 = 19$$

$$\Delta h_{4-c} = h_c - h_4 = 119 - 166 = -47.$$

Зміна вологовмісту потоків повітря в процесі змішування, кг/кг

$$\Delta d_{3-c} = d_c - d_3 = 0,01733 - 0,01 = 0,0733$$

$$\Delta d_{4-c} = d_c - d_4 = 0,01733 - 0,032 = -0,01467.$$

Тепловологісні відношення в процесах змішування потоків повітря, кДж/кг

$$\varepsilon_{3-c} = \Delta h_{3-c} / \Delta d_{3-c} = 19 / 0,0733 = 2592,08$$

$$\varepsilon_{4-c} = \Delta h_{4-c} / \Delta d_{4-c} = -47 / (-0,01467) = 3203,8.$$

Задача 4.1.3. Вологе повітря з початковими параметрами $t_0=15^\circ\text{C}$, $\varphi_0=70\%$ і витратою $45000 \text{ м}^3/\text{год}$ прокачується вентилятором через повітропідігрівник, де його температура підвищується до значення t_1 . Підігріте повітря надходить в сушильну камеру теоретичної сушарки, де випаровує вологу з висушуваного матеріалу з витратою $G_{\text{вм}}=3600 \text{ кг/год}$. Визначити до якої температури необхідно нагрівати повітря в повітропідігрівнику за умови, що температури за показаннями психрометра на виході з сушильної камери мають дорівнювати $t_c=45^\circ\text{C}$ $t_M=35^\circ\text{C}$. визначити також теплоту, що витрачена на підігрів повітря, кількість випареної води, витрату висушеного матеріалу, тепловологісне відношення в процесі сушки.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою h-d діаграми. Схема теоретичної сушарки та зображення процесів на h-d діаграмі показані на рис. 4.3.

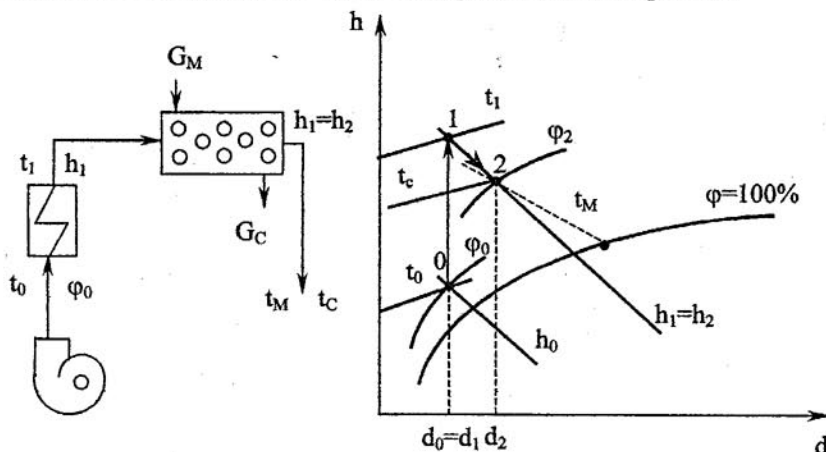


Рисунок 4.3 - Схема сушарки і зображення процесів на h-d -діаграмі

Початкову точку О на h-d діаграмі визначаємо на перетині ліній t_0 і φ_0 . Інші параметри в цій точці: $d_0=8 \text{ г/кг}=0,008 \text{ кг/кг}$; $h_0=34 \text{ кДж/кг}$.

Густина сухого повітря в точці 0, кг/м^3

$$\rho_{\text{сн}} = P / (R \cdot T_0) = 100 / (0,287 \cdot 288) = 1,21.$$

Густина вологого повітря на вході в повітропідігрівник, кг/м^3

$$\rho_0 = \rho_{\text{сп}} \cdot (1 + d_0) / (1 + 1,61 \cdot d_0) = 1,21(1 + 0,008) / (1 + 1,61 \cdot 0,008) = 1,2.$$

Масова витрата повітря, кг/с

$$G = V \cdot \rho_0 / 3600 = 45000 \cdot 1,2 / 3600 = 15.$$

Точку 2, яка характеризує стан вологого повітря на виході з сушильної камери, визначаємо на перетині ізотерми t_m і t_c .

Інші параметри в точці 2: $d_2 = 0,03 \text{ кг/кг}$; $h_2 = 123 \text{ кДж/кг}$; $\varphi_2 = 50\%$.

Оскільки процес підігрівання повітря здійснюється за умови $d_0 = \text{const}$, а процес сушіння – за умови $h_2 = \text{const}$, то точку 1 визначаємо на перетині лінії $d_0 = \text{const}$ з ізоентальною $h_2 = \text{const}$. Температури в точці 1 $t_1 = 101^\circ\text{C}$.

Теплова потужність повітропідігрівника, кВт

$$Q = G \cdot (h_1 - h_0) = G \cdot (h_2 - h_0) = 15 \cdot (123 - 34) = 1335.$$

Кількість вологи, що випарена із висушуваного матеріалу в сушильній камері, кг/с

$$W = G \cdot (d_2 - d_1) = G \cdot (d_2 - d_0) = 15 \cdot (0,03 - 0,008) = 0,33.$$

Питома теплота, яка необхідна для випаровування 1 кг вологи з матеріалу (тепловологісне відношення), кДж/кг

$$\epsilon = Q/W = 1335/0,33 = 4045,45.$$

Витрата сухого матеріалу, кг/год

$$G_c = G_m - W \cdot 3600 = 3600 - 0,33 \cdot 3600 = 2412.$$

Задача 4.1.4. Для вентиляції приміщень запропоновано використовувати повітря з параметрами: $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 80\%$. Передбачається спочатку підігрівати повітря до певної температури t_1 , а потім зволожувати його сухою насиченою парою з тиском $0,1 \text{ МПа}$ з тим, щоб параметри повітря склалися: $t_2 = 30^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 60\%$. Визначити до якої температури треба підігрівати повітря перед зволоженням і теплоту, необхідну для підігрівання, необхідну витрату пари на зволоження 1 кг повітря, тепловологісне відношення в процесі зволоження повітря.

Розв'язування

Із додатка Д визначаємо тиск насичення для $t_0 = 0^\circ\text{C}$ і $t_2 = 30^\circ\text{C}$: $P_{\text{н}0} = 0,6108 \text{ кПа}$; $P_{\text{н}2} = 4,241 \text{ кПа}$.

Вологовміст повітря в точках 0 і 2, кг/кг

$$d_0 = 0,622 \cdot \varphi_0 \cdot \frac{P_{\text{н}0}}{100 - \varphi_0 \cdot P_{\text{н}0}} = 0,622 \cdot 0,8 \cdot \frac{0,6108}{100 - 0,8 \cdot 0,6108} = 0,003$$

$$d_2 = 0,622 \cdot \varphi_2 \cdot \frac{P_{\text{н}2}}{100 - \varphi_2 \cdot P_{\text{н}2}} = 0,622 \cdot 0,6 \cdot \frac{4,241}{100 - 0,6 \cdot 4,241} = 0,0162.$$

Ентальпія повітря в початковій та кінцевій точках, кДж/кг

$$h_0 = 1 \cdot t_0 + (2500 + 1,96 \cdot t_0) \cdot d_0 = 1 \cdot 0 + (2500 + 1,96 \cdot 0) \cdot 0,003 = 7,5$$

$$h_2 = 1 \cdot t_2 + (2500 + 1,96 \cdot t_2) \cdot d_2 = 1 \cdot 30 + (2500 + 1,96 \cdot 30) \cdot 0,0162 = 71,5.$$

Оскільки процес нагрівання повітря здійснюється за умови $d=\text{const}$, то $d_1 = d_0 = 0,003$ кг/кг. Позначимо витрату пари через D . Тоді з рівняння матеріального балансу процесу зволоження $d_2 = d_1 + D = d_0 + D$ визначаємо питому витрату пари на зволоження 1 кг повітря, кг/кг

$$D = d_2 - d_0 = 0,0162 - 0,003 = 0,0132.$$

Із додатка Д визначаємо ентальпію сухої насиченої пари для $P=0,1$ МПа, яка йде на зволоження повітря: $h''=2675$ кДж/кг.

Запишемо рівняння теплового балансу процесу зволоження, кДж/кг
 $h_2 = h_1 + D \cdot h''$, або $71,5 = h_1 + 0,0132 \cdot 2675$. Звідки $h_1 = 36,2$ кДж/кг.

Тепловологісне відношення в процесі зволоження повітря, кДж/кг
 $\varepsilon = (h_2 - h_1)/(d_2 - d_1) = (71,5 - 36,2)/0,0132 = 2674,2$.

Питома теплота, яка витрачається на підігрівання повітря, кДж/кг
 $q_{0-1} = h_1 - h_0 = 36,2 - 7,5 = 28,7$.

Запишемо рівняння для визначення ентальпії повітря в точці 1

$$h_1 = 36,2 = 1 \cdot t_1 + (2500 + 1,96 \cdot t_1) \cdot d_1.$$

З урахуванням значення $d_1 = 0,003$ кг/кг визначаємо температуру повітря після його підігрівання: $t_1 = 28,5^\circ\text{C}$.

Задача 4.1.5. В камері змішування потік повітря з витратою $V_1=3600$ м³/год і параметрами: $t_1=20^\circ\text{C}$, $\phi_1=40\%$ змішується з потоком повітря, витрата якого $V_2=5400$ м³/год, а параметри складають $t_2=60^\circ\text{C}$, $\phi_2=20\%$. Суміш зволожується водою з температурою 45°C і надходить в склад готової продукції підприємства, в якому відносна вологість має бути 70% . Визначити необхідну витрату води для зволоження повітря, його параметри після зволоження, тепловологісне відношення.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою h - d діаграми, на якій спочатку ви-

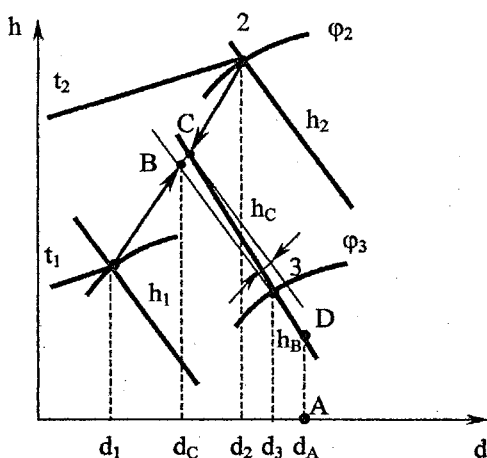


Рисунок 4.5

значаємо точки 1 і 2, що характеризують стан потоків повітря до змішування (рис.4.5). Точку 1 визначаємо на перетині ізотерми t_1 з лінією ϕ_1 . Параметри в точці 1: $d_1 = 6 \text{ г/кг} = 0,006 \text{ кг/кг}$; $h_1 = 34 \text{ кДж/кг}$.

Точку 2 визначаємо на перетині ізотерми t_2 з лінією ϕ_2 . Параметри в точці 2: $d_2 = 26 \text{ г/кг} = 0,026 \text{ кг/кг}$; $h_2 = 130 \text{ кДж/кг}$.

Точки 1 і 2 на діаграмі з'єднуємо прямою лінією 1-2.

Визначаємо густину повітря в точках 1 і 2, кг/м^3

$$\rho_1 = \frac{P}{R \cdot T_1} \cdot \left(\frac{1 + d_1}{1 + 1,61 \cdot d_1} \right) = \frac{100}{0,287 \cdot 293} \cdot \left(\frac{1 + 0,006}{1 + 1,61 \cdot 0,006} \right) \approx 1,185$$

$$\rho_2 = \frac{P}{R \cdot T_2} \cdot \left(\frac{1 + d_2}{1 + 1,61 \cdot d_2} \right) = \frac{100}{0,287 \cdot 333} \cdot \left(\frac{1 + 0,026}{1 + 1,61 \cdot 0,026} \right) \approx 1,03.$$

Масові витрати потоків повітря, кг/с

$$G_1 = V_1 \cdot \rho_1 / 3600 = 3600 \cdot 1,185 / 3600 = 1,185$$

$$G_2 = V_2 \cdot \rho_2 / 3600 = 5400 \cdot 1,03 / 3600 = 1,545.$$

Масова витрата суміші, кг/с

$$G_c = G_1 + G_2 = 1,185 + 1,545 = 2,73.$$

Масові частки потоків в суміші

$$g_1 = G_1 / G_c = 1,185 / 2,73 = 0,434; g_2 = 1 - g_1 = 1 - 0,434 = 0,566.$$

Вологовміст суміші, кг/кг

$$d_c = g_1 \cdot d_1 + g_2 \cdot d_2 = 0,434 \cdot 0,006 + 0,566 \cdot 0,026 = 0,0173.$$

Ентальпія суміші кДж/кг

$$h_c = g_1 \cdot h_1 + g_2 \cdot h_2 = 0,434 \cdot 34 + 0,566 \cdot 130 = 88,3.$$

На перетині ліній $h_c = \text{const}$ і $d_c = \text{const}$ визначаємо на діаграмі точку С, яка повинна лежати на прямій 1-2. В процесі зволоження повітря водою остання охолоджується за рахунок витрати теплоти на випаровування води.

Ентальпія води, яка застосовується для зволоження повітря, кДж/кг

$$h_b = C_c \cdot t_b = 4,19 \cdot 45 = 188,55 \quad (4.1)$$

В процесі зволоження тепловологісне відношення дорівнює

$$\varepsilon = \Delta h / \Delta d = h_b \quad (4.2)$$

Приймаємо $\Delta h = 3,3 \text{ кДж/кг}$ і відкладаємо його униз від точки С.

Через точку В проводимо ізоентальпу $h_b = h_c - \Delta h = 88,3 - 3,3 = 85 \text{ кДж/кг}$.

Враховуючи (4.1) із (4.2) визначаємо значення Δd , кг/кг

$$\Delta d = \Delta h / h_b = 3,3 / 188,55 = 0,0175.$$

Вологовміст в точці А дорівнюватиме, кг/кг

$$d_A = d_c + \Delta d = 0,0173 + 0,0175 = 0,0348 \approx 35 \text{ г/кг}.$$

На перетині ліній $h_b = \text{const}$ і $d_A = \text{const}$ визначаємо на діаграмі точку D, яку з'єднуємо з точкою С. Лінія С- D відповідає тепловологісному відношенню і являє собою кутовий коефіцієнт процесу зволоження ε . Шукана точка повітря після зволоження (точка 3) визначається на перетині ліній CD з лінією $\phi = 70\%$. Параметри повітря в точці 3: $d_3 = 22 \text{ г/кг} = 0,022 \text{ кг/кг}$; $h_3 = 87,5 \text{ кДж/кг}$; $t_3 = 32^\circ\text{C}$.

$$G_B = G_C \cdot (d_3 - d_c) = 2,73 \cdot (0,022 - 0,0173) = 0,0128.$$

Розв'язування

В процесі зволоження паром повітря підігрівається. Тепловологісне відношення в цьому разі дорівнює $\varepsilon = \Delta h / \Delta d = h_p$.

$$h_B = h_C + \Delta h = 88,3 + 31,7 = 120 \text{ кДж/кг.}$$

Проводимо на діаграмі ізоентальпу $h_a = 120$ кДж/кг. Приріст вологовмісту для прийнятої величини Δh , кг/кг

$$\Delta d = \Delta h / h_n = 31,7 / 2335 = 0,01357.$$

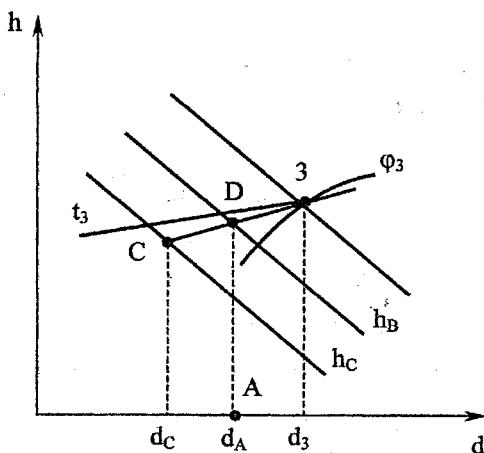


Рисунок 4.6

$$d_A = d_c + \Delta d = 0,0173 + 0,01357 = 0,03081 = 31 \text{ г/кг.}$$

Точку D визначасмо на перетині ізоентальпи h_v з лінією $d_A = \text{const}$. З'єднуємо точки C і D променем. Цей промінь характеризує кутовий коефіцієнт процесу зволоження повітря парою. Точку 3 визначасмо на перетині лінії $\phi_3 = 70\%$ з променем. Параметри зволоженого повітря в точці 3: $d_3 = 32 \text{ г/кг}$; $t_3 = 38^\circ\text{C}$; $h_3 = 122 \text{ кДж/кг}$.

Витрата пари на процес зволоження, кг/с

$$G_{\text{п}} = G_{\text{пв}} \cdot (d_3 - d_c) = 2,73 \cdot (0,032 - 0,0173) = 0,04.$$

Порівнюючи результати, які отримані в задачах 4.1.5 і 4.1.6, неважко побачити, що зволоження повітря водою більш доцільне, ніж парою, оскільки витрата пари втричі перевищує витрату води.

4.2 Задачі для самостійної роботи

Задача 4.2.1 Вологе повітря з параметрами: $t=60^{\circ}\text{C}$, $\varphi=10\%$ зволожується сухою насиченою парою з тиском 1,2 бара, витрата якої дорівнює 108 кг/год. Визначити витрату повітря, його вологовміст, ентальпію, відносну вологість і питомий об'єм, якщо температура зволоженого повітря складає 65°C .

Задача 4.2.2. Вологе повітря з витратою 7200 м³/год і параметрами $t=60^{\circ}\text{C}$, $\varphi=20\%$ зволожується водою, температура якої 80°C . Визначити питомий об'єм та інші параметри зволоженого повітря, якщо витрата води в 100 разів менша за витрату повітря.

Задача 4.2.3. До вологого повітря з початковими параметрами $t_0=10^{\circ}\text{C}$, $\varphi_0=60\%$ підводиться 0,0125 кВтгод теплоти після чого воно надходить в теоретичну сушарку, де його відносна вологість збільшується до 90%. Визначити витрату повітря, його густину та інші параметри на виході з сушарки, якщо витрата вологого і сухого матеріалу в сушарці 720 і 360 кг/год., відповідно.

Задача 4.2.4. Повітря з параметрами: $t=20^{\circ}\text{C}$, $\varphi=60\%$ спочатку нагрівається до певної температури, а потім зволожується водою з температурою 45°C . Визначити до якої температури треба нагріти повітря за умови, що параметри зволоженого повітря мають бути: $t=50^{\circ}\text{C}$, $v=0,94$ м³/кг.

Задача 4.2.5. Від вологого повітря з параметрами: $t=50^{\circ}\text{C}$, $\rho=1,024$ кг/м³ відводиться 0,01 кВтгод теплоти після чого воно змішується з повітрям, параметри якого $t_{\text{м}}=40^{\circ}\text{C}$, $\varphi=30\%$, а витрата втричі більша, ніж першого. Визначити питомий об'єм та інші параметри суміші, тепловологісні відношення.

Задача 4.2.6. Вологе повітря з витратою 5400 м³/год і параметрами: $t_1=25^{\circ}\text{C}$, $\varphi=60\%$ змішується з повітрям, масова витрата якого вдвічі менша, ніж першого, а параметри складають $t_2=50^{\circ}\text{C}$, $\rho_2=1,052$ кг/м³. Суміш зволожується сухою насиченою парою з тиском 1 бар. Визначити витрату пари і параметри повітря після зволоження, якщо його температура на 3°C вища, ніж температура суміші.

Задача 4.2.7. Вологе повітря з витратою 7200 м³/год зволожується з водою, температура якої 60°C . Визначити витрату води, густину та інші параметри повітря після зволоження, якщо початкові параметри повітря: $t_1=75^{\circ}\text{C}$, $\varphi_1=20\%$, а кінцева температура повітря 50°C .

Задача 4.2.8. В теоретичну сушарку надходить повітря з параметра-

ми: $t=62^{\circ}\text{C}$, $v=0,972\text{ м}^3/\text{кг}$. В сушильній камері відносна вологість повітря зростає на 40%. Після сушильної камери повітря змішується з іншим повітрям параметри якого складають: $t_c=50^{\circ}\text{C}$, $t_m=40^{\circ}\text{C}$, а витрата вдвічі більше, ніж першого. Визначити тепловологісне відношення для сушильної камери, питомий об'єм та інші параметри суміші.

Задача 4.2.9. Повітря з газовою сталою $0,292\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ і температурою 50°C зволожується водою, температура якої 70°C , в результаті чого його відносна вологість збільшується вдвічі. Визначити витрату води і параметри повітря після зволоження, якщо витрата повітря складає $1080\text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 4.2.10. Вологе повітря з параметрами $t=40^{\circ}\text{C}$, $\phi=20\%$ зволожується сухою насиченою парою з тиском $0,11\text{ МПа}$. Визначити витрату повітря, його питомий об'єм та інші параметри після зволоження, якщо його температура після зволоження 45°C , а витрата пари $0,05\text{ кг/с}$.

Задача 4.2.11. Вологе повітря з параметрами: $t=40^{\circ}\text{C}$, $v=0,906\text{ м}^3/\text{кг}$ спочатку охолоджується на 10°C , а потім змішується з повітрям, параметри якого дорівнюють: $t=60^{\circ}\text{C}$, $R=0,2937\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, а витрата втричі більша, ніж першого. Визначити тепловологісне відношення в процесі охолодження, параметри суміші.

Задача 4.2.12. Повітря з параметрами: $t=50^{\circ}\text{C}$, $\rho=1,024\text{ кг/м}^3$ змішується з повітрям, параметри якого складають: $t_c=40^{\circ}\text{C}$, $t_m=30^{\circ}\text{C}$, а витрата вдвічі менша, ніж першого. Суміш надходить в повітронагрівник сушильної установки і підігрівається, а потім спрямовується в сушильну камеру, де висушує вологий матеріал з витратою 720 кг/год . Визначити витрати обох потоків повітря, параметри суміші, а також теплову потужність повітронагрівника, якщо витрата сухого матеріалу складає 480 кг/год , а параметри повітря на виході з сушарки дорівнюють: $\phi=60\%$, $t_R=32^{\circ}\text{C}$.

Задача 4.2.13 До вологого повітря з параметрами $t=25^{\circ}\text{C}$, $\rho=1,15947\text{ кг/м}^3$ підводиться $0,01111\text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти, після чого підігріте повітря зволожується парою, параметри якої: $P=110\text{ кПа}$, $x=0,98$. Визначити тепловологісне відношення в процесі нагрівання повітря, його параметри за повітронагрівником, параметри повітря після зволоження, витрату пари, якщо витрата повітря складає $1080\text{ м}^3/\text{год}$, а температура повітря після зволоження збільшується на 3°C .

Задача 4.2.14. Вологе повітря з параметрами: $t=35^{\circ}\text{C}$, $v=0,8955\text{ м}^3/\text{кг}$ спочатку охолоджується на 15°C , а потім змішується з повітрям, параметри якого такі: $t=70^{\circ}\text{C}$, $t_R=35^{\circ}\text{C}$. Визначити тепловологісне відношення в процесах, витрату сконденсованої вологи, параметри суміші, якщо витрата другого потоку пари складає $540\text{ м}^3/\text{год}$, а першого вдвічі менша.

Задача 4.2.15. Вологе повітря з параметрами $t=45^{\circ}\text{C}$, $R=0,29438\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, змішується з повітрям, параметри якого такі: $\phi=5\%$, $t=80^{\circ}\text{C}$, а витрата втричі більша, ніж першого. Суміш зволожується

водою, температура якої 60°C , внаслідок чого її відносна вологість збільшується втричі. Визначити параметри суміші, параметри повітря після зволоження і витрати потоків повітря, якщо витрата води складає 120 кг/год .

Задача 4.2.16. Вологе повітря з параметрами $\phi_0=20\%$, $t=20^{\circ}\text{C}$ підігрівається до певної температури, а потім зволожується парою з параметрами $P=0,11\text{ МПа}$, $x=0,97$, внаслідок чого параметри зволоженого повітря складають $t=40^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9111\text{ м}^3/\text{кг}$. Визначити до якої температури належить нагрівати повітря, тепловологісне відношення в процесі зволоження повітря, витрату пари, якщо витрата повітря складає $7200\text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 4.2.17. Вологе повітря з температурою 25°C і газовою сталою $R=0,2897\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ підігрівається внаслідок чого його відносна вологість зменшується на 45% . Підігріте повітря зволожується водою, температура якої 65°C . Визначити теплоту, яка витрачена на підігрів повітря, параметри повітря після зволоження, його витрату, якщо витрата води 180 кг/год , а кінцева відносна вологість 60% .

Задача 4.2.18. Вологе повітря з параметрами $t=50^{\circ}\text{C}$, $v = 0,9315\text{ м}^3/\text{кг}$ змішується з повітрям, параметри якого дорівнюють : $t=90^{\circ}\text{C}$, $t_R=33^{\circ}\text{C}$, а витрата якого втричі більша, ніж першого. Суміш надходить в теоретичну сушарку, де висушує вологий матеріал, витрата якого складає 960 кг/год . Визначити параметри суміші, витрату висушеного матеріалу, якщо витрата другого потоку повітря складає $7800\text{ м}^3/\text{год}$, а відносна вологість на виході з сушарки – 70% .

Задача 4.2.19. Вологе повітря з витратою $10800\text{ м}^3/\text{год}$, газовою сталою $0,2887\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ і температурою 35°C зволожується парою з тиском 1 бар до стану насичення за умови сталої температури. Визначити стан пари, яку було використано для зволоження, її витрату, параметри зволоженого повітря і тепловологісне відношення.

Задача 4.2.20. Вологе повітря з витратою $10800\text{ м}^3/\text{год}$ і параметрами: $t=65^{\circ}\text{C}$, $v = 0,97938\text{ м}^3/\text{кг}$ зволожується водою, температура якої 75°C , внаслідок чого його відносна вологість зростає на 60% . Визначити витрату води, параметри повітря після зволоження, тепловологісне відношення.

Задача 4.2.21. Від вологого повітря з параметрами: $t=55^{\circ}\text{C}$, $v = 0,947\text{ м}^3/\text{кг}$ відводиться $0,02\text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти, після чого воно змішується з повітрям, параметри якого дорівнюють: $t_R = 40^{\circ}\text{C}$; $h = 200\text{ кДж/кг}$, а витрата вдвічі більша, ніж першого. Визначити параметри суміші, тепловологісні відношення, витрати потоків повітря, якщо витрата суміші дорівнює $10800\text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 4.2.22. До вологого повітря з параметрами: $t=25^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,165\text{ кг/м}^3$ підводиться $0,01666\text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти. Підігріте повітря надходить в теоретичну сушарку, де висушує вологий матеріал, а його відносна вологість зростає до 80% . Визначити параметри повітря на виході з сушарки, тепловологісне відношення, витрату повітря, якщо витрата

вологого і сухого матеріалу складають 1080 і 540 кг/год., відповідно.

Задача 4.2.23. Вологе повітря з газовою сталою 0,2877 кДж/(кг·К) спочатку нагрівається до певної температури, а потім зволожується водою, температура якої 55°C. Визначити до якої температури треба нагріти повітря для того, щоб кінцеві його параметри після зволоження складали $t = 45^\circ\text{C}$; $t_R = 30^\circ\text{C}$.

Задача 4.2.24. Вологе повітря з температурою 40°C і густиною 1,1065 кг/м³ зволожується парою, тиск якої 0,11 МПа, до стану насичення за умов сталої температури. Визначити параметри пари, її витрату, тепловологісне відношення, якщо витрата повітря – 1840 м³/год.

Задача 4.2.25. Вологе повітря з параметрами $t_c = 55^\circ\text{C}$, $t_m = 30^\circ\text{C}$ зволожується парою з параметрами: $P_0 = 1$ бар, $x = 0,98$. Визначити витрату пари, параметри повітря і його густину після зволоження, якщо витрата повітря складає 180 кг/год., а відносна вологість повітря зростає втричі.

5 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИТІКАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

5.1 Приклади розв'язання задач

Задача 5.1.1. Повітря з параметрами: $P_1 = 10$ бар, $t_1 = 100^\circ\text{C}$ витікає із звуженого сопла, вихідна площа поперечного перерізу якого складає 50 мм². Визначити теоретичну швидкість витікання і витрату газу, якщо тиск за соплом дорівнює 0,6 МПа. Визначити також, як зміняться ці величини, якщо кінцевий тиск газу буде складати 5 бар.

Розв'язування

Перший варіант витікання.

Відношення тисків $\beta = P_2/P_1 = 6/10 = 0,6 > \beta_{кр} = 0,528$.

Отже, швидкість витікання менша, ніж критична і визначається за формулою, м/с

$$C = \sqrt{2k/(k-1) \cdot R \cdot T_1 (1 - \beta^{(k-1)/k})} = \\ = \sqrt{2 \cdot (2 \cdot 1,4)/(1,4-1) \cdot 287 \cdot 373 \cdot (1 - 0,6^{(1,4-1)/1,4})} = 319.$$

Питомий об'єм повітря на вході в сопло, м³/кг

$$v_1 = R T_1/P_1 = 0,287 \cdot 373/1000 = 0,107.$$

Питомий об'єм повітря на виході з сопла, м³/кг

$$v_2 = v_1/\beta^{1/k} = 0,107/0,6^{1/1,4} = 0,1541.$$

Масова витрата газу, кг/с

$$G = F \cdot C/v_2 = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 319/0,154 = 0,1035.$$

Другий варіант витікання.

Відношення тисків $\beta = P_2/P_1 = 5/10 = 0,5 < \beta_{кр} = 0,528$.

Для звуженого сопла за умови $\beta < \beta_{кр}$ швидкість дорівнює критичній

швидкості і визначається за формулою

$$C_{кр} = \sqrt{2k/(k+1) \cdot R \cdot T_1} = \sqrt{(2 \cdot 1,4)/(1,4+1) \cdot 287 \cdot 373} = 353,36.$$

Питомий об'єм газу за соплом, м³/кг

$$v_{кр} = v_1/\beta_{кр}^{1/k} = 0,107/0,528^{1/1,4} = 0,169885.$$

Витрата повітря, кг/с

$$G = f \cdot C_{кр} / v_{кр} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 353,36 / 0,16885 = 0,1046.$$

Задача 5.1.2. Пара з початковими параметрами: $P_1 = 2$ МПа, $t_1 = 250^\circ\text{C}$ надходить у вісім соплових апаратів турбіни з площею поперечного перерізу по 420 мм² кожний. Визначити тип сопла, його розміри, витрату пари на турбіну та її теоретичну потужність, якщо кінцевий тиск за турбіною 2 бара. Визначити також як зміниться витрата і потужність турбіни з урахуванням швидкісного коефіцієнта, який дорівнює 0,96. Сопло круглої форми.

Розв'язування

Задачу розв'язуємо за допомогою h-s діаграми.

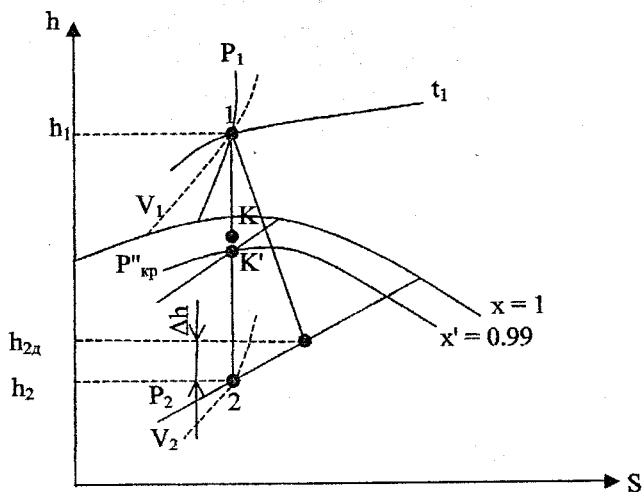


Рисунок 5.1.

Визначаємо на діаграмі початкову і кінцеву точки пари в процесі розширення (рис.5.1). Інші параметри в точках 1 і 2: $h_1 = 2900$ кДж/кг; $v_1 = 0,118$ м³/кг; $S_1 = S_2 = 6,53$ кДж/(кг·К); $h_2 = 2480$ кДж/кг; $v_2 = 0,8$ м³/кг.

Таким чином, розширення здійснюється в області як перегрітої, так і насиченої пари. Загальна міра розширення пари

$$\beta = P_2/P_1 = 2/20 = 0,1 < \beta_{кр}.$$

В цьому випадку $C_2 > C_{кр}$ і застосовують комбіноване сопло (сопло Лаваля).

Значення критичного тиску, бар

$$P_{кр} = \beta_{кр} \cdot P_1 = 0,577 \cdot 20 = 11,55.$$

Визначаємо на h - s діаграмі критичну точку (точка K на лінії 1-2), яка знаходиться вище точки K' . Параметри пари в критичній точці:
 $h_k = 2780$ кДж/кг; $v_k = 0,18$ м³/кг.

Швидкість пари в критичному перерізі сопла, м/с

$$C_{кр} = 44,76 \cdot \sqrt{h_1 - h_{кр}} = 44,76 \cdot \sqrt{2900 - 2700} = 490,3.$$

Швидкість пари на виході з сопла, м/с

$$C_2 = 44,76 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} = 44,76 \cdot \sqrt{2900 - 2480} = 917,3.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$G = z \cdot f \cdot C_2 / v_2 = 8 \cdot 420 \cdot 10^{-6} \cdot 917,3 / 0,8 = 3,85.$$

Теоретична потужність турбіни, МВт

$$N_T = G \cdot (h_0 - h_2) \cdot 10^{-3} = 3,85 \cdot (2900 - 2480) \cdot 10^{-3} = 1,618.$$

Площа мінімального перерізу сопла, м²

$$F_k = G \cdot v_{кр} / (z \cdot C_k) = 3,85 \cdot 0,18 / (8 \cdot 490,3) = 1,766 \cdot 10^{-4}$$

або $f_k = 176,6$ мм².

Діаметри мінімального і вихідного перерізів сопла, м²

$$d_{\min} = \sqrt{4f_k / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1,766 \cdot 10^{-4} / 3,14} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ або } 150 \text{ мм}^2.$$

$$d_2 = \sqrt{4f_2 / \pi} = \sqrt{4 \cdot 420 \cdot 10^{-6} / 3,14} = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ або } 230 \text{ мм}^2.$$

Довжина дифузора сопла Лавалля, мм

$$\ell_d = (d_2 - d_k) / [2 \operatorname{tg}(\gamma / 2)] = (230 - 150) / [2 \operatorname{tg}(6^\circ)] = 423.$$

Дійсна швидкість пари на виході з сопла, м/с

$$C_{2\sigma} = C_2 \cdot \varphi = 917,3 \cdot 0,96 = 880,6.$$

Коефіцієнт втрат енергії

$$\xi = 1 - \varphi^2 = 1 - 0,96^2 = 0,0784.$$

Втрати енергії в сопловому апараті, кДж/кг

$$\Delta H = \xi(h_1 - h_2) = 0,0784 (2900 - 2480) \approx 33.$$

Дійсний теплоперепад в сопловому апараті, кДж/кг

$$H_\sigma = (h_1 - h_2) - \Delta H = (2900 - 2480) - 33 = 387.$$

Дійсна ентальпія пари на виході з сопла, кДж/кг

$$h_{2\sigma} = h_2 + \Delta H = 2480 + 33 = 2513.$$

Отже, процес розширення пари йде по лінії 1-2д (рис.5.1).

Потужність турбіни, МВт

$$N_T = G \cdot H_\sigma \cdot 10^{-3} = 3,85 \cdot 387 \cdot 10^{-3} = 1,49.$$

Задача 5.1.3. Визначити параметри і діаметри в характерних перерізах сопла, якщо витрата двоатомного газу з газовою сталою $R = 0,29$ кДж/(кг·К) складає 0,4 кг/с, початкова температура 757°C, кінцевий тиск 1 бар, а мінімальна площа перерізу сопла 220 мм².

Розв'язування

Для двоатомного газу критична міра розширення складає $\beta_{кр} = 0,528$.

Критична швидкість витікання, м/с

$$C_{кр} = [2k \cdot R \cdot T_1 / (k - 1)]^{0,5} = [2 \cdot 1,4 \cdot 290 \cdot 1030 / (1,4 - 1)]^{0,5} = 543,7.$$

Значення температури в критичному перерізі сопла, К

$$T_{кр} = T_1 \cdot \beta_{кр}^{(k-1)/k} = 1030 \cdot 0,528^{(1,4-1)/1,4} = 858,2.$$

Питомий об'єм газу в критичному перерізі сопла, м³/кг

$$v_{кр} = C_{кр} \cdot f_{кр} / G = 858,2 \cdot 220 \cdot 10^{-6} / 0,4 = 0,472.$$

Значення тиску в критичному перерізі сопла, кПа

$$P_{кр} = R \cdot T_{кр} / v_{кр} = 0,292 \cdot 858,2 / 0,472 = 530,9 \text{ або } 5,309 \text{ бар.}$$

Тиск газу перед соплом, бар

$$P_1 = P_{кр} / \beta_{кр} = 5,309 / 0,528 = 10,03.$$

Міра розширення газу в сопні

$$\beta = P_2 / P_1 = 1/10 = 0,1.$$

Температура газів на виході з сопла, К

$$T_2 = T_1 \cdot \beta_{кр}^{(k-1)/k} = 1030 \cdot 0,1^{(1,4-1)/1,4} = 533,5.$$

Питомий об'єм газу за соплом, м³/кг

$$v_2 = R \cdot T_2 / P_2 = 0,29 \cdot 533,5 / 100 = 1,547.$$

Швидкість газу на виході з сопла, м/с

$$C_2 = [2k R T_1 (1 - \beta^{(k-1)/k}) / (k - 1)]^{0,5} = \\ = [2 \cdot 1,4 \cdot 290 \cdot 1030 (1 - 0,1^{(1,4-1)/1,4}) / (1,4 - 1)]^{0,5} = 1004.$$

Площа вихідного перерізу сопла, м²

$$f_2 = G \cdot v_2 / C_2 = 0,4 \cdot 1,547 / 1004 = 6,163 \cdot 10^{-4}.$$

Діаметр сопла у вихідному перерізі, м²

$$d_2 = (4f_2 / \pi)^{0,5} = (4 \cdot 6,163 \cdot 10^{-4} / 3,14)^{0,5} = 4,965 \cdot 10^{-2} \text{ або } d_2 = 496,5 \text{ мм}^2.$$

Діаметр сопла в критичному перерізі, м²

$$d_{кр} = d_{\min} = (4f_{кр} / \pi)^{0,5} = (4 \cdot 220 \cdot 10^{-6} / 3,14)^{0,5} = 1,67 \cdot 10^{-2} \text{ або } 167 \text{ мм}^2.$$

5.2 Задачі для самостійної підготовки

Задача 5.2.1. Який двоатомний газ з початковими параметрами:

$P_1 = 60$ бар, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, витікаючи в середовище з тиском $3,5$ МПа із звуженого сопла з площею перерізу 15 мм² має витрату $0,22$ кг/с? Чому дорівнюють параметри газу за соплом і швидкість витікання?

Задача 5.2.2. Повітря з витратою $0,5$ кг/с витікає із звуженого сопла діаметром $21,12$ мм. Визначити параметри повітря перед соплом і поза ним, якщо швидкість витікання дорівнює 500 м/с.

Задача 5.2.3. Початкове значення ентропії пари дорівнює 7 кДж/(кг·К), а кінцеві параметри пари за соплом складають: $t_2 = 30^\circ\text{C}$; $x_2 = 0,84$. Визначити тип сопла, витрату пари, втрати енергії в процесі витікання, потужність парової турбіни, якщо швидкість витікання пари із сопла діаметром 25 мм складає 580 м/с.

Задача 5.2.4. Азот і гелій витікають із звужених сопел діаметром 25 мм з однаковою швидкістю. Визначити витрату газів, температуру газів перед соплом, якщо початковий тиск газів $0,5$ МПа, а температура азоту на

560°C більша, ніж температура гелію.

Задача 5.2.5. Дифузор комбінованого сопла має довжину 60 мм і кут конусності $\gamma = 12^\circ$. Із сопла витікає суха насичена пара, початковий тиск якої 2 МПа, а витрата 0,3 кг/с. Визначити кінцеву швидкість витікання, діаметри звуженого і вихідного перерізів сопла, якщо кінцева густина пари складає 2 кг/м³.

Задача 5.2.6. В сопло газової турбіни надходить суміш газів з властивостями: $R = 0,28$ кДж/(кг·К), $k = 1,36$ і температурою 727°C. Визначити параметри суміші в усіх характерних перерізах сопла, діаметри і критичну швидкість, якщо у вихідному перерізі сопла діаметром 28 мм швидкість витікання і витрата дорівнюють 960 м/с і 0,5 кг/с, відповідно.

Задача 5.2.7. В процесі витікання перегрітої пари із звуженого сопла діаметром 21,34 мм вона стає сухою насиченою. Визначити початкові та кінцеві параметри пари, міру розширення, якщо швидкість і витрата пари дорівнюють 447,6 м/с і 0,2 кг/с, відповідно.

Задача 5.2.8. Визначити діаметри в критичному і кінцевому перерізах сопла турбіни потужністю 360 кВт, якщо питома витрата пари на турбіну складає 10 кг/(кВт·год), швидкісний коефіцієнт 0,95, а кінцеві параметри пари: $P_2 = 0,1$ МПа, $x_2 = 0,99$; $d_2 = 20$ мм.

Задача 5.2.9. Температура повітря на вході в сопло дорівнює 700°C. При цьому співвідношення тисків складає $P_1/P_2 = 10$, а співвідношення площ $f_{cr}/f_2 = 0,7$. Визначити параметри газу в характерних перерізах сопла, його витрату і теоретичну потужність турбіни.

Задача 5.2.10. Азот і двоокис вуглецю витікають із звужених сопел з однаковою швидкістю. Визначити температури газів на вході в сопло і на виході з нього, а також діаметри сопел, якщо витрата газів дорівнює 0,5 кг/с, а витікання здійснюється в атмосферу з барометричним тиском 740 мм.рт.ст., температура азоту на 300 К нижче за температуру CO₂.

Задача 5.2.11. Визначити, який газ витікає із звуженого сопла з витратою 0,687 кг/с, якщо кінцевий тиск 0,55 МПа, діаметр сопла 25 мм, а початкові параметри двоатомного газу дорівнюють:
 $P_1 = 1$ МПа, $\rho_1 = 6,968$ кг/м³.

Задача 5.2.12. Визначити характерні діаметри сопла, довжину дифузора для кута конусності $\gamma = 12^\circ$, якщо швидкість двоокису вуглецю на виході із сопла 878 м/с, витрата 0,5 кг/с, початкові параметри газу:
 $P_1 = 1$ МПа, $T_1 = 1200$ К, а кінцева густина 0,833 кг/м³.

Задача 5.2.13. Водяна пара з параметрами $t = 360^\circ\text{C}$, $\rho = 5$ кг/м³ розширюється в соплах до чотирикратного зменшення густини. Визначити розміри сопла, якщо витрата пари складає 3,5 кг/с, а швидкісний коефіцієнт – 0,95.

Задача 5.2.14. Швидкість витікання пари із сопла діаметром 20 мм складає 460 м/с, а витрата – 0,25 кг/с. Визначити початкові та кінцеві параметри пари, інші розміри сопла, якщо кінцева міра сухості пари – 0,95.

Задача 5.2.15. В парову турбіну надходить пара з параметрами $t = 390^\circ\text{C}$, $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$. В клапанах турбіни пара дроселюється, внаслідок чого її питомий об'єм зростає в 1,2 рази. Після цього пара надходить в сопла, де розширюється до температури 150°C . Визначити характерні розміри сопла, якщо витрата пари складає 7200 кг/год .

Задача 5.2.16. Суха насичена пара з густиною 2 кг/м^3 розширюється в соплах до кінцевої міри сухості $0,85$. Визначити діаметри критичного і кінцевого перерізів сопла, якщо довжина дифузора складає 80 мм , а кут конусності -10° .

Задача 5.2.17. В процесі витікання двоокису вуглецю із сопла його густина зменшується в десять разів. Визначити параметри газу в характерних перерізах, його витрату, якщо відомо, що початкова температура 650°C , а кінцевий діаметр сопла в 1,33 рази більший, ніж мінімальний.

Задача 5.2.18. Параметри пари на виході з сопла діаметром 30 мм дорівнюють: $P_2 = 0,06 \text{ бар}$, $x_2 = 0,83$. При цьому витрата пари складає $3600 \text{ м}^3/\text{год}$. Визначити початкові параметри пари, мінімальний діаметр сопла і довжину дифузора, якщо $\gamma = 11^\circ$.

Задача 5.2.19. Суміш триатомних газів з тиском 1 МПа витікає із сопла з кінцевим діаметром 25 мм . При цьому витрата і швидкість дорівнюють $0,4 \text{ кг/с}$ і 920 м/с , відповідно. Визначити кінцеві та початкові параметри газів, їх газову сталу, розміри сопла, якщо кінцева температура газів складає 560 К .

Задача 5.2.20. Параметри пари перед соплом з кінцевим діаметром 27 мм становлять: $P_1 = 2 \text{ МПа}$, $t_1 = 350^\circ\text{C}$. При цьому швидкість витікання і витрата дорівнюють 780 м/с і $0,95 \text{ кг/с}$, відповідно. Визначити розміри сопла, число Маха, якщо кут конусності $\gamma = 12^\circ$.

Задача 5.2.21. Окис вуглецю і двоокис вуглецю з однаковою початковою температурою витікають із звужених сопел з однаковим діаметром 20 мм . При цьому швидкість витікання першого газу на 100 м/с більша, ніж другого. Визначити початкову температуру, витрати газів.

Задача 5.2.22. Суха насичена пара з густиною $\rho = 5 \text{ кг/м}^3$ розширюється в соплах до трикратного зменшення температури. Визначити розміри сопла, якщо витрата пари дорівнює $5550 \text{ м}^3/\text{год}$, кут конусності $\gamma = 12^\circ$, а швидкісний коефіцієнт $-0,95$.

Задача 5.2.23. Кінцеві параметри пари на виході із сопла складають: $t_2 = 50^\circ\text{C}$; $\rho_2 = 0,1 \text{ кг/м}^3$. Визначити початкові параметри пари, число Маха, довжину дифузора з кутом конусності $\gamma = 12^\circ$, якщо швидкість пари на виході дорівнює 600 м/с , діаметр сопла 26 мм .

Задача 5.2.24. Двоокис вуглецю з початковим тиском $1,2 \text{ МПа}$ витікає із сопла з площею поперечного перерізу 200 см^2 . Швидкість і температура газу на виході з сопла дорівнюють 1200 м/с і 1200 К , відповідно. Визначити розміри сопла, число Маха, якщо витрата газу $2,5 \text{ кг/с}$.

Задача 5.2.25. Азот з параметрами $t_1 = 127^\circ\text{C}$, $\rho = 0,4 \text{ кг/м}^3$ витікає із

звуженого сопла в атмосферу, тиск якої 736 мм.рт.ст. Визначити витрату газу, його кінцеві параметри, втрати енергії, якщо діаметр сопла 22 мм, швидкісний коефіцієнт 0,96. Визначити також ці показники за умови, що початкова швидкість газу перед соплом буде дорівнювати 50 м/с.

6 СТИСК ГАЗІВ В КОМПРЕСОРАХ

6.1 Приклади розв'язання задач

Задача 6.1.1. В одноциліндровому одноступінчастому компресорі з діаметром 200 мм і ходом поршня 150 мм стискається повітря з початковими параметрами: $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 17^\circ\text{C}$ до п'ятикратного збільшення густини. Визначити параметри повітря після стиску, дійсну масову подачу компресора, якщо кутова швидкість вала $\omega = 100,48$ рад/с, відносний об'єм шкідливого простору $\sigma = 0,045$, показник політропи $n = 1,1$, коефіцієнт, що враховує зменшення тиску в процесі всмоктування $\eta_p = 0,96$.

Розв'язування

Початкова густина повітря, кг/м^3

$$\rho_1 = P_1 / (R \cdot T_1) = 100 / (0,287 \cdot 290) = 1,2.$$

Тиск повітря за компресором, МПа

$$P_2 = P_1 (\rho_1 / \rho_2)^n = 0,1 \cdot 5^{1,1} = 0,5873.$$

Міра підвищення тиску в компресорі

$$\lambda = P_2 / P_1 = 0,5873 / 0,1 = 5,873.$$

Температура повітря після стиску, К

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda^{(n-1)/n} = 290 \cdot 5,873^{(1,1-1)/1,1} = 340,6.$$

Об'ємний ККД компресора

$$\eta_o = 1 - \sigma (\lambda^{1/n} - 1) = 1 - 0,045 (5,873^{1/1,1} - 1) = 0,82.$$

Коефіцієнт подачі компресора

$$\eta_v = \eta_o \cdot \eta_p = 0,82 \cdot 0,96 = 0,787.$$

Частота обертання вала, 1/с

$$n_b = \omega / 2\pi = 100,48 / (2 \cdot 3,14) = 16.$$

Теоретична об'ємна подача компресора, $\text{м}^3/\text{с}$

$$V_T = (\pi D^2 / 4) S \cdot n_b = 0,785 \cdot D^2 \cdot S \cdot n_b = 0,785 \cdot 0,2^2 \cdot 0,15 \cdot 16 = 0,07536.$$

Дійсна масова подача компресора, кг/с

$$G = V_T \cdot \rho_1 \cdot \eta_v = 0,07536 \cdot 1,2 \cdot 0,787 = 0,07118.$$

Задача 6.1.2. Одноступінчастий поршневий компресор, діаметр і хід поршня якого 250 і 200 мм, відповідно, всмоктує повітря з тиском 740 мм.рт.ст. і температурою 25°C . Стиск здійснюється до температури 170°C . Визначити необхідну потужність привода компресора, теплоту, яка відводиться з охолодною водою, якщо швидкість поршня $W = 4$ м/с, відносний об'єм шкідливого простору $\sigma = 0,04$, відносний внутрішній ККД компресора $\eta_{oi} = 0,8$, механічний ККД $\eta_m = 0,86$, показник політропи $n = 1,25$, підігрів охолодної води $\Delta t = 12^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Тиск повітря, що всмоктується компресором, бар

$$P_1 = B/750 = 740/750 = 0,98666.$$

Міра підвищення тиску в компресорі

$$\lambda = P_2/P_1 = (T_2/T_1)^{1/(n-1)} = (443/298)^{1,25/(1,25-1)} = 7,26.$$

Тиск повітря після стиску в компресорі, бар

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda = 0,98666 \cdot 7,26 = 7,163.$$

Об'ємний ККД компресора

$$\eta_o = 1 - \sigma (\lambda^{1/n} - 1) = 1 - 0,04 (7,26^{1/1,25} - 1) = 0,844.$$

Початкова густина повітря, кг/м³

$$\rho_1 = P_1/(R \cdot T_1) = 98,666/(0,287 \cdot 298) = 1,153.$$

Частота обертання вала, об/с

$$n_b = W/(2S) = 4/(2 \cdot 0,2) = 10.$$

Об'ємна подача компресора, м³/с

$$V = (\pi \cdot D^2/4) S \cdot n_b \cdot \eta_o = 0,785 \cdot 0,25^2 \cdot 0,2 \cdot 10 = 0,0828.$$

Масова подача компресора, кг/с

$$G = V \cdot \rho_1 = 0,0828 \cdot 1,153 = 0,09548.$$

Питома робота політропного стиску, кДж/кг

$$\ell_n = n \cdot R \cdot T_1 / (n - 1) (1 - \lambda^{(n-1)/n}) = 1,25 \cdot 0,287 \cdot 298 / (1,25 - 1) (1 - 7,26^{(1,25-1)/1,25}) = -208.$$

Від'ємний знак характеризує підведену роботу (роботу стиску).

Необхідна потужність привода компресора, кВт

$$N = G \cdot \ell_n / (\eta_{oi} \cdot \eta_m) = 0,09548 \cdot 208 / (0,8 \cdot 0,86) = 28,87.$$

Теплота, яка відводиться в процесі стиску, кВт

$$Q = G \cdot C_{pn} (t_2 - t_1) = 0,9548 \cdot 1,005 (170 - 25) = 13,914.$$

Витрата охолодної води, кг/с

$$G_{ov} = Q / (C_{pv} \cdot \Delta t) = 13,914 / (4,19 \cdot 12) = 0,2767.$$

Задача 6.1.3. Визначити діаметр і хід поршня адіабатного компресора, який стискає кисень з початковими параметрами: $P_1 = 1$ бар, $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до чотирикратного зменшення об'єму, якщо $D = 1,1$ С, швидкість поршня 4 м/с, адіабатний внутрішній ККД $\eta_{oi} = 0,82$, об'ємний і механічний ККД по 0,85, потужність компресора 31 кВт.

Розв'язування

Газова стала кисню, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314/\mu = 8,314/32 \approx 0,26.$$

Початкова густина кисню, кг/м³

$$\rho_1 = P_1/(R \cdot T_1) = 100/(0,26 \cdot 283) = 1,36.$$

Міра підвищення тиску в компресорі

$$\lambda = P_2/P_1 = (V_1/V_2)^k = 4^{1,4} = 7.$$

Питома робота стиску, кДж/кг

$$\ell_a = k \cdot R \cdot T_1 / (k - 1) (1 - \lambda^{(k-1)/k}) = 1,4 \cdot 0,26 \cdot 283 / (1,4 - 1) (1 - 7^{(1,4-1)/1,4}) = -191,5.$$

Масова витрата компресора, кг/с

$$G = N \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_o / \ell_k = 31 \cdot 0,82 \cdot 0,85 / 191,5 = 0,09589.$$

$$\text{Теоретична об'ємна витрата компресора, м}^3/\text{с} \\ V_T = G/(\rho \cdot \eta_o) = 0,09589/(1,36 \cdot 0,85) = 0,0829 \quad (6.1)$$

$$\text{Теоретична подача компресора} \\ V_{Tn} = (\pi D^2/4) S \cdot n_n = 0,785 \cdot (1,1 \cdot S)^2 \cdot S \cdot 4/(2S) = 1,9S^2 \quad (6.2)$$

$$\text{де } n_n = W/(2S) = 4/(2S).$$

Із (6.1) і (6.2) визначаємо хід поршня, м

$$S = \sqrt{V_T/1,9} = \sqrt{0,0829/1,9} = 0,209.$$

Діаметр поршня, м

$$D = 1,1 \cdot S = 1,1 \cdot 0,209 = 0,230.$$

Задача 6.1.4. Повітря з параметрами $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 17^\circ\text{C}$ і витратою $150 \text{ м}^3/\text{хв.}$ стискається в політропному ($n = 1,2$) компресорі, потужність якого $1,383$ МВт. Визначити кількість ступенів стиску в компресорі, тиск на виході з останнього ступеня, якщо потужність, яка відводиться з кожного ступеня в процесі охолодження повітря до початкової температури, складає 268 кВт. Визначити також необхідну потужність, відведену теплоту в разі застосування компресора, кількість ступенів стиску якого на один менше, ніж першого. Теплоємності вважати сталими.

Розв'язування

$$\text{Початкова густина повітря, кг/м}^3 \\ \rho_1 = P_1/(R \cdot T_1) = 100/(0,287 \cdot 290) = 1,2.$$

$$\text{Масова витрата повітря, кг/с} \\ G = V \cdot \rho_1/60 = 150 \cdot 1,2/60 = 3.$$

$$\text{Ізохорна та ізобарна теплоємності повітря, кДж/(кг·К)}$$

$$C_v = R/(k - 1) = 0,287/(1,4 - 1) = 0,7175$$

$$C_p = k \cdot C_v = 1,4 \cdot 0,7175 \approx 1.$$

$$\text{Теплоємність політропного процесу, кДж/(кг·К)}$$

$$C_n = C_v \cdot (n - k)/(n - 1) = 0,7175 (1,2 - 1,4)/(1,2 - 1) = -0,7175.$$

$$\text{Різниця температур в процесі проміжного охолодження повітря, К}$$

$$\Delta T = Q/(G \cdot C_p) = 268/(3 \cdot 1) = 89,33.$$

$$\text{Температура повітря на виході з кожного ступеня стиску, К}$$

$$T_i = T_1 + \Delta T = 290 + 89,33 = 379,33.$$

$$\text{Міра підвищення тиску в ступені}$$

$$\lambda_i = (T_i/T_1)^{n/(n-1)} = (379,33/290)^{1,2/(1,2-1)} = 5.$$

$$\text{Потужність, яка витрачається на стиск повітря в кожному ступені, кВт}$$

$$L = G \cdot n \cdot R \cdot T_1/(n-1) (1 - \lambda_i^{(n-1)/n}) = \\ = 3 \cdot 1,2 \cdot 0,287 \cdot 290/(n-1) (1 - 5^{(1,2-1)/1,2}) = 460,92.$$

$$\text{Кількість ступенів стиску в компресорі}$$

$$z = N/L = 1383/460,92 = 3.$$

$$\text{Кінцевий тиск повітря, МПа}$$

$$P_k = P_1 \cdot \lambda_i^z = 0,1 \cdot 5^3 = 12,5.$$

В разі застосування двоступінчастого стиску ($z = 2$) міра стиску в кожному ступені

$$\lambda_1 = (P_2/P_1)^{1/2} = (12,5/0,1)^{1/2} = 11,18.$$

Температура повітря за ступенем, К

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_1^{(n-1)/n} = 290 \cdot (11,18)^{(1,2-1)/1,2} = 433,65.$$

Теплова потужність, яка відводиться після першого ступеня стиску, кВт

$$Q = G \cdot C_p (T_2 - T_1) = 3 \cdot 1 (433,65 - 290) = 430,95.$$

Потужність, яка витрачається на стиск повітря в кожному ступені, кВт

$$L = G \cdot n \cdot R \cdot T_1 / (n-1) (1 - \lambda_1^{(n-1)/n}) = \\ = 3 \cdot 1,2 \cdot 0,287 \cdot 290 / (1,2 - 1) (1 - 11,18^{(1,2-1)/1,2}) = 742,09.$$

Потужність двоступінчастого компресора, МВт

$$N_2 = z \cdot L \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 742,09 \cdot 10^{-3} = 1,484.$$

Отже, в разі двоступінчастого стиску потужність компресора збільшується на, МВт

$$\Delta N = N_2 - N = 1,484 - 1,383 = 0,101 \text{ або на } 10,7\%.$$

6.2 Задачі для самостійної роботи

Задача 6.2.1. Повітря з параметрами: $V=736$ мм.рт.ст., $t_1 = -10^\circ\text{C}$ стискається в одноступінчастому компресорі діаметром 210 мм і ходом поршня 200 мм. Визначити теоретичну потужність адіабатного і політропного ($n = 1,2$) компресорів, якщо швидкість поршня дорівнює 4,5 м/с, а кінцева температура повітря в обох випадках не повинна перевищувати 180°C .

Задача 6.2.2. Потужність компресора діаметром 285 мм і ходом поршня 370 мм дорівнює 25 кВт. Компресор стискає повітря з параметрами $P_1 = 1$ бар, $t_1 = 25^\circ\text{C}$ до чотирикратного зменшення об'єму. Визначити подачу компресора, якщо відносний об'єм шкідливого простору $\sigma = 0,035$, показник політропи $n = 1,22$, кутова швидкість вала – 62,2 рад/с.

Задача 6.2.3. Подача повітряного компресора 720 м³/год для $V=740$ мм.рт.ст., $v_1 = 0,9$ м³/кг. Процес стискання політропний з $n = 1,2$. Визначити необхідну теоретичну потужність привода компресора, діаметр і хід поршня, якщо $S/D = 1,2$, швидкість поршня 4,8 м/с, в процесі стиску густина зростає в чотири рази.

Задача 6.2.4. Двоциліндровий поршневий компресор діаметром $D = 200$ мм і ходом поршня $S = 220$ мм стискає повітря з параметрами $P_1 = 0,1$ МПа, $\rho_1 = 1,2$ кг/м³ до шестикратного збільшення температури. Визначити потужність привода компресора, якщо $n_a=540$ об/хв., $\eta_m=0,87$; $\eta_o=0,85$; $\eta_{oi}=0,81$.

Задача 6.2.5. Поршневий компресор стискає двоокис вуглецю з параметрами: $\rho_1 = 1,3$ кг/м³, $t_1 = 10^\circ\text{C}$, до семикратного збільшення тиску. Потужність привода компресора дорівнює 50 кВт. Визначити масову подачу компресора, якщо $\eta_o = 0,82$; $\eta_m = 0,85$; $\eta_{oi}=0,8$; $\omega = 100,48$ рад/с; $n = 1,2$. Визначити також діаметр і хід поршня, якщо $S = 1,15$ D.

Задача 6.2.6. Визначити потужності адіабатного та ізотермічного компресорів, в яких окис вуглецю стискається до п'ятикратного збільшен-

ня густини, якщо $D = 100$ мм, $S = 120$ мм, $\eta_o = 0,83$, $\eta_m = 0,87$; $P_1 = 98$ кПа; $W_n = 4,2$ м/с, $t_1 = 17^\circ\text{C}$.

Задача 6.2.7. Визначити необхідну кількість обертів політропного ($n=1,2$) компресора, який стискає азот до шестикратного зменшення об'єму, якщо споживана потужність 30 кВт, $D = S = 110$ мм, подача – 360 м³/год, $\eta_o = 0,84$; $\eta_m = 0,87$.

Задача 6.2.8. Визначити потужності політропного ($n=1,15$) та ізотермічного компресора, які стискають повітря, якщо зміна ентропії в процесі стиску складає $0,85$ кДж/(кг·К), $D = 150$ мм, $S = 160$ мм; кутова швидкість – 90 рад/с, $P_1 = 740$ мм.рт.ст., $\rho_1 = 1,15$ кг/м³; $\eta_o = 0,85$; $\eta_m = 0,87$.

Задача 6.2.9. Визначити діаметр і хід поршня адіабатного компресора, який стискає гелій до п'ятикратного збільшення густини, якщо споживана потужність 25 кВт; $D = 0,9S$; швидкість поршня $W_n = 4,2$ м/с; $P_1 = 745$ мм.рт.ст.; $t_1 = 27^\circ\text{C}$; $\eta_o = 0,87$; $\eta_m = 0,85$.

Задача 6.2.10. Визначити діаметр і хід поршня політропного компресора ($n = 1,18$) за умови, що $D = S$, якщо теоретична потужність 32 кВт, $\omega = 96$ рад/с, $P_1 = 736$ мм.рт.ст., $t_1 = -27^\circ\text{C}$, а зміна ентропії $\Delta S = 0,82$ кДж/(кг·К).

Задача 6.2.11. Визначити потужність адіабатного компресора, який стискає повітря до дев'ятикратного збільшення температури, якщо початкові параметри: $P_1 = 755$ мм.рт.ст.; $\rho_1 = 1,11$ кг/м³, $D = 100$ мм; $S = 120$ мм; $W_n = 3,8$ м/с; $\eta_o = 0,87$; $\eta_m = 0,87$; $\eta_{oi} = 0,85$.

Задача 6.2.12. Компресор стискає повітря з параметрами $P_1 = 760$ мм.рт.ст., $t_1 = 27^\circ\text{C}$ до п'ятикратного збільшення густини. Визначити, як зміниться теоретична потужність політропного ($n=1,25$) компресора, якщо в ньому стискати двоокис вуглецю, а політропний стиск замінити адіабатним за умови сталої подачі. Діаметр і хід поршня $D=S=140$ мм, кутова швидкість вала – $56,2$ рад/с.

Задача 6.2.13. Азот з початковими параметрами: $P_1 = 0,1$ МПа і $v_1 = 0,89$ м³/кг стискається в ізотермічному компресорі, потужність якого 36 кВт. Визначити, як зміниться подача компресора, якщо в ньому стискати повітря до восьмикратного збільшення температури по політропі ($n=1,2$) за умови сталої потужності. При цьому $D=S=150$ мм, швидкість поршня $W_n = 4,4$ м/с.

Задача 6.2.14. Двоокис вуглецю стискається в ізотермічному компресорі до п'ятикратного зменшення об'єму. При цьому зміна ентропії складає $0,75$ кДж/(кг·К). Визначити кількість обертів вала, якщо $D = S = 144$ мм, а початкові параметри газу складають: $P_1 = 0,11$ МПа, $t_1 = 47^\circ\text{C}$. Визначити також, як зміниться подача компресора, якщо ізотермічний тиск замінити на адіабатний за умови сталої потужності та кількості обертів вала.

Задача 6.2.15. Політропний ($n=1,2$) компресор стискає повітря з початковими параметрами: $P_1 = 740$ мм.рт.ст., $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до п'ятикратного збі-

льшення густини. Відношення шкідливого об'єму до робочого об'єму циліндра складає 0,03. Визначити теоретичну потужність компресора і об'ємний ККД, якщо $D=S=160$ мм, $\omega = 90$ рад/с.

Задача 6.2.16. Компресор з характеристиками: $D=120$ мм, $S = 150$ мм стискає повітря з параметрами $P_1 = 96$ кПа, $v_1 = 0,9$ м³/кг до десятикратного збільшення температури по політропі ($n=1,3$). З метою економії електроенергії електропривод замінили на інший, потужність якого на 15% менша, ніж першого. Якою має бути витрата охолодної води, щоб за нових умов зберегти подачу повітря і його тиск, якщо швидкість поршня 4,6 м/с, а підігрів охолодної води – 10°C.

Задача 6.2.17. Азот з початковими параметрами: P_1 1,2 бар, $t_1 = 27^\circ\text{C}$ стискається в політропному ($n=1,25$) компресорі до двадцятидвократного збільшення густини. Визначити економію електроенергії в разі застосування двоступінчастого компресора з проміжним охолодженням повітря до початкової температури, якщо $D=S=130$ мм, $n=780$ об/хв., підігрів охолодної води 12°C, ККД насоса охолодної води – 0,8, а його напір – 1900 мм.рт.ст.

Задача 6.2.18. На потреби електростанції необхідно подавати 480 кг/год повітря з тиском 3,6 МПа. На станції є електродвигуни потужністю 10, 20 і 30 кВт. Підібрати кількість ступенів політропного ($n=1,22$) компресора за умови, що температура повітря на виході з кожного ступеня не повинна перевищувати 125°C. Визначити, який із зазначених електродвигунів забезпечує необхідну потужність компресора, а також витрату охолодної води, якщо температура повітря після стиску в останньому ступені повинна бути не вища 45°C, а підігрів охолодної води в повітроохолодниках дорівнює 15°C. Початкові параметри повітря: $P_1 = 1$ бар; $\rho_1=1,18$ кг/м³.

Задача 6.2.19. Визначити швидкість поршня адіабатного компресора, який стискає окис вуглецю з початковими параметрами: $P_1 = 758$ мм.рт.ст., $v_1 = 0,88$ м³/кг, якщо $D/S = 0,95$; кількість обертів вала – 540 об/хв.; теоретична потужність 30 кВт. Визначити також, як зміниться ця швидкість, якщо $n_p = 780$ об/хв..

Задача 6.2.20. Визначити кількість обертів вала політропного ($n=1,15$) компресора, який стискає водяну пару з початковими параметрами: $P_1=1,1$ бар, $t_1 = 115^\circ\text{C}$ до чотирикратного зменшення об'єму, якщо теоретична потужність компресора 50 кВт, в $D/S = 0,92$.

Задача 6.2.21. Визначити економію електроенергії при стиску повітря в двоступінчастому політропному ($n=1,26$) компресорі в порівнянні з одноступінчастим, якщо повітря з початковими параметрами: $P_1=765$ мм.рт.ст., $t_1=27^\circ\text{C}$ стискається до двадцятип'ятикратного збільшення густини, а $D=S = 130$ мм.

Задача 6.2.22. Визначити граничну міру підвищення тиску одноступінчастого компресора, коли подача дорівнює нулю. Обчислення зробити для таких значень показника політропи: $n = 1$; $n = 1,2$; $n = 1,4$ і таких значень відносного об'єму шкідливого простору: $\sigma = 0,02$; $\sigma = 0,035$; $\sigma = 0,05$.

Стискається двоатомний газ.

Задача 6.2.23. В компресорі стискається двоокис сірки з початковими параметрами: $P_1=0,115$ МПа, $T=330$ К. Визначити необхідну потужність привода компресора, якщо показник політропи $n=1,2$, $D=S=0,16$ м, стиск здійснюється до п'ятикратного збільшення густини, відносна величина шкідливого об'єму $0,05$, швидкість поршня $4,5$ м/с, а ККД компресора $-0,78$.

Задача 6.2.24. Азот з початковими параметрами: $t_1=17^\circ\text{C}$, $v_1=0,875$ м³/кг стискається в адіабатному компресорі до п'ятидесятикратного збільшення тиску. Визначити температуру, густину газу після стиску, витрату охолодної води в проміжному охолоднику, необхідну теоретичну потужність, якщо $D = 0,92 \cdot S$; $S = 140$ мм, а кутова швидкість вала $62,8$ рад/с.

Задача 6.2.25. Визначити необхідну кількість обертів вала політропного ($n=1,25$) компресора з діаметром 100 мм і ходом поршня 120 мм, який стискає кисень з початковими параметрами: $P_1=1,3$ бар, $t_1 = -33^\circ\text{C}$ до чотирикратного збільшення густини, якщо відносна частка шкідливого простору $0,04$, ККД компресора $0,78$, а споживана потужність 26 кВт.

7 ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

7.1 Приклади розв'язання задач

Задача 7.1.1. Вважаючи теплоємності сталими, визначити температури в характерних точках ідеального циклу ГТУ з ізобарним підведенням теплоти (циклу Брайтона), питому і загальну витрату умовного палива, потужність, яка втрачається з відпрацьованими газами, якщо відомо: $t_1 = 15^\circ\text{C}$; $B = 755$ мм.рт.ст., повітря стискається в компресорі до п'ятикратного збільшення густини, температура газів на вході в турбіну 950°C , потужність електрогенератора 4 МВт. Схема циклу ГТУ і зображення його на T - S діаграмі наведені на рис.7.1.

Розв'язування

Міра підвищення тиску в компресорі

$$\lambda = P_2/P_1 = (\rho_2/\rho_1)^k = 5^{1,4} = 9,52.$$

Значення показника степеня

$$m = (k-1)/k = (1,4-1)/1,4 = 0,2857.$$

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda^m = 288 \cdot 9,52^{0,2857} = 548.$$

Температура газів за турбіною, К

$$T_4 = T_3 / \lambda^m = 1223 / 9,52^{0,2857} = 642.$$

Ізобарна теплоємність повітря, кДж/(кг·К)

$$C_p = k \cdot R / (k-1) = R/m = 0,287 / 0,2857 = 1,004 \approx 1.$$

Питома робота компресора, кДж/кг

$$\ell_k = C_p(T_2 - T_1) = 1(548 - 288) = 260.$$

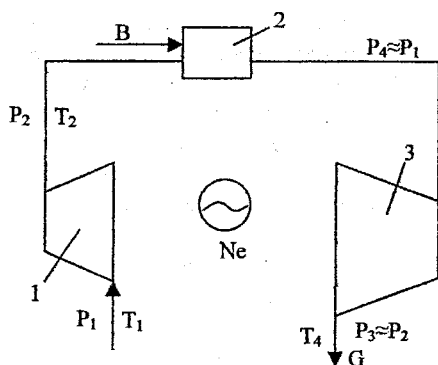


Рисунок 7.1 – Схема і цикл ГТУ на T-S діаграмі: 1 – компресор; 2 – камера згорання; 3 – газова турбіна; 4 – електрогенератор

Питома робота в турбіні, кДж/кг

$$\ell_m = C_p(T_3 - T_4) = 1(1223 - 642) = 581.$$

Питома робота циклу ГТУ, кДж/кг

$$\ell_{\pi} = \ell_m - \ell_k = 581 - 260 = 321.$$

Питома теплота, яка підведена в камері згорання, кДж/кг

$$q_{\kappa} = q_1 = C_p(T_3 - T_2) = 1(1223 - 548) = 675.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \ell_{\pi} / q_{\kappa} = 321/675 = 0,4755.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год.

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,4755 = 0,2586.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_e / 3,6 = 0,2586 \cdot 4 / 3,6 = 0,2874.$$

Витрата робочого тіла в ГТУ, кг/с

$$G = N_e \cdot 10^3 / \ell_{\pi} = 4 \cdot 10^3 / 321 = 12,46.$$

Потужність компресора, МВт

$$N_k = G \cdot \ell_k \cdot 10^{-3} = 12,46 \cdot 260 \cdot 10^{-3} = 3,24.$$

Потужність газової турбіни, МВт

$$N_{\text{гт}} = N_e + N_k = 4 + 3,24 = 7,24.$$

Коефіцієнт використання потужності

$$\phi = N_e / N_{\text{гт}} = 4 / 7,24 = 0,55.$$

Теплота, яка підведена в камері згорання, МВт

$$Q_{\kappa} = B_y \cdot Q_{\text{пу}}^p = G \cdot q_{\kappa} \cdot 10^{-3} = 0,2874 \cdot 29,3 = 8,42.$$

Теплова потужність, яка втрачається з відпрацьованими газами, МВт

$$Q_{\text{вт}} = (1 - \eta_t) Q_{\kappa} = (1 - 0,4755) \cdot 8,42 = 4,42.$$

Задача 7.1.2. За умовою задачі 7.1.1 визначити показники роботи дійсного циклу ГТУ. В розрахунках прийняти: ККД компресора і газової турбіни 0,85 і 0,87, відповідно; ККД камери згорання, механічний ККД і ККД електрогенератора – по 0,98; коефіцієнт, який враховує втрати тиску на шляху від компресора до газової турбіни $\Psi = 0,96$; тиск відпрацьованих газів $P_4 = 0,108$ МПа. Визначити також ексергетичні втрати і ексергетичний ККД.

Розв'язування

Дійсна робота компресора, кДж/кг

$$\ell_{\text{кд}} = \ell_{\text{к}} / \eta_{\text{к}} = 260 / 0,85 \approx 306.$$

Дійсна температура повітря після стиску, К

$$T_{2\text{д}} = T_1 + \ell_{\text{кд}} / C_p = 288 + 306 / 1,006 = 592$$

або $t_{2\text{д}} = 592 - 273 = 319^\circ\text{C}$.

Тиск повітря за компресором, бар

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda_{\text{к}} = (755/750) \cdot 9,52 = 9,58.$$

Тиск газів перед турбіною, бар

$$P_3 = P_2 \cdot \Psi = 9,58 \cdot 0,98 \approx 9,4.$$

Зміна тисків в турбіні

$$\lambda_{\text{т}} = P_3 / P_4 = 9,4 / 1,08 = 8,7.$$

Орієнтовна питома робота в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{\text{мо}} = \ell_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{т}} = 581 \cdot 0,87 = 505,5.$$

Орієнтовна температура газів за турбіною, К

$$T_{40} = T_3 - \ell_{\text{мо}} / C_p = 1233 - 505,5 / 1,05 = 741.$$

Середньотермодинамічна температура газів в турбіні, К

$$T_{\text{т}} = (T_3 - T_{40}) / \ln(T_3 / T_{40}) = (1223 - 741) / \ln(1223/741) = 962.$$

Теплоємності C_p і C_v для середньої температури з додатка Б, кДж/(кг·К)

$$C_p = 1,059; \quad C_v = 0,772.$$

Значення k і m для газів в турбіні

$$k_{\text{т}} = C_p / C_v = 1,059 / 0,772 = 1,372$$

$$m_{\text{т}} = (k_{\text{т}} - 1) / k_{\text{т}} = (1,372 - 1) / 1,372 = 0,271.$$

Дійсна температура газів за турбіною, К

$$T_{4\text{д}} = T_3 [1 - (1 - \lambda_{\text{т}}^{-m_{\text{т}}}) \eta_{\text{т}}] = 1223 [1 - (1 - 8,7^{-0,271}) 0,87] = 751$$

або $t_{4\text{д}} = 751 - 273 = 478^\circ\text{C}$.

Дійсна питома робота в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{\text{т}} = C_{p3} \cdot t_3 - C_{p4} \cdot t_4 = 1,0855 \cdot 950 - 1,035 \cdot 478 = 536,5.$$

Дійсна питома робота циклу, кДж/кг

$$\ell_{\text{ц}} = (\ell_{\text{т}} - \ell_{\text{кд}}) \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} = (536,5 - 306) \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 222.$$

Питома теплота, яка підведена в камері згорання, кДж/кг

$$q_{\text{кз}} = (C_{p3} \cdot t_3 - C_{p2} \cdot t_2) / \eta_{\text{кз}} = (1,0855 \cdot 950 - 1,021 \cdot 319) / 0,98 = 720.$$

ККД дійсного циклу ГТУ

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \ell_{\text{ц}} / q_{\text{кз}} = 222 / 720 = 0,3083.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123/\eta_{ГТУ} = 0,123/0,3083 = 0,399.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_e/3,6 = 0,399 \cdot 4/3,6 = 0,443.$$

Витрата робочого тіла ГТУ, кг/с

$$G = N_e \cdot 10^3 / \ell_{II} = 4 \cdot 10^3 / 222 = 18.$$

Потужність компресора, МВт

$$N_k = G \cdot \ell_{кд} \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 306 \cdot 10^{-3} = 5,5.$$

Потужність газової турбіни, МВт

$$N_{ГТ} = N_e + N_k = 4 + 5,5 = 9,5.$$

Коефіцієнт використання потужності

$$\varphi = N_e / N_{ГТ} = 4/9,5 = 0,42.$$

Теплова потужність камери згорання, МВт

$$Q_{кз} = B_y \cdot Q_{ny}^p = 0,443 \cdot 29,3 = 12,98.$$

Теплова потужність, яка втрачається з відпрацьованими газами, МВт

$$Q_{вт} = (1 - \eta_{ГТУ}) \cdot Q_{кз} = (1 - 0,3083) \cdot 12,98 = 8,98.$$

Питома теплота, що відводиться з відпрацьованими газами, кДж/кг

$$q_{вт} = Q_{вт} / G = 8,98 \cdot 10^3 / 18 = 499.$$

Середньотермодинамічна температура підведення теплоти в камері згорання, К

$$T_{кз} = (T_3 - T_{2д}) / \ln(T_3/T_{2д}) = (1223 - 592) / \ln(1223/592) = 870.$$

Теплоємність газів для температури підведення теплоти із додатка Б, кДж/(кг·К), $C_p = 1,0495$.

Питома ексергія, що підводиться в камері згорання, кДж/кг

$$\Delta e_{кз} = q_{кз} - T_{ис} \cdot D \cdot \Delta S_{кз} = q_{кз} - T_1 \cdot C_p \cdot \ln(T_3/T_{2д}) =$$

$$= 720 - 288 \cdot 1,0495 \ln(1223/592) = 500,7.$$

Ексергетичний ККД камери згорання

$$\eta_{екз} = \eta_{кз} (1 - T_1/T_{cp}) = 0,98 (1 - 288/870) = 0,655.$$

Ексергетичні втрати в камері згорання, кДж/кг

$$\Delta e_{кз}^{вт} = (1 - \eta_{екз}) \cdot \Delta e_{кз} = (1 - 0,655) \cdot 500,7 = 127,7.$$

Ексергетичні втрати з відпрацьованими газами, кДж/кг

$$\Delta e_{вт}^{вт} = q_{вт} - T_1 \cdot C_p \cdot \ln(T_{4д}/T_1) = 499 - 288 \cdot 1,004 \cdot \ln(751/288) = 221,86.$$

Ексергетичні втрати в компресорі, кДж/кг

$$\begin{aligned} \Delta e_k^{вт} &= T_1 \cdot \Delta S_k = T_1 [C_p \cdot \ln(T_{2д}/T_1) - R \cdot \ln(\lambda_k)] = \\ &= 288 [1,02 \ln(592/288) - 0,287 \ln(9,52)] = 25,4. \end{aligned}$$

Ексергетичні втрати в турбіні, кДж/кг

$$\begin{aligned} \Delta e_t^{вт} &= T_1 \cdot \Delta S_t = T_1 [C_p \cdot \ln(T_{4д}/T_3) - R \cdot \ln(\lambda_t)] = \\ &= 288 [1,059 \ln(751/1223) - 0,287 \ln(1/87)] = 30. \end{aligned}$$

Ексергетичний ККД циклу ГТУ

$$\eta_{цк} = 1 - (\Delta e_{вт}^{вт} + \Delta e_k^{вт} + \Delta e_t^{вт}) / \Delta e_{кз} = 1 - (221,86 + 25,4 + 30) / 500,7 = 0,446.$$

Ексергетичний ККД ГТУ

$$\eta_{\text{екс ГТУ}} = \eta_{\text{екс}} \cdot \eta_{\text{екз}} = 0,446 \cdot 0,655 = 0,292.$$

Із наведеного ексергетичного аналізу видно, що найбільші ексергетичні втрати - з відпрацьованими газами і в процесі підведення теплоти в камері згорання.

Задача 7.1.3. Теоретичний цикл ГТУ з потужністю електрогенератора 25 МВт працює з мірою підвищення тиску $\lambda = 16$ і температурою газів перед турбіною $T_3 = 1323$ К. Приймаючи теплоємності газів сталими, визначити витрату умовного палива в циклі, а також його економію в разі застосування двоступінчастого стиску і регенеративного підігріву повітря (рис.7.2) з мірою регенерації $\sigma = 0,7$. Параметри зовнішнього повітря: $P_1 = 0,1$ МПа, $T_1 = 288$ К.

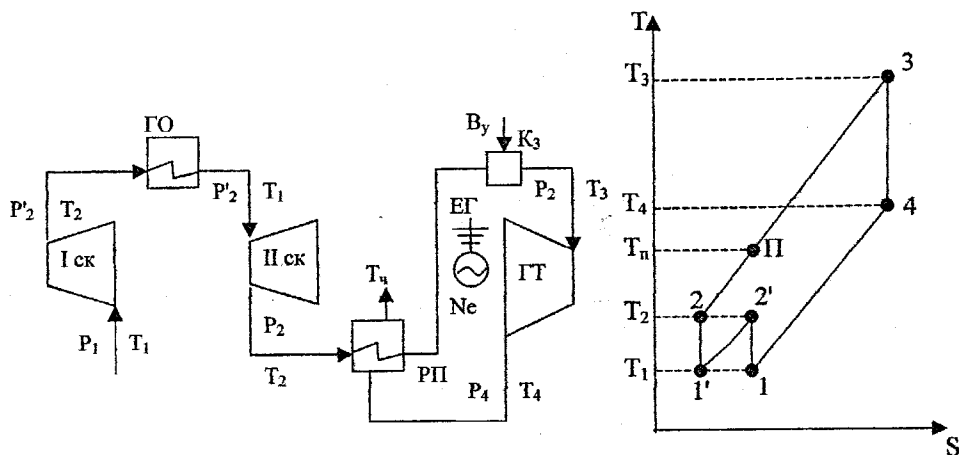


Рисунок 7.2 - Схема ГТУ і зображення циклу на T-S діаграмі. ІСК і ІСК - перший і другий ступені компресора; ГО - газохолодник; РП - регенеративний підігрівник повітря; КЗ - камера згорання; ГТ - газова турбіна; ЕГ - електрогенератор.

Розв'язування

Розрахунки циклу ГТУ без регенерації.

Міра підвищення тиску в кожному ступені компресора

$$\lambda_z = \lambda^{1/2} = 16^{1/2} = 4.$$

Температура повітря після кожного ступеня стиску, К

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_z^{(k-1)/k} = 288 \cdot 4^{(1,4-1)/1,4} = 288 \cdot 4^{0,2857} = 428.$$

Робота, яка витрачена на стиск повітря в компресорі, кДж/кг

$$\ell_k = z \cdot C_p (T_2 - T_1) = 2 \cdot 1,004 \cdot (428 - 288) = 281.$$

Температура газів на виході з газової турбіни, К

$$T_4 = T_3 / \lambda^{(k-1)/k} = 1323 / 16^{0,2857} = 599.$$

Питома робота газів в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{\tau} = C_p(T_3 - T_4) = 1,004 (1323 - 599) = 726,89.$$

Питома робота циклу, кДж/кг

$$\ell_{\Pi} = \ell_{\tau} - \ell_{\kappa} = 726,89 - 281 = 445,89.$$

Питома теплота, що підведена в камері згорання, кДж/кг

$$q_{\kappa} = C_p(T_3 - T_2) = 1,004 (1323 - 428) = 898,58.$$

Термічний ККД циклу ГТУ

$$\eta_t = \ell_{\Pi} / q_{\kappa} = 445,89 / 898,58 = 0,496.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,496 = 0,248.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_e / 3,6 = 0,248 \cdot 25 / 3,6 = 1,722.$$

Витрата робочого тіла, кг/с

$$G = N_e \cdot 10^6 / \ell_{\Pi} = 25 \cdot 10^3 / 445,89 = 56,067.$$

Теплота потужність, яка втрачається з відпрацьованими газами, МВт

$$Q_{\text{вт}} = G \cdot C_p(T_4 - T_1) = 56,067 \cdot 1,004 \cdot (599 - 288) \cdot 10^{-3} = 17,5.$$

Розрахунки циклу ГТУ з регенерацією.

В цьому разі питомі роботи компресора, газової турбіни і циклу залишаються незмінними. Температура повітря за другим ступенем компресора підвищується в регенеративному підігрівнику до значення T_n , яке визначається із виразу міри регенерації:

$$\sigma = (T_n - T_2) / (T_4 - T_2).$$

Отже, значення температури підігрітого в РП повітря, К

$$T_n = T_2 + \sigma(T_4 - T_2) = 428 + 0,7 (599 - 428) = 547,7.$$

Теплота, яка підведена в камері згорання, кДж/кг

$$q_{\kappa}^p = C_p(T_3 - T_n) = 1,004 (1323 - 547,7) = 778,4.$$

Термічний ККД циклу ГТУ з регенерацією

$$\eta_t^p = \ell_{\Pi} / q_{\kappa}^p = 445,89 / 778,4 = 0,5728.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y^p = 0,123 / \eta_t^p = 0,123 / 0,5728 = 0,2147.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y^p = b_y^p \cdot N_e / 3,6 = 0,2147 \cdot 25 / 3,6 = 1,49.$$

Температура газів на виході з регенератора з рівняння його теплового балансу, К

$$T_1 = T_4 - (T_n - T_2) = 599 - (547,7 - 428) = 479,3.$$

Теплова потужність, яка втрачається з відпрацьованими газами, МВт

$$Q_{\text{вт}}^p = G \cdot C_p(T_2 - T_1) = 56,07 \cdot 1,004 (479,3 - 288) \cdot 10^{-3} = 10,7.$$

Економія умовного палива в циклі завдяки регенерації теплоти, т/год

$$\Delta B_y = (B_y - B_y^p) \cdot 3,6 = (1,722 - 1,49) \cdot 3,6 = 0,835$$

$$\text{або } \Delta B_y = (Q_{\text{вг}} - Q_{\text{вг}}^p) \cdot 3,6 / Q_{\text{ну}}^p = (17,5 - 10,7) \cdot 3,6 / 29,3 = 0,835.$$

7.2 Завдання для самостійної роботи

Виконати розрахунки циклу газотурбінної установки, визначити витрату умовного палива, скласти ексергетичний баланс. В розрахунках прийняти, що початкові параметри повітря перед компресором дорівнюють $P_1 = 101,3$ кПа, $T_1 = 288$ К; коефіцієнти корисної дії компресора і газової турбіни – 0,85 і 0,87, відповідно; ККД камери згорання – 0,98; ККД електрогенератора – 0,985. Інші дані для розрахунків згідно із заданим варіантом вибрати з табл.7.1.

Примітка. Якщо в результаті розрахунків або за умови завдання міра підвищення тиску $\lambda \geq 9$, то застосовується схема ГТУ з двоступінчастим стиском повітря в компресорі з проміжним охолодженням після першого ступеня до початкової температури.

Таблиця 7.1 – Дані для розрахунків циклу ГТУ

Варіант	Показники												
	$N_{\text{с}}, \text{МВт}$	Витрата газу V , тис. $\text{м}^3/\text{год}$	$T_3, \text{К}$	$T_2, \text{К}$	$\lambda = P_2/P_1$	T_3/T_2	p_1/p_2	p_1/p_4	p_4/p_3	p_4/p_2	$\Delta T = T_3 - T_2, \text{К}$	$\theta = T_4 - T_2, \text{К}$	σ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		72				2,5					100		0,65
2	6			600						0,145			0,75
3		84			14						90		0,73
4	4								0,4		80		0,66
5		96	1323				0,13						0,8
6	10							2				70	0,7
7		78							0,375		95		0,75
8	2,5		1273					2,2					0,62
9		108							0,365	0,16			0,65
10	16				16							100	0,74
11		127		590				2,3					0,75
12	25					2,4				0,14			0,72
13		145					0,14			0,15			0,65
14	1,5								0,42			105	0,68
15	33				17						80	100	
16		148		585							75		0,75
17	45								0,4	0,155		100	
18		96	1173					2,2			80		0,72
19	52					2,6					90		0,75

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20		135						2,25		0,155			0,7
21	60		1293						0,43	0,16			
22		116			18			2,4					0,75
23	72			580							80	120	
24		69							0,425			100	0,78
25	75					2,45				0,157			0,68
26		84					0,135					95	0,7
27	12,5				20					0,15		100	
28		58	1273					2,3			95		
29	90			595							85		0,73
30		48					0,127				90	115	
31	100					2,5				0,147	100		
32		72			22						90		0,76
33	45							2,45		0,155	87		
34		55	1323						0,46		95		
35	57			575							85		0,72
36		115			15,6					0,15	80		
37	25						0,13				90		0,75
38	37							2,35	0,42				0,73
39		108				2,47					85	110	
40	67			585							80		0,68

8 ЦИКЛИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

8.1 Приклади розв'язання задач

Задачі цього розділу розв'язуються за допомогою h - s -діаграми водяної пари.

Задача 8.1.1. Паротурбінна установка (ПТУ) з потужністю електрогенератора $N_e = 150$ МВт працює за циклом Ренкіна (рис.8.1). Визначити показники роботи циклу і витрату умовного палива, якщо початкові параметри пари дорівнюють: $P_0 = 14$ МПа, $t_0 = 550^\circ\text{C}$, а густина пари в процесі розширення в турбіні зменшується в 666,666 разів. Визначити також, як зміняться показники роботи дійсного циклу ПТУ, для якого коефіцієнти корисної дії становлять: турбіни – 0,85; електромеханічний – 0,965; живильного насоса – 0,8, парогенератора – 0,9; температура зовнішнього середовища – 20°C .

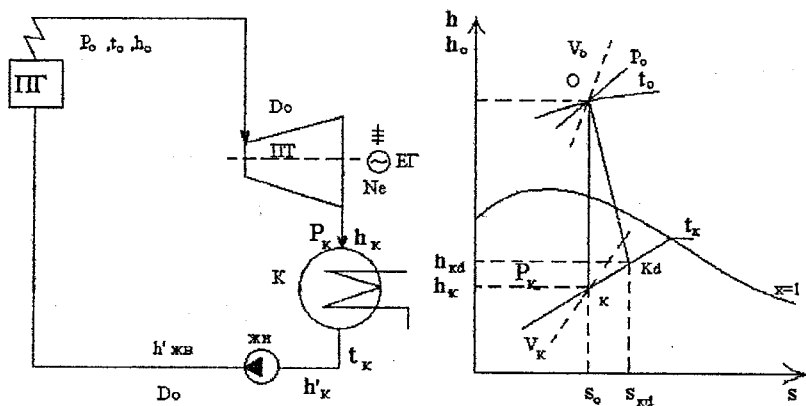


Рисунок 8.1 – Схема ПТУ та зображення процесів розширення пари на h - s -діаграмі: ПГ – парогенератор; ПТ – парова турбіна; К – конденсатор; ЖН – живильний насос.

Розв'язування

На h - s -діаграмі визначаємо початкову точку 0 на перетині ізобари P_0 та ізотерми t_0 . Параметри пари в точці 0: $h_0 = 3500$ кДж/кг; $v_0 = 0,03$ м³/кг; $S_0 = 6,68$ кДж/(кг·К). Питомий об'єм в кінцевій точці розширення пари в турбіні (на вході в конденсатор), м³/кг

$$v_k = v_0 \cdot 666,666 = 0,03 \cdot 666,66 = 20.$$

Визначаємо на діаграмі точку К на перетині ізоентропи S_0 з ізохорою v_k . Параметри пари в точці К: $h_k = 2060$ кДж/кг; $P_k = 6$ кПа; $t_k = 35^\circ\text{C}$.

Теоретична робота пари в турбіні (теоретичний теплоперепад),
кДж/кг

$$H_o = h_o - h_k = 3500 - 2060 = 1440.$$

Ентальпія конденсату, кДж/кг

$$h'_k = C_p t_k = 4,19 \cdot 35 = 146,65.$$

Питома витрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_k = h_k - h'_k = 2060 - 146,65 = 1293,35.$$

Питома робота живильного насоса, кДж/кг

$$\ell_n = v'(P_o - P_k) = 10^{-3} (1400 - 6) = 14.$$

Ентальпія живильної води, кДж/кг

$$h'_{ж.в} = h'_k + \ell_n = 146,65 + 14 = 160,65.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_o = N_e \cdot 10^3 / H_o = 150 \cdot 10^3 / 1440 = 104,16.$$

Термічний ККД циклу Ренкіна

$$\eta_t = (H_o - \ell_n) / (h_o - h'_{ж.в}) = (1440 - 14) / (3500 - 160,65) = 0,427.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,427 = 0,288.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y N_e / 3,6 = 0,288 \cdot 150 / 3,6 = 12.$$

Визначимо показники роботи дійсного циклу ПТУ.

Дійсний (робочий) теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H_p = H_o \cdot \eta_{oi} = 1440 \cdot 0,85 = 1224.$$

Дійсна ентальпія пари на виході з турбіни, кДж/кг

$$h_{кл} = h_o - H_p = 3500 - 1224 = 2276.$$

Точку K_d на h - s -діаграмі визначаємо на перетині ізоентальpii $h_{кл}$ з ізобарою P_k . Параметри пари в точці K_d : $S_{кл} = 7,4$ кДж/(кг К); $v_{кл} = 11$ м³/кг; $x_{кл} = 0,88$.

Дійсна питома робота живильного насоса, кДж/кг

$$\ell_{нд} = \ell_n / \eta_n = 14 / 0,8 = 17,5.$$

Ентальпія живильної води, кДж/кг

$$h'_{ж.в} = h'_k + \ell_{нд} = 146,65 + 17,5 = 164,15.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_o = N_e \cdot 10^3 / (H_p \cdot \eta_{ем}) = 150 \cdot 10^3 / (1224 \cdot 0,965) = 127.$$

Термічний ККД дійсного циклу ПТУ, кг/с

$$\eta_{цл} = (H_p - \ell_{нд}) / (h_o - h'_{ж.в}) = (1224 - 17,5) / (3500 - 164,15) = 0,3616.$$

Коефіцієнт корисної дії ПТУ

$$\eta_{пту} = \eta_{цл} \cdot \eta_{ш} = 0,3616 \cdot 0,9 = 0,3255.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123 / \eta_{пту} = 0,123 / 0,3255 = 0,3778.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_{y1}^A = b_y N_e / 3,6 = 0,3778 \cdot 150 / 3,6 = 15,74.$$

Отже, перевитрата умовного палива в дійсній ПТУ складає, кг/с

$$\Delta B_y = B_{y1} - B_y = 15,74 - 12 = 3,74$$

$$\text{або } \Delta B_y = 3,74 \cdot 3,6 = 13,464 \text{ т/год.}$$

Питомі втрати теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_{\text{кд}} = h_{\text{кд}} - h'_{\text{к}} = 2276 - 146,65 = 2129,35.$$

Задача 8.1.2. За умови задачі 8.1.1 визначити ексергетичні втрати і ексергетичний ККД ПТУ, яка працює за дійсним циклом.

Розв'язування

Температура живильної води, °С

$$t_{\text{жв}} = h'_{\text{жв}}/C_p = 164,15/4,19 = 39.$$

Значення питомої ентропії конденсату і живильної води із додатка Д, кДж/(кг·К)

$$S'_{\text{к}} = 0,5049; S'_{\text{жв}} = 0,572.$$

Питомі ексергетичні втрати в турбіні та живильному насосі, кДж/кг

$$\Delta e_{\text{хт}}^{\text{ст}} = T_{\text{нс}}(S_{\text{кд}} - S_0) = 293 (7,4 - 6,68) \approx 211$$

$$\Delta e_{\text{хн}}^{\text{ст}} = T_{\text{нс}}(S'_{\text{жв}} - S'_{\text{к}}) = 293 (0,572 - 0,5049) = 19,66.$$

Питомі ексергетичні втрати в конденсаторі турбіни, кДж/кг

$$\Delta e_{\text{хк}}^{\text{ст}} = q_{\text{кд}} (1 - T_{\text{нс}}/T_{\text{к}}) = 2129,35 (1 - 293/308) = 103,7.$$

Загальні ексергетичні втрати в турбінній установці, кДж/кг

$$\Sigma \Delta e_{\text{хту}}^{\text{ст}} = \Delta e_{\text{хт}}^{\text{ст}} + \Delta e_{\text{хн}}^{\text{ст}} + \Delta e_{\text{хк}}^{\text{ст}} = 211 + 19,66 + 103,7 = 334,36.$$

Питома ексергія, що підводиться до робочого тіла в парогенераторі, кДж/кг

$$e_{\text{хп}} = h_0 - h'_{\text{ж.с}} - T_{\text{зс}}(S_0 - S'_{\text{жв}}) = 3500 - 164,15 - 293 (6,68 - 0,572) = 1541,2.$$

Перевіряємо ексергетичний баланс турбоустановки, кДж/кг

$$e_{\text{хту}} = e_{\text{п}} = H_p - e_{\text{нд}} = \Delta \ell_{\text{хп}} - \Delta e_{\text{хту}} = 1224 - 17,5 = 1206,5 = 1541,2 - 334,36 = 1206,84.$$

Отже, баланс складений вірно.

Ексергетичний ККД дійсного циклу

$$\eta_{\text{едц}} = \ell_{\text{ц}}/\Delta e_{\text{хп}} = 1206,5/1541,2 = 0,7828.$$

Середньотермодинамічна температура робочого тіла в парогенераторі, К

$$T_{\text{ср}} = (h_0 - h'_{\text{ж.в}})/(S_0 - S'_{\text{жв}}) = (3500 - 164,15)/(6,68 - 0,572) = 546.$$

Ексергетичний ККД парогенератора

$$\eta_{\text{епг}} = \eta_{\text{пг}} (1 - T_{\text{зс}}/T_{\text{ср}}) = 0,9 (1 - 293/546) = 0,417.$$

Ексергетичний ККД ПТУ

$$\eta_{\text{епту}} = \eta_{\text{едц}} \cdot \eta_{\text{епг}} = 0,7828 \cdot 0,417 = 0,326.$$

Задача 8.1.3. Підігрів охолодної води в конденсаторі парової турбіни дорівнює 20 К, а її витрата 3600 м³/год. Тиск в конденсаторі становить 0,005 МПа, а питомі втрати теплоти – 0,573 кВт год. В складі ПТУ є два змішувальних регенеративних підігрівника (РП), в яких температура конденсату рівномірно підвищується на 80°С. Підігрівники заживлені паром з

відборів турбіни з тиском 1,8 і 0,8 бара, відповідно (рис.8.2). Визначити витрату умовного палива і показники роботи ПТУ, яка працює за теоретичним циклом, якщо температура пари перед турбіною складає $t_0 = 480^\circ\text{C}$.

Розв'язування

Із додатка Д визначаємо температуру конденсату $t_k = 32,88 \approx 33^\circ\text{C}$.

Ентальпія конденсату, кДж/кг

$$h'_k = C_p \cdot t_k = 4,187 \cdot 33 = 138.$$

Ентальпія пари на вході в конденсатор, кДж/кг

$$h_k = h'_k + q_k = 138 + 0,573 \cdot 3600 = 2200.$$

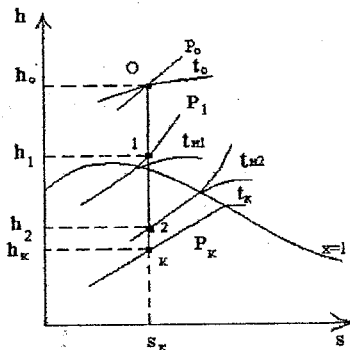
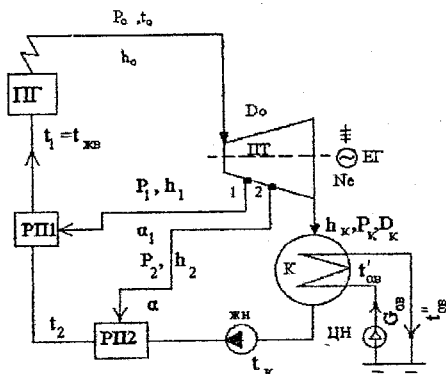


Рисунок 8.2 – Схема ПТУ і зображення робочого процесу пари в турбіні на h - s -діаграмі: ПГ – парогенератор; ПТ – парова турбіна; ЕГ – електрогенератор; ЖН – живильний насос; ЦН – циркуляційний насос; РПІ – регенеративні підігрівники

Кінцеву точку К на h - s -діаграмі визначаємо на перетині ізотермі h_k з ізобарою $P_k = 5 \text{ кПа}$. Початкову точку 0 визначаємо на перетині ізотермі $S_k = 7,2 \text{ кДж/(кг К)}$ з ізотермою $t_0 = 480^\circ\text{C}$. Ентальпія пари на вході в турбіну $h_0 = 3425 \text{ кДж/кг}$, а початковий тиск $P_0 = 30 \text{ бар}$. Точки відборів пари з турбіни 1 і 2 визначаємо на перетині ізотерми S_k з ізобарами P_1 і P_2 , відповідно. Ентальпії пари у відборах турбіни, кДж/кг : $h_1 = 2720$; $h_2 = 2575$.

За допомогою додатка Д визначаємо температуру насичення у відборах, $^\circ\text{C}$,

$$t_{n1} = 117; t_{n2} = 93,5.$$

Температура живильної води, $^\circ\text{C}$

$$t_{ж.в} = t_k + \Delta t_{ж.в} = 33 + 80 = 113.$$

Ентальпія живильної води, кДж/кг

$$h'_{ж.в} = C_p \cdot t_{ж.в} = 4,2 \cdot 113 = 474,6.$$

Теплота, яку отримує вода в кожному РПІ в процесі підігріву, кДж/кг

$$q_{в1} \approx q_{в2} = \Delta t_{жв} \cdot C_p / 2 = 80 \cdot 4,19 / 2 = 167,6.$$

Теплота, яку віддає пара в підігрівниках, кДж/кг

$$q_{п1} = h_1 - C_p \cdot t_{н1} = 2720 - 4,2 \cdot 117 = 2228,6$$

$$q_{п2} = h_2 - C_p \cdot t_{н2} = 2575 - 4,19 \cdot 93,5 = 2183,2.$$

Частки відборів пари з турбіни на РП

$$\alpha_1 = q_{в1} / (q_{в1} + q_{п1}) = 167,6 / (167,6 + 2228,6) = 0,007$$

$$\alpha_2 = (1 - \alpha_1) q_{в1} / (q_{в1} + q_{п2}) = (1 - 0,007) 167,6 / (167,6 + 2183,2) = 0,0663.$$

Частка пари, яка надходить в конденсатор

$$\alpha_k = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 = 1 - 0,007 - 0,0663 = 0,8637.$$

Теоретичний теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H_0 = h_0 - h_k = 3425 - 2200 = 1225.$$

Коефіцієнти недовиробітку роботи в турбіні

$$y_1 = (h_1 - h_k) / H_0 = (2720 - 2200) / 1225 = 0,424$$

$$y_2 = (h_2 - h_k) / H_0 = (2575 - 2200) / 1225 = 0,306.$$

Теоретична робота в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{то} = H_0 (1 - \alpha_1 y_1 - \alpha_2 y_2) = 1225 (1 - 0,007 \cdot 0,424 - 0,0663 \cdot 0,306) = 1163,8.$$

Питома витрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_k = 0,573 \cdot 3600 = 2062.$$

Витрата пари в конденсаторі турбіни з рівняння балансу конденсатора, кг/с

$$D_k = G_{ов} \cdot C_p \cdot \Delta t_{ов} / (3600 \cdot q_k) = 3600 \cdot 4,187 \cdot 20 / (3600 \cdot 2062) = 40,6.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_0 = D_k / \alpha_k = 40,6 / 0,8637 = 47.$$

Потужність ПТУ, МВт

$$N = D_k \cdot \ell_{то} = 47 \cdot 1163,8 \cdot 10^{-3} = 54,7.$$

Термічний ККД циклу ПТУ

$$\eta_t = \ell_{то} / (h_0 - h'_{жв}) = 1163,8 / (3425 - 474,6) = 0,394.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,394 = 0,312.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N / 3,6 = 0,312 \cdot 54,7 / 3,6 = 4,74.$$

Задача 8.1.4. Тиск в конденсаторі турбіни потужністю 200 МВт складає 5 кПа, а допустима міра сухості пари $x_k = 0,88$. ПТУ працює з проміжним перегрівом пари, на який витрачається 0,135 кВт·год теплоти (рис.8.3). Визначити показники роботи теоретичного циклу ПТУ, витрати умовного палива і охолодної води в конденсаторі, якщо її підігрів дорівнює 17°C, а тиск пари перед турбіною 12 МПа. Порівняти показники роботи заданої ПТУ з показниками роботи ПТУ, яка працює без проміжного перегріву пари

Розв'язування

Точку К, яка характеризує стан пари на вході в конденсатор, визначаємо на перетині ізобари $P_k = 5$ кПа з кривою допустимої міри сухості $x_d = x_k = 0,88$. Параметри пари в точці К: $h_k = 2275$ кДж/кг;

$x_K = 0,88$. Параметри пари в точці К: $h_K = 2275$ кДж/кг;
 $t_K \approx 33^\circ\text{C}$; $S_K = 7,45$ кДж/(кг·К).

Оптимальний тиск для проміжного перегріву пари [1]

$$P_{II} = (0,15 - 0,2) P_0$$

Тому $P_{II} = 0,2 \cdot P_0 = 0,2 \cdot 12 = 2,4$ МПа = 2400 кПа.

Точку ПП, яка характеризує стан пари після проміжного пароперегрівника, визначаємо на перетині ізобари P_{II} з ізентропою S_K . Параметри пари в точці ПП: $h_{PP} = 3536$ кДж/кг; $t_{PP} = 530^\circ\text{C}$.

Питома витрата теплоти на проміжний перегрів пари, кДж/кг
 $q_{PP} = 0,135 \cdot 3600 = 486$.

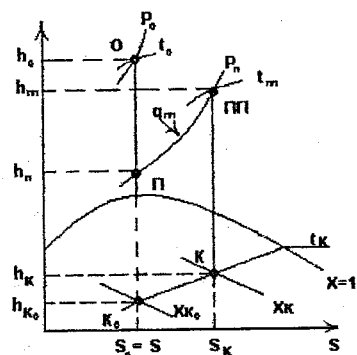
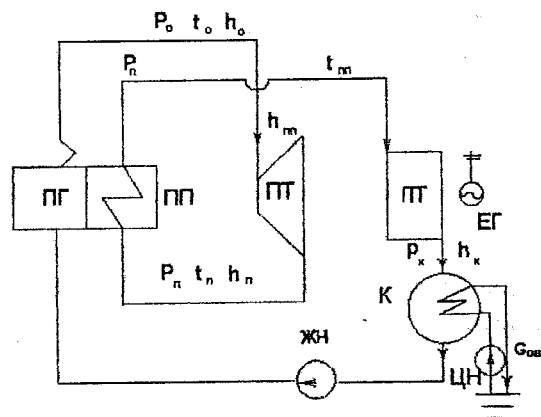


Рисунок 8.3 – Схема і робочий процес на h-s-діаграмі ПТУ з проміжним перегрівом пари: ПП – проміжний пароперегрівник; інші позначення див. на рис.8.2.

Ентальпія пари до проміжного пароперегрівника, кДж/кг

$$h_{II} = h_{PP} - q_{PP} = 3536 - 486 = 3050.$$

Точку П визначаємо на перетині ізобари P_{II} з ізентропою h_{II} . Початкову точку, яка характеризує стан пари на вході в турбіну, визначаємо на перетині ізентропи $S_{II} = 6,43$ кДж/(кг·К) з ізобарою P_0 .

Параметри пари в точці 0: $h_0 = 3530$ кДж/кг; $t_0 = 570^\circ\text{C}$.

Теоретичний теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H_0 = h_0 - h_{II} + (h_{PP} - h_{II}) = h_0 - h_K + q_{PP} = 3530 - 2275 + 486 = 1741.$$

Питома втрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_K = h_K - C_p \cdot t_K = 2275 - 4,187 \cdot 33 = 2137.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_0 = N_e \cdot 10^3 / H_0 = 200 \cdot 10^3 / 1741 = 114,87.$$

Витрата охолодної води в конденсаторі, кг/с

$G_{ов} = D_o \cdot q_k / (C_p \cdot \Delta t_{ов}) = 114,87 \cdot 2137 / (4,187 \cdot 17) = 3348,7$.
Ентальпія живильної води, кДж/кг

$$h'_{ж,в} = h'_k = C_p \cdot t_k = 4,187 \cdot 33 = 138.$$

Термічний ККД циклу ПТУ

$$\eta_t = H_o / (h_o - h'_k + q_{шт}) = 1741 / (3530 - 138 + 486) = 0,4489.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год.

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,4489 = 0,274.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_e / 3,6 = 0,274 \cdot 200 / 3,6 = 15,22.$$

Якщо б ПТУ працювала без проміжного перегріву пари, то процес розширення пари відбувався б за ізоентропою S_o . А кінцева точка K_o визначалася б на перетині ізобари P_k з ізоентропою S_o . Параметри пари в точці K_o : $h_{ko} = 2050$ кДж/кг; $x_{ko} = 0,79$. Кінцева міра сухості пари менша, ніж допустима, тому робота турбіни в принципі не можлива.

Теоретичний теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H'_o = h_o - h_{ko} = 3530 - 2050 = 1480.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D'_o = N_e \cdot 10^3 / H_o = 200 \cdot 10^3 / 1480 = 135,13.$$

Питома втрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q'_k = h_{ko} - h'_k = 2050 - 138 = 1912.$$

Витрата охолодної води в конденсаторі, кг/с

$$G'_{ос} = D'_o \cdot q'_k / (C_p \Delta t_{ов}) = 135,13 \cdot 1912 / (4,187 \cdot 17) = 3629,8.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta'_t = H'_o / (h_o - h'_k) = 1480 / (3530 - 138) = 0,436.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт год

$$b'_y = 0,123 / \eta'_t = 0,123 / 0,436 = 0,282.$$

Загальна витрата умовного палива, кг.с

$$B'_y = b'_y \cdot N_e / 3,6 = 0,282 \cdot 200 / 3,6 = 15,67.$$

Зіставлення результатів розрахунків показує, що показники роботи ПТУ без проміжного перегріву гірші, ніж показники роботи ПТУ з проміжним перегрівом пари.

Задача 8.1.5. Витрата охолодної води в конденсаторі турбіни складає 25000 т/год, а її підігрів – 20 К. Проміжний перегрів пари здійснюється до початкової температури 550°C. В схемі ПТУ є регенеративний підігрівник (РП), який підігріває конденсат на 50°C і заживлений паром з відбору турбіни, коефіцієнт недовиробітку якої дорівнює 0,256. Визначити показники роботи, витрату умовного палива теоретичного циклу ПТУ, якщо питома втрата теплоти в конденсаторі – 0,595 кВт·год., а температура конденсату – 33°C. Схему ПТУ і зображення робочого процесу пари в турбіні на h - S діа-

грамі показані на рис. 8.4.

Розв'язування

Ентальпія конденсату, кДж/кг

$$h'_k = C_p \cdot t_k = 4,187 \cdot 33 = 138.$$

Питома втрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_k = 0,595 \cdot 3600 = 2142.$$

Ентальпія пари на вході в конденсатор, кДж/кг

$$h_k = h'_k + q_k = 138 + 2142 = 2280.$$

Точку К на h-s-діаграмі визначаємо на перетині ізоентальпи h_k з ізотермою t_k . Інші параметри в точці К: $P_k = 5$ кПа; $S_k = 7,5$ кДж/(кг·К); $x_k = 0,885$.

Точку ПП визначаємо на перетині ізентропи S_k з ізотермою $t_{\text{нп}} = t_o$. Параметри пари в точці ПП: $h_{\text{нп}} = 3580$ кДж/кг; $v_{\text{нп}} = 0,16$ м³/кг; $P_{\text{нп}} = 2400$ кПа.

Початковий тиск пари перед турбіною, кПа

$$P_o = P_{\text{нп}} / 0,2 = 2400 / 0,2 = 12000.$$

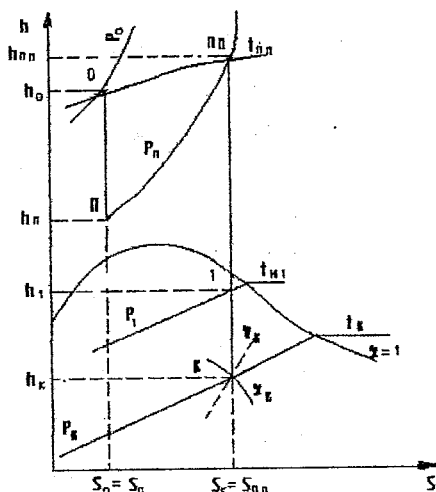
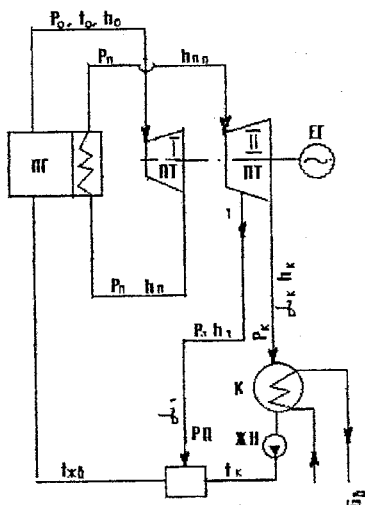


Рисунок 8.4 – Схема ПТУ і робочий процес пари на h-S діаграмі. Позначення див. на рис.8.2 і 8.3.

Точку О, яка характеризує стан пари на вході в турбіну, визначаємо на перетині ізотерми $t_o = t_{\text{нп}}$ з ізобарою P_o . Параметри пари в точці О: $h_o = 3480$ кДж/кг; $S_o = 6,68$ кДж/(кг·К); $v_o = 0,03$ м³/кг.

Точку П, яка характеризує стан пари на вході в проміжний пароперегрівник, визначаємо на перетині ізобари $P_{\text{нп}}$ з ізентропою $S_o = S_{\text{нп}}$. Параметри

три пари в точці П: $h_p = 3020$ кДж/кг; $t_p = 300^\circ\text{C}$.

Питома теплота, яка витрачається на проміжний перегрів пари, кДж/кг

$$q_{\text{пг}} = h_{\text{пг}} - h_p = 3580 - 3020 = 560.$$

Теоретичний перепад в турбіні, кДж/кг

$$H_0 = h_0 - h_k + q_{\text{пг}} = 3480 - 2280 + 560 = 1760.$$

Ентальпія пари у відборі турбіни, кДж/кг

$$h_1 = h_k + y_1 \cdot H_0 = 2280 + 0,256 \cdot 1760 = 2730.$$

Точка 1 на h - s -діаграмі визначається на перетині ізоентальпії h_1 з ізоентропією $S_0 = S_{\text{пг}}$. Параметри пари в точці 1: $P_1 = 80$ кПа; $t_1 = 100^\circ\text{C}$; $t_{\text{н1}} = 93^\circ\text{C}$.

Ентальпія конденсації пари в РП, кДж/кг

$$h_1' = C_p \cdot t_{\text{н1}} = 4,2 \cdot 93 \approx 391.$$

Температура та ентальпія живильної води

$$t_{\text{жв}} = t_k + \Delta t_{\text{рп}} = 33 + 50 = 83^\circ\text{C};$$

$$h_{\text{жв}}' = C_p \cdot t_{\text{жв}} = 4,2 \cdot 83 = 349 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, яка передана воді в РП, кДж/кг

$$q_{\text{в1}} = h_{\text{жв}}' - h_k' = 349 - 138 = 211.$$

Теплота, яка віддана парою в РП, кДж/кг

$$q_{\text{п1}} = h_1 - h_1' = 2730 - 391 = 2339.$$

Частка відбору пари з турбіни на РП

$$\alpha_1 = q_{\text{в1}} / (q_{\text{в1}} + q_{\text{п1}}) = 211 / (211 + 2339) = 0,083.$$

Питома робота пари в турбіні, кДж/кг

$$\ell_{\text{то}} = H_0 (1 - \alpha_1 \cdot y_1) = 1760 (1 - 0,083 \cdot 0,265) = 1721.$$

Термічний ККД циклу ПТУ

$$\eta_t = \ell_{\text{то}} / (h_0 - h_{\text{жв}}' + q_{\text{пг}}) = 1721 / (3480 - 391 + 560) = 0,4716.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год.

$$b_y = 0,123 / \eta_t = 0,123 / 0,4716 = 0,26.$$

Витрата пари в конденсаторі турбіни з рівняння теплового балансу конденсатора, кг/с

$$D_k = G_{\text{ов}} \cdot C_p \cdot \Delta t_{\text{ов}} / (3,6 \cdot q_k) = 2500 \cdot 4,187 \cdot 20 / (3,6 \cdot 2142) = 271,5.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_0 = D_k / \alpha_k = D_k / (1 - \alpha_1) = 271,5 (1 - 0,083) = 296.$$

Електрична потужність ПТУ, МВт

$$N_e = D_0 \cdot \ell_{\text{то}} = 296 \cdot 1721 \cdot 10^{-3} = 509,5.$$

Витрата умовного палива на ПТУ, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_e / 3,6 = 0,26 \cdot 509,5 / 3,6 = 36,8.$$

Задача 8.1.6. Теплофікаційна ПТУ з електричною потужністю 50 МВт працює з початковими параметрами $P_0 = 9$ МПа і $t_0 = 510^\circ\text{C}$. Турбіна має один відбір пари тиском 120 кПа. З цього відбору заживлені регенеративний підігрівник, який підвищує температуру конденсату на 40°C і підігрівник системи теплофікації потужністю 50 МВт (рис.8.5). Визначити показники роботи ПТУ, якщо тиск в конденсаторі 4 кПа, відносний внутрішній ККД турбіни – 0,84, електромеханічний ККД – 0,97, зворотний конденсат змішується з живильною водою і надходить в парогенератор. Зіставити також показники роботи теплофікаційної ПТУ з показниками роботи конденсаційної ПТУ.

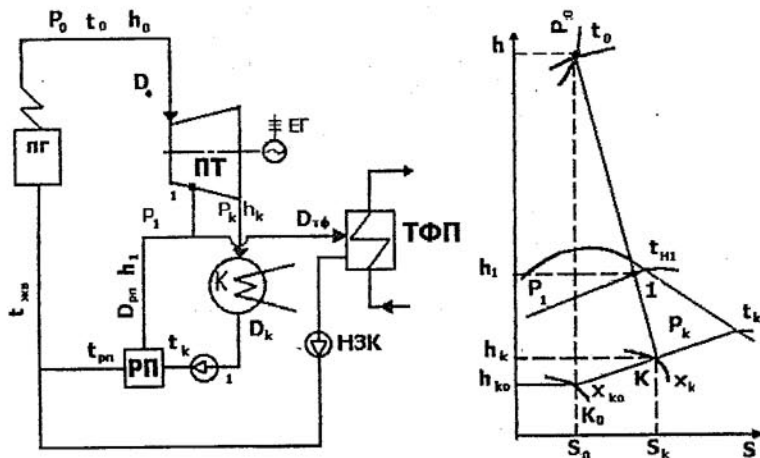


Рисунок 8.5 – Схема і зображення циклу теплофікаційної ПТУ на h - s діаграмі: ТФП – теплофікаційний підігрівник; НЗ – насос зворотного конденсату. Інші позначення див. на рис.8.2 і 8.3.

Розв'язування

Початкову точку 0 визначаємо на перетині ізобари P_0 з ізотермою t_0 . Параметри пари в точці 0: $h_0 = 3410$ кДж/кг; $S_0 = 6,7$ кДж/(кг·К). Теоретичний процес розширення пари в турбіні здійснюється за умови $S_0 = \text{const}$. Точку K_0 визначаємо на перетині ізобари P_k з ізентропою S_0 . Параметри пари в точці K_0 : $h_{k0} = 2030$ кДж/кг; $x_{k0} = 0,78$; $t_k = 29,5^\circ\text{C}$.

Теоретичний теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H_0 = h_0 - h_{k0} = 3410 - 2030 = 1380.$$

Дійсний (робочий) теплоперепад в турбіні, кДж/кг

$$H_p = H_0 \cdot \eta_{oi} = 1380 \cdot 0,84 = 1159.$$

Дійсна ентальпія пари на виході з турбіни, кДж/кг

$$h_k = h_0 - H_p = 3410 - 1159 = 2251.$$

Точку К, яка характеризує стан пари на вході в конденсатор, визначаємо на перетині ізобари P_K з ізоентальпою h_K . Параметри пари в точці К: $x_K = 0,875$; $S_K = 7,47$. З'єднуємо точки 0 і К лінією. Точку 1 визначаємо на перетині лінії 0 – К з ізобарою P_1 . Параметри пари в точці 1: $h_1 = 2640$ кДж/кг; $x_1 = 0,98$; $t_{n1} = 105^\circ\text{C}$; $S_1 = 7,2$ кДж/(кг·К).

Ентальпія конденсату і конденсату відбірної пари, кДж/кг

$$h'_K = C_p \cdot t_K = 4,187 \cdot 29,5 = 124$$

$$h'_1 = C_p \cdot t_{n1} = 4,2 \cdot 105 = 441.$$

Витрата пари з відбору на теплофікацію, кг/с

$$D_{\text{тф}} = Q_{\text{тф}} \cdot 10^3 / (h_1 - h'_1) = 50 \cdot 10^3 / (2640 - 441) = 22,74.$$

Температура води після регенеративного підігрівника, $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{рп}} = t_K + \Delta t_{\text{рп}} = 29,5 + 40 = 69,5.$$

Питома теплота підігріву води в РП, кДж/кг

$$q_{\text{в1}} = C_p \cdot \Delta t_K = 4,19 \cdot 40 = 167,6.$$

Ентальпія води за РП, кДж/кг

$$h'_{\text{рп}} = C_p \cdot t_{\text{рп}} = 4,2 \cdot 69,5 = 292.$$

Питома теплота, яка віддана паром у РП, кДж/кг

$$q_{\text{n1}} = h_1 - h'_n = 2640 - 441 = 2199.$$

Із рівняння теплового балансу РП $D_K \cdot q_{\text{в1}} = D_{\text{рп}} \cdot q_{\text{n1}}$ визначаємо витрату грієної пари на РП, кг/с

$$D_{\text{рп}} = D_K \cdot q_{\text{в1}} / q_{\text{n1}} = D_K \cdot 167,6 / 2199 = 0,076 D_K.$$

Запишемо рівняння електричної потужності ПТУ

$$N_e = [(D_{\text{рп}} + D_{\text{тф}})(h_0 - h_1) + D_K H_p] 10^{-3} \cdot \eta_{\text{ем}} \quad (8.1)$$

Тобто $50 = [(0,076 D_K + 22,74)(3410 - 2640) + D_K \cdot 1159] 10^{-3} \cdot 0,97.$

З останнього рівняння визначаємо

$$D_K = 27,95 \text{ кг/с}; \quad D_{\text{рп}} = 0,076 \cdot 27,95 = 2,12 \text{ кг/с}.$$

Витрата пари на турбіну, кг/с

$$D_0 = D_{\text{рп}} + D_{\text{тф}} + D_K = 2,12 + 22,74 + 27,95 = 52,81.$$

Частки відборів пари:

на регенеративний підігрівник

$$\alpha_{\text{рп}} = D_{\text{рп}} / D_0 = 2,12 / 52,81 = 0,04;$$

на теплофікаційний підігрівник

$$\alpha_{\text{тф}} = D_{\text{тф}} / D_o = 22,74 / 52,81 = 0,43;$$

на конденсатор

$$\alpha_k = D_k / D_o = 27,95 / 52,81 = 0,53.$$

Ентальпія живильної води, кДж/кг

$$h'_{\text{жв}} = (\alpha_{\text{рп}} + \alpha_k) h'_{\text{рп}} + \alpha_{\text{тф}} h'_1 = (0,04 + 0,53) 292 + 0,43 441 = 356.$$

Питома теплота, що підведена в циклі ПТУ, кДж/кг

$$q_o = h_o - h'_{\text{жв}} = 3410 - 356 = 3054.$$

Питома втрата теплоти в конденсаторі, кДж/кг

$$q_k = h_k - h'_k = 2251 - 124 = 2127.$$

Термічний ККД теплофікаційного циклу

$$\eta_t = 1 - \alpha_k \cdot q_k / q_o = 1 - 0,53 \cdot 2127 / 3054 = 0,63.$$

У випадку, коли ПТУ працює в конденсаційному режимі, $D_{\text{тф}} = 0$ і рівняння (8.1) буде мати вигляд:

$$N_c = [D'_{\text{рп}}(h_o - h_1) + D'_k \cdot H_p] 10^{-3} \eta_{\text{см}})$$

$$\text{або } 50 - [0,076 \cdot D'_k (3410 - 2640) + D'_k \cdot 1159] 10^{-43} 0,97.$$

З останнього рівняння визначаємо:

$$D'_k = 45,64 \text{ кг/с}; D'_{\text{рп}} = 3,47 \text{ кг/с}; D'_o = D'_{\text{рп}} + D'_k = 49,11 \text{ кг/с};$$

$$\alpha'_k = 1 - \alpha'_{\text{рп}} = 1 - 0,0706 = 0,929, \text{ де } \alpha'_{\text{рп}} = D'_{\text{рп}} / D'_o.$$

Питома теплота, що підведена в циклі, кДж/кг

$$q'_o = h_o - h'_{\text{жв}} = h_o - h'_{\text{рп}} = 3410 - 292 = 3118.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta'_t = 1 - \alpha'_k \cdot q_k / q'_o = 1 - 0,929 \cdot 2127 / 3118 = 0,336.$$

Отже, в разі комбінованого відпуску теплоти і електроенергії “абсолютний” термічний ККД циклу зростає на 26%.

8.2 Завдання для самостійної роботи

Задача 8.2.1. Параметри пари за турбіною дорівнюють: $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$, $x_k = 0,94$, а початкова температура $t_o = 400^\circ\text{C}$. Визначити теплоту, яка ви-

трачена на перегрів пари в парогенераторі, витрату умовного палива в циклі Ренкіна, якщо витрата охолодної води складає 5400 т/год., а її підігрів – 20 К.

Задача 8.2.2. Початкові параметри пари перед турбіною в циклі Ренкіна складають: $P_0 = 2$ МПа, $\rho = 6,25$ кг/м³. Пара розширюється до тринадцятикратного зменшення температури. Визначити витрату умовного палива, теплоту пароутворення в кінцевій точці, витрату охолодної води, якщо потужність електрогенератора 6 МВт, а підігрів охолодної води – 18°C.

Задача 8.2.3. Парогенератор генерує пару з параметрами: $P = 4$ МПа, $t = 420$ °C. Тиск перед паровою турбіною в циклі Ренкіна має дорівнювати 2 МПа, а кінцева температура 33°C. Визначити витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів складає 20°C, потужність електрогенератора 4 МВт. Визначити також перевитрату умовного палива завдяки дреселюванню пари після парогенератора в циклі Ренкіна.

Задача 8.2.4. Температура пари в конденсаторі турбіни 30°C, а питома втрата теплоти 0,6 кВт·год. Визначити теплоту пароутворення в кінцевій точці, витрату умовного палива в циклі Ренкіна, якщо потужність електрогенератора 2,5 МВт, а розширення пари в турбіні здійснюється до тринадцятикратного зменшення тиску.

Задача 8.2.5. Паротурбінна установка в циклі Ренкіна працює з початковими параметрами: $t_0 = 470$ °C, $\rho_0 = 2,857$ кг/м³. Побудувати криву залежності термічного ККД циклу і витрати умовного палива від величини тиску в конденсаторі, який дорівнюватиме: 3, 5, 8, 10 кПа. Потужність електрогенератора 4 МВт.

Задача 8.2.6. Кінцевий тиск пари в циклі Ренкіна – 5 кПа, а питома втрата в конденсаторі – 0,585 кВт·год. Побудувати криву залежності термічного ККД циклу і потужності живильного насоса від значення початкової температури, яка має дорівнювати: 350, 400, 450 і 500°C. Потужність електрогенератора – 6 МВт.

Задача 8.2.7. Кінцеві параметри пари в циклі Ренкіна складають: $\rho_k = 0,05$ кг/м³, $x_k = 0,84$, а потужність електрогенератора – 12 МВт. Побудувати залежності термічного ККД циклу і витрати умовного палива від початкового тиску, який має дорівнювати: 1,5; 2,0; 3,0 і 4,0 МПа.

Задача 8.2.8. Потужність електрогенератора в циклі Ренкіна – 12 МВт, а витрата умовного палива – 1,09 кг/с. Визначити початкові параметри пари і витрату охолодної води, якщо її підігрів 20 К, а кінцеві параметри складають: $P_k = 5$ кПа, $S_k = 7$ кДж/(кг·К).

Задача 8.2.9. Початкові параметри пари в циклі Ренкіна становлять: $P_0 = 3$ МПа, $t_0 = 420$ °C, а витрата пари – 10 кг/с. Визначити кінцеві параметри пари, витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів 15°C, а потужність електрогенератора – 9,7 МВт.

Задача 8.2.10. На перегрів сухої насиченої пари з тиском 5 МПа витрачається 0,16666 кВт·год теплоти. Далі пара виконує роботу в турбіні, де її температура зменшується в 16 разів. Визначити витрату умовного пали-

ва, якщо витрата охолодної води в конденсаторі – 10800 т/год., її підігрів – 20 К, а значення ККД складають: $\eta_{oi} = 0,83$; $\eta_{cm} = 0,964$; $\eta_{ш} = 0,91$.

Задача 8.2.11. Міра сухості пари на виході з турбіни – 0,9, а теплота пароутворення – 2300 кДж/кг. Визначити витрату умовного палива в циклі Ренкіна, якщо початкова густина пари 5 кг/м³, витрата охолодної води в конденсаторі – 7200 м³/год., а її підігрів – 15°C, $h'' = 2580$ кДж/кг.

Задача 8.2.12. Суха насичена пара з тиском 1,5 МПа перегрівається в парогенераторі на 170°C, після чого виконує роботу в циклі Ренкіна. При цьому її густина зменшується в 100 разів. Визначити витрату умовного палива, показник адиабати, витрату охолодної води, якщо її підігрів – 20°C, а потужність електрогенератора – 5 МВт.

Задача 8.2.13. Пара з початковими параметрами: $t_0 = 470^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 25 \text{ кг/м}^3$ спочатку дроселюється до трикратного збільшення об'єму, а потім виконує роботу в турбіні до двохсоткратного зменшення тиску. Визначити витрату умовного палива і теплоту пароутворення в кінцевій точці, якщо витрата охолодної води складає 5400 т/год., а її підігрів – 17°C. Визначити також ці показники за умови, що дроселювання пари не відбувається.

Задача 8.2.14. Температура пари в конденсаторі турбіни – 50°C, питома втрата теплоти – 0,58 кВт·год. Питома витрата умовного палива в циклі Ренкіна з електрогенератором 12 МВт складає 0,3936 кг/кВт·год. Визначити параметри пари перед турбіною і витрату охолодної води в конденсаторі, якщо її підігрів 20°C.

Задача 8.2.15. Порівняти показники роботи і витрату умовного палива дійсного і теоретичного циклів Ренкіна, якщо витрата охолодної води та її підігрів складають 12000 т/год і 20°C, відповідно, кінцеві параметри: $P_k = 0,035$ бар і $h_k = 2150$ кДж/кг, початкова густина – 6,25 кг/м³; $\eta_{oi} = 0,825$; $\eta_{cm} = 0,96$; $\eta_{ш} = 0,9$.

Задача 8.2.16. Початкові параметри пари в циклі Ренкіна складають: $\rho_0 = 10 \text{ кг/м}^3$; $t_0 = 490^\circ\text{C}$, а витрата пари – 72 т/год. Визначити кінцеві параметри пари, витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів 15 К, а потужність електрогенератора – 15 МВт.

Задача 8.2.17. Початкові параметри пари в циклі Ренкіна складають: $\rho_0 = 8,333 \text{ кг/м}^3$; $t_0 = 510^\circ\text{C}$. Пара розширюється в турбіні з показником політропи $n = 1,184$ до кінцевого тиску 7 кПа. Визначити витрату умовного палива, якщо $\eta_{cm} = 0,96$; $\eta_{ш} = 0,91$, витрата охолодної води 7200 м³/год., а її підігрів – 20°C.

Задача 8.2.18. Ентальпія сухої насиченої пари дорівнює 2600 кДж/кг, а теплота пароутворення – 2230 кДж/кг. Міра сухості пари на виході з турбіни 0,9. Визначити показники роботи і витрату умовного палива в циклі Ренкіна, якщо розширення пари в турбіні здійснюється до п'ятидесятикратного зменшення густини, а потужність електрогенератора – 6 МВт.

Задача 8.2.19. Питома витрата умовного палива в циклі Ренкіна складає $0,34 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$. Визначити початкові параметри і витрату умовного палива, якщо витрата охолодної води становить 20000 т/год , її підігрів в конденсаторі – 20 К , питома витрата теплоти в конденсаторі – $0,576 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, а температура конденсату – 30°C .

Задача 8.2.20. Визначити внутрішній відносний ККД турбіни, витрати умовного палива і охолодної води в циклі Ренкіна з початковими параметрами: $\rho_0 = 16,666 \text{ кг/м}^3$; $t_0 = 530^\circ\text{C}$, якщо необоротні втрати в турбіні складають 150 кДж/кг , кінцевий тиск $0,06 \text{ бар}$, $N_e = 12 \text{ МВт}$; $\eta_{см} = 0,96$; $\eta_{пр} = 0,9$; підігрів охолодної води – 18°C .

Задача 8.2.21. Кінцеві параметри пари на виході з турбіни: $x_k = 0,9$; $\rho_k = 0,05$, а початкова температура 450°C . Пара розширюється в турбіні з показником політропи $n=1,17$. Визначити відносний внутрішній ККД турбіни, витрату умовного палива, якщо витрати охолодної води 10800 т/год , а її підігрів – 20°C ; $\eta_{см} = 0,97$; $\eta_{пр} = 0,91$.

Задача 8.2.22. Кінцева міра сухості пари в турбіні $0,87$, а теплота пароутворення -2384 кДж/кг . Визначити теплоту, яка витрачена на перегрів пари в парогенераторі, витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів 20 К , ентальпія сухої насиченої пари для кінцевого тиску – 2600 кДж/кг , питома витрата пари $-3,6 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$. і загальна витрата пари – 36 кг/с .

Задача 8.2.23. Початкові параметри пари в циклі Ренкіна складають: $t_0 = 450^\circ\text{C}$; $\rho_0 = 10 \text{ кг/м}^3$. Визначити теплоту пароутворення в кінцевій точці, витрату умовного палива і охолодної води, якщо її підігрів 15°C , потужність електрогенератора – 10 МВт , а витрата пари – 36 т/год .

Задача 8.2.24. В парогенераторі генерується суха насичена пара з тиском 1 МПа , яка виконує роботу в турбіні до стократного зменшення тиску. Визначити, як зміняться показники роботи циклу Ренкіна і витрата умовного палива, якщо здійснити перегрів пари на 200°C , за умови $P_k = \text{const}$ і $D_0 = 270 \text{ т/год} = \text{const}$.

Задача 8.2.25. Температура конденсації пари в циклі Ренкіна складає 33°C , а витрата охолодної води та її підігрів 18000 т/год і 20°C , відповідно. При цьому питома витрата теплоти дорівнює $q_k = 0,545 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Визначити початкові параметри пари перед турбіною, витрату умовного палива і пари, якщо питомі витрати умовного палива і пари складають $0,35$ і $0,34 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$, відповідно.

Задача 8.2.26. Параметри пари в парогенераторі складають: $P_0 = 4 \text{ МПа}$; $t_0 = 480^\circ\text{C}$. Визначити, до якого тиску треба дроселювати пару перед турбіною, щоб для кінцевого тиску за турбіною 5 кПа питома витрата умовного палива не перевищувала $0,3647 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$. Визначити також витрату пари, якщо потужність електрогенератора 6 МВт .

Задачі 8.2.27 – 8.2.68. Паротурбінна установка працює з проміжним перегрівом пари. В схемі ПТУ є один регенеративний підігрівник живильної води (рис.8.4). Підігрів охолодної води в конденсаторі турбіни прийняти рівним 17°C . Визначити потужності живильного і циркуляційного насосів за умови, що перепад тиску в останньому дорівнює $0,4\text{ МПа}$. Визначити також витрату умовного палива на ПТУ. Дані для розрахунків вибрати з табл.8.1 згідно з заданим варіантом.

Таблиця 8.1

Варіант	Показники																
	$P_0, \text{МПа}$	$t_0, ^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{к}}, \text{кПа}$	$t_{\text{к}}, ^{\circ}\text{C}$	$x_{\text{к}}$	$q_{\text{к}}, \text{кВт/год}$	x_1	$P_1, \text{бар}$	y_1	$t_{\text{н1}}, ^{\circ}\text{C}$	$\theta = t_{\text{н1}} - t_{\text{жн}}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{жн}}, ^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{нн}}, \text{бар}$	$t_{\text{нн}}, ^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{нн}}, \text{кВт/год}$	$G_{\text{нн}}, \text{тис т/год}$	$N_{\text{е}}, \text{МВт}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	12		4				0,98	1,2				35		530	0,13		100
2		540		33		0,585			0,28			40	30			14	
3	14	540			0,87						50	35		540			110
4		535	5				1					45	25		0,133	8	
5	10			30				1,4			40			540	0,135		150
6		540	5			0,59			0,29			35	26			12	
7	13			35		0,6				110	40				0,127		160
8		520	4		0,88			1,3				35		530		9	
9	11			33		0,585			0,3		45				0,128		100
10		545	5				1			105			28			10	
11	15			40		0,595					30	40		540			200
12			4					1,2				45	30	535	0,13	16	
13		550		33	0,87				0,32		35			530			140
14	12	530	4				0,99					35		540	0,125	7,8	
15		535	5			0,585			0,3			40		520			150
16	13			33							30	50		510	0,133	13,8	
17		530			0,87					110	40		25	520			130
18	10		5				0,98	1,3				40			0,13	14,4	

Продовження таблиці 8.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
19		530		30		0,59			0,29		35			530			160
20	12		4				1			105		35			0,127	10,8	
21	14	540			0,86			1,4			40				0,125		140
22		530		33					0,28			45	26	540		7,2	
23			4			0,6		1,2						530	0,128		200
24	9				0,87		0,99	1,5				50			0,126	19	
25	11	530		30					0,3		45		28	530			180
26		530	5			0,58				110	40				0,127	14,8	
27	15			33			1	1,3				50		540			135
28		530	5		0,88					115		50	26	520		16,2	
29		520		30		0,59			0,285								175
30	12		4					1,4				60		545	0,13	11,36	
31		540		35	0,87				0,28		40		20	540			220
32			5					1,3				55	24	520	0,128	13,6	
33		530		30			0,99			115	35					17,2	
34	10	535			0,88				0,29			50			0,127		110
35				33		0,585					40	45	25	530	0,125	16,4	
36			5				0,98			110	30				0,128		150
37	13	540		30				1,2				50	28	550		15,8	
38		520			0,87				0,285						0,127	17,6	
39	8		5			0,59	0,97				40	45	22		0,125		50
40		530		33				1,4						530		18,4	
41		510	4			0,575			0,27					510	0,13		75

9 ЦИКЛИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

9.1 Приклади розв'язання задач

Задача 9.1. Визначити питому індикаторну витрату палива шестициліндрового чотиритактного ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти, якщо діаметр циліндра і хід поршня 0,082 і 0,11 м, відповідно; швидкість поршня – 10,266 м/с; витрата палива – 16,2 кг/год.; корисна площа індикаторної діаграми $F = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; довжина діаграми $\ell = 200 \text{ мм}$; масштаб тиску діаграми – $m = 1000 \text{ бар/м}$.

Розв'язування

Середній індикаторний тиск, бар

$$P_i = F \cdot m / \ell = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 / 0,2 = 8.$$

Робочий об'єм циліндра, м^3

$$V_{\text{ц}} = \pi \cdot D^2 \cdot S / 4 = 0,785 \cdot D^2 \cdot S = 0,785 \cdot 0,082^2 \cdot 0,11 = 5,8 \cdot 10^{-4}.$$

Кількість обертів колінчастого вала, 1/с

$$n_{\text{в}} = W_{\text{ц}} / (2S) = 10,266 / (2 \cdot 0,11) = 46,666.$$

Індикаторна потужність двигуна, кВт

$$N_i = 2P_i \cdot V_{\text{ц}} \cdot n_{\text{в}} \cdot z \cdot 10^{-3} / \tau = 2 \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 46,666 \cdot 10^{-3} / 4 = 65.$$

Питома індикаторна витрата палива кг/кВт·год

$$b_i = D \cdot 3600 / N_i = 16,2 \cdot 3600 / (3600 \cdot 65) = 0,2492.$$

Задача 9.1.2. Визначити допустиму міру стиску для чотиритактного карбюраторного двигуна і його ефективний ККД, якщо початкові параметри робочого тіла з газовою сталою $R = 0,27 \text{ кДж/(кг·К)}$ складають:

$P_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $t_1 = 17^\circ\text{C}$; діаметр і хід поршня 94,5 і 80 мм, відповідно; кількість циліндрів $z = 4$; кутова швидкість обертання колінчастого вала $\omega = 377 \text{ рад/с}$; механічний ККД – 0,8; витрата палива – 5,4 кг/год.; допустима температура займання паливної суміші – 340°C ; тиск відпрацьованих газів – 0,2 МПа; теплота згорання палива $Q_{\text{п}}^{\text{p}} = 40 \text{ мДж/кг}$. В розрахунках прийняти, що робоче тіло – двоатомні гази, а теплоємності – сталі.

Розв'язування

Допустима міра стиску

$$\varepsilon = v_1 / v_2 = (T_{\text{п}} / T_1)^{(k-1)} = (613 / 290)^{(1,4-1)} = 6,5.$$

Питомий об'єм газів до і після стиску, відповідно, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = 0,27 \cdot 290 / 100 = 0,783$$

$$v_2 = v_1 / \varepsilon = 0,783 / 6,5 = 0,12.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_{\text{т}} = 1 - 1/\varepsilon^{k-1} = 1 - 1/6,5^{(1,4-1)} = 0,527.$$

Температура газів в кінці робочого ходу, К

$$T_4 = T_1 \cdot P_4 / P_1 = 290 \cdot 2 / 1 = 580.$$

Температура газів після згорання робочої суміші, К

$$T_3 = T_4 \cdot \varepsilon^{k-1} = 580 \cdot 6,5^{1,4-1} = 1226.$$

Ізохорна теплоємність робочого тіла, кДж/(кг·К)

$$C_v = R/(k-1) = 0,27/(1,4 - 1) = 0,675.$$

Підведена і відведена теплота в циклі, кДж/кг

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2) = 0,675 (1226 - 613) = 413,77;$$

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1) = 0,675 (580 - 290) = 195,77.$$

Питома робота циклу, кДж/кг

$$\ell_u = q_1 - q_2 = 413,77 - 195,77 = 218.$$

Середньоіндикаторний тиск, кПа

$$P_i = \ell_u / (v_1 - v_2) = 218 / (0,783 - 0,12) = 328,8.$$

Робочий об'єм циліндра, м³

$$V_p = 0,785 \cdot D^2 \cdot S = 0,785 \cdot 0,0945^2 \cdot 0,08 = 5,6 \cdot 10^{-4}.$$

Частота обертання вала, об/с

$$n_b = \omega / (2\pi) = 377 / (2 \cdot 3,14) = 60.$$

Ефективна потужність двигуна, кВт

$$N_e = N_i \cdot \eta_m = 2P_i \cdot V_p \cdot n_b \cdot z \cdot \eta_m / \tau = 2 \cdot 328,8 \cdot 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 4 \cdot 0,8 / 4 = 17,67.$$

Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = N_e / (B \cdot Q_n^p) = 17,67 / (40 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}) = 0,294.$$

Задача 9.1.3. Визначити витрату палива з теплоотою згорання

$Q_n^p = 42,8$ мДж/кг для шестициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо середньоіндикаторний тиск $P_i = 900$ кПа; повний об'єм циліндра $- 7,9 \cdot 10^{-4}$ м³, об'єм камери згорання $V_c = 6,9 \cdot 10^{-5}$ м³, частота обертання вала $n_b = 2200$ об/хв., ефективний ККД $\eta_e = 0,35$; механічний ККД $\eta_m = 0,84$.

Розв'язування

Робочий об'єм циліндра, м³

$$V_p = V_n - V_c = 7,9 \cdot 10^{-4} - 6,9 \cdot 10^{-5} = 7,2 \cdot 10^{-4}.$$

Індикаторний ККД

$$\eta_i = \eta_e / \eta_m = 0,35 / 0,84 = 0,44.$$

Індикаторна потужність двигуна, кВт

$$N_i = 2P_i \cdot V_p \cdot n_b \cdot z / (60 \cdot \tau) = 2 \cdot 9 \cdot 10^2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2200 \cdot 6 / (60 \cdot 4) = 72.$$

Витрата палива, кг/с

$$B = N_i / (\eta_i \cdot Q_n^p) = 72 / (0,44 \cdot 42,8 \cdot 10^3) = 3,82 \cdot 10^{-3}.$$

Задача 9.1.4. Визначити ефективну потужність і ефективну витрату палива для восьмициліндрового дизельного двигуна, якщо відомо: газова стала робочого тіла $R = 0,245$ кДж/(кг·К); $k = 1,635$; $Q_n^p = 30$ мДж/кг;

$\eta_e = 0,32$; $\eta_m = 0,82$; хід поршня $S = 100$ мм; $P_1 = 0,1$ Мпа; $t_1 = 27^\circ\text{C}$;

$T_3 = 1700$ К; $P_4 = 280$ кПа; теплоємності - сталі, $W_n = 6,4$ м/с; $V_{\kappa\kappa} = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м³.

Розв'язування

Ізохорна теплоємність робочого тіла, кДж/(кг·К)

$$C_v = R/(k - 1) = 0,245/(1,35 - 1) = 0,7.$$

Температура газів після робочого ходу поршня, К

$$T_4 = T_1 \cdot P_4/P_1 = 300 \cdot 2,8/1 = 840.$$

Міра попереднього розширення

$$\rho = (T_4/T_1)^{1/k} = (840/300)^{1/1,35} = 2,14.$$

Міра адіабатного стиску

$$\varepsilon = (T_3/T_4)^{1/k-1} = (840/300)^{1/0,35} \cdot 2,14 = 16.$$

Робочий об'єм циліндра, м³

$$V_p = V_{\kappa}(\varepsilon - 1) = 1,2 \cdot 10^{-4}(16 - 1) = 1,8 \cdot 10^{-3}$$

Частота обертання вала, 1/с

$$n_b = W_n/(2S) = 6,4/(2 \cdot 0,1) = 32.$$

Питома робота циклу, кДж/кг

$$\ell_{\kappa} = q_1 - q_2 = k \cdot C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1) = C_v \cdot T_1[k \cdot \varepsilon^{k-1}(\rho - 1) - (\rho^k - 1)] =$$

$$= 0,7 \cdot 300[1,35 \cdot 16^{0,35}(2,14 - 1) - (2,14^{1,35} - 1)] = 477.$$

Початковий питоми об'єм, м³/кг

$$v_1 = R \cdot T_1/P_1 = 0,245 \cdot 300/100 = 0,735.$$

Середній ефективний тиск в циклі, кПа

$$P_e = P_1 \cdot \eta_m = \ell_{\kappa}/(v_1 - v_2) = \ell_{\kappa} \cdot \eta_m/[v_1(1 - 1/\varepsilon)] = 477 \cdot 0,82/[0,735(1 - 1/16)] = 567,6.$$

Ефективна потужність двигуна, кВт

$$N_e = 2P_e \cdot V_p \cdot n_b \cdot z/\tau = 2 \cdot 567,6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 8/4 = 130,7.$$

Ефективна витрата палива, кг/с

$$B_e = N_e/(Q_{\kappa}^p \cdot \eta_e) = 130,7/(30 \cdot 10^3 \cdot 0,32) = 0,0133.$$

Задача 9.1.5. Для шестициліндрового чотиритактного ДВЗ, який працює зі змішаним підведенням теплоти (рис.9.1), визначити термічний ККД, індикаторний ККД та індикаторну потужність, якщо відомо:

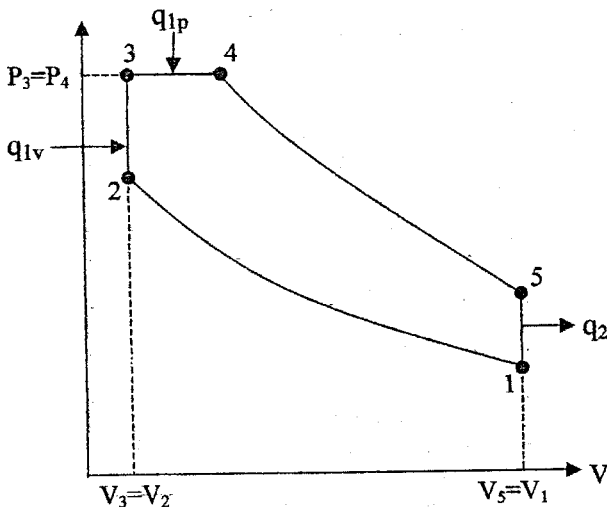


Рисунок 9.1.

$R = 0,26 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $k = 1,37$; $P_1 = 0,1 \text{ Мпа}$; $t_1 = 17^\circ\text{C}$; $P_3 = 2 \text{ бар}$; $D = 100 \text{ мм}$;
 $S = 90 \text{ мм}$; $q_{1p} = 400 \text{ кДж}/\text{кг}$; $P_5 = 2,6 \text{ бар}$; $\omega = 188,4 \text{ рад}/\text{с}$; $V = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
 $Q_{\text{н}}^p = 34 \text{ МДж}/\text{кг}$. Теплоємності робочого тіла вважати сталими.

Розв'язування

Ізохорна теплоємність робочого тіла, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

$$C_v = R/(k-1) = 0,26/(1,37-1) = 0,7.$$

Початковий питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = 0,26 \cdot 290 / 100 = 0,754.$$

Температура робочого тіла в кінці робочого ходу, К

$$T_5 = P_5 \cdot v_5 / R = 260 \cdot 0,754 / 0,26 = 754.$$

Температура газів в точці 4, К

$$T_4 = T_5 (P_4 / P_5)^{(k-1)/k} = 754(26/2,6)^{0,37/1,37} = 1403,4.$$

Температура газів після ізохорного підведення теплоти, К

$$T_3 = T_4 - q_{1p} / C_p = T_4 - q_{1p} / (k \cdot C_v) = 1403,4 - 400 / (1,37 \cdot 0,7) = 986.$$

Міра попереднього розширення

$$\rho = T_4 / T_3 = 1403,4 / 986 = 1,42.$$

Міра розширення (стиску)

$$\varepsilon = (T_4 / T_5)^{1/(k-1)} = (1403,4 / 754)^{1/(1,37-1)} = 7,6.$$

Зміна об'єму в процесі стиску, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_1 - v_2 = \Delta v_{12} = v_1(1 - 1/\varepsilon) = 0,754(1 - 1/7,6) = 0,654.$$

Температура після стиску, К

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 290 \cdot 7,6^{1,37-1} = 614.$$

Ізохорно підведена теплота, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$Q_{1v} = C_v (T_2 - T_1) = 0,7(986 - 614) = 260.$$

Загальна теплота, що підведена в циклі, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$q_1 = q_{1v} + q_{1p} = 260 + 400 = 660.$$

Теплота, яка відводиться в циклі, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$q_2 = C_v (T_5 - T_1) = 0,7(754 - 290) = 324,8.$$

Теоретична робота циклу, $\text{кДж}/\text{кг}$

$$\ell_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = 660 - 324,8 = 335,2.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = 1 - 335,2 / 660 = 0,492.$$

Середній індикаторний тиск, кПа

$$P_i = \ell_{\text{ц}} / \Delta v_{12} = 335,2 / 0,654 = 512,5.$$

Частота обертання вала, $1/\text{с}$

$$n_a = \omega / 2\pi = 188,4 / (2 \cdot 3,14) = 30.$$

Робочий об'єм циліндра, м^3

$$V_p = 0,785 \cdot D^2 \cdot S = 0,785 \cdot 0,1^2 \cdot 0,09 = 0,706 \cdot 10^{-3}$$

Індикаторна потужність двигуна, кВт

$$N_i = 2 P_i \cdot V_p \cdot n_a \cdot z / \tau = 2 \cdot 512,5 \cdot 0,706 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 6 / 4 = 32,56.$$

Індикаторний ККД двигуна

$$\eta_i = N_i / (B \cdot Q_{\text{н}}^p) = 32,56 / (2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 34 \cdot 10^3) = 0,383.$$

Задача 9.1.6. Визначити параметри і витрату умовного палива в комбінованому циклі ДВЗ з газотурбінним наддувом (рис.9.2). В розрахунках прийняти: робоче тіло – повітря; $P_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 20^\circ\text{C}$; $\beta = P_2/P_1 = 2,6$; $\varepsilon = v_2/v_3 = 7$; $\lambda = P_4/P_3 = 2$; теплоємності робочого тіла вважати сталими; $N_{\text{ДВЗ}} = 50$ кВт.

Розв'язування

Питомий об'єм повітря на вході в компресор, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = 0,287 \cdot 293 / 100 = 0,841.$$

Тиск повітря за компресором, кПа

$$P_1 = P_2 \cdot \beta = 100 \cdot 2,6 = 260.$$

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{(k-1)/k} = 293 \cdot 2,6^{(1,4-1)/1,4} = 385.$$

Питомий об'єм повітря за компресором, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_2 = R \cdot T_2 / P_2 = 0,287 \cdot 385 / 260 = 0,425 = v_3.$$

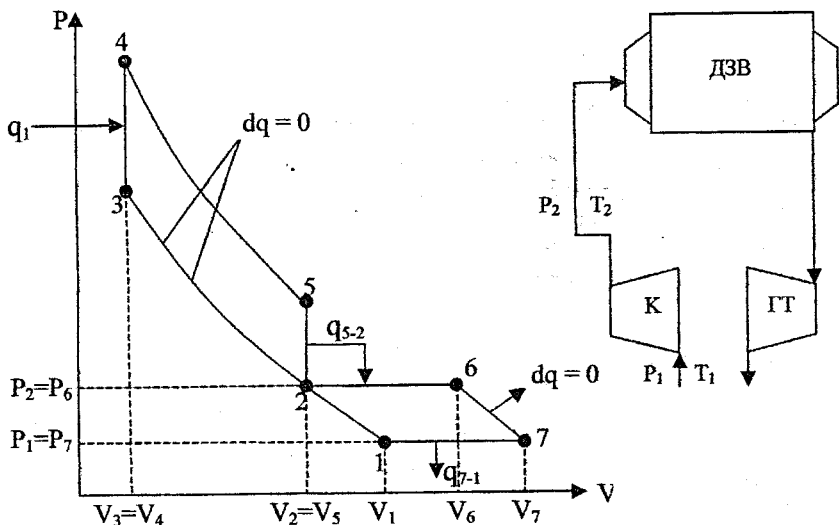


Рисунок 9.2 - Термодинамічний цикл ДВЗ з турбонаддувом на P-v-діаграмі та його принципова схема: ГТ – газова турбіна; К – компресор.

Параметри робочого тіла в точці 3:

питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_3 = v_2 / \varepsilon = 0,425 / 7 = 0,0607 = v_4;$$

температура, К

$$T_3 = T_2 \cdot \varepsilon^{k-1} = 385 \cdot 7^{1,4-1} = 838,5;$$

тиск, кПа

$$P_3 = R \cdot T_3 / v_3 = 0,287 \cdot 838,5 / 0,0607 = 3964.$$

Параметри робочого тіла в точці 4:

тиск, кПа

$$P_4 = P_3 \cdot \lambda = 3964 \cdot 2 = 7928;$$

температура, К

$$T_4 = T_3 \cdot \lambda = 838,5 \cdot 2 = 1677.$$

Параметри робочого тіла в точці 5:

тиск, кПа

$$P_5 = P_4 / (v_5/v_4)^k = P_4 / (v_2/v_3)^k = 7928 / (0,425/0,0607)^{1,4} = 520;$$

температура, К

$$T_5 = T_4 / (v_5/v_4)^{k-1} = 1677 / (0,425/0,0607)^{1,4-1} = 770.$$

Теплоємності робочого тіла, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / (k-1) = 0,287 / (1,4-1) = 0,7175$$

$$C_p = c_v \cdot k = 0,7175 \cdot 1,4 \approx 1.$$

Теплота, що підведена в циклі, кДж/кг

$$q_1 = q_{3-4} = c_v(T_4 - T_3) = 0,7175(1677 - 838,5) = 601,6.$$

Теплота, яка підведена до газової турбіни, кДж/кг

$$q_{5-2} = c_v(T_5 - T_2) = 0,7175(770 - 385) = 276.$$

Температура робочого тіла на вході в газову турбіну, К

$$T_6 = T_2 + q_{2-5}/c_p = 385 + 276/1 = 661.$$

Питомий об'єм в точці 6, м³/кг

$$v_6 = v_2(T_6/T_2) = 0,425(661/385) = 0,73.$$

Температура газів на виході з газової турбіни, К

$$T_7 = T_6 / \beta^{(k-1)/k} = 661 / 2,6^{(1,4-1)/1,4} = 503,1.$$

Теплота, яка відведена з циклу, кДж/кг

$$q_2 = q_{7-1} = C_p(T_7 - T_1) = 1(503,1 - 293) = 210,1.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - 210,1/601,6 = 0,65.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кВт·год

$$b_y = 0,123/\eta_t = 0,123/0,65 = 0,189.$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$B_y = b_y \cdot N_{двз}/3,6 = 0,189 \cdot 50/3600 = 1,575 \cdot 10^{-3}.$$

Витрата робочого тіла, кг/с

$$G = N_{двз}/(q_1 - q_2) = 50/(601,6 - 210,1) = 0,128.$$

9.2 Завдання для самостійної роботи

В процесі розв'язування задач вважати, що робочим тілом є повітря, а теплоємності мають сталі значення.

Задача 9.2.1. Визначити термічний ККД, теоретичну потужність і робочий об'єм циліндра чотирициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо $P_1 = 0,1$ МПа; $T_1 = 290$ К; $\epsilon = 17$; $T_3 = 1700$ К; підведена теп-

лота $Q = 640000$ кДж/год; $\omega = 167,466$ рад/с. Визначити також літрову потужність (потужність ведвессну до 1 л робочого об'єму циліндра).

Задача 9.2.2. Чотирициліндровий двотактний дизельний двигун з циліндрами діаметром $D = 108$ мм і ходом поршня 127 мм використовується для привода компресора, який стискає 450 м³/год. повітря з параметрами $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до тиску 3 МПа. Визначити витрату умовного палива, якщо середньоіндикаторний тиск складає 720 кПа, швидкість поршня $8,5$ м/с; ККД компресора $- 0,75$; механічний ККД дизеля $- 0,85$.

Задача 9.2.3. Визначити термічний ККД, теоретичну потужність чотиритактного чотирициліндрового карбюраторного двигуна, якщо: $P_1 = 0,105$ МПа, $t_1 = 10^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 6$; $n = 720$ об/хв.; витрата робочого палива складає $0,1$ кг на 1 кг робочого тіла; $Q_n^p = 34$ мДж/кг.

Задача 9.2.4. Визначити термічний ККД і витрату умовного палива в чотирициліндровому чотиритактному дизельному двигуні з характеристиками $D = 105$ мм; $S = 125$ мм, якщо: швидкість поршня 6 м/с; $P_1 = 1$ бар; $t_1 = 17^\circ\text{C}$; $P_3 = 5,2$ МПа; $P_4 = 0,35$ МПа.

Задача 9.2.5. Для циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти і характеристиками: $D = 0,12$ м; $S = 0,14$ м визначити термічний ККД і витрату палива з теплою згорання $Q_n^p = 40$ мДж/кг; якщо кількість циліндрів $- 6$; кількість тактів $- 4$; $P_1 = 740$ мм.рт.ст., $\rho_1 = 1,125$ кг/м³; $P_3 = 5$ МПа; $P_5 = 0,25$ МПа; теплота, що підведена в ізобарному процесі 400 кДж/кг.

Задача 9.2.6. Визначити витрату робочого тіла в чотиритактному вісьмициліндровому карбюраторному ДВЗ, якщо повний об'єм циліндра $- 7,9 \cdot 10^{-4}$ м³, об'єм камери згорання $- 7 \cdot 10^{-5}$ м³, $\omega = 251,2$ рад/с; початковий питомий об'єм $- 0,825$ м³/кг.

Задача 9.2.7. Визначити індикаторну та ефективну потужність вісьмициліндрового чотиритактного карбюраторного ДВЗ, якщо: $P_1 = 0,75$ МПа; $D = 110$ мм; $S = 100$ мм; $\omega = 108$ рад/с; механічний ККД $- 0,8$.

Задача 9.2.8. Визначити ефективну потужність і питому ефективну витрату палива в шестициліндровому дизельному ДВЗ, якщо: $P_1 = 0,85$ МПа; $\varepsilon = 16,7$; об'єм камери згорання $- 12 \cdot 10^{-5}$ м³; $\omega = 220$ рад/с; $\eta_m = 0,8$; витрата палива $- 0,0105$ кг/с.

Задача 9.2.9. Визначити питому витрату умовного палива в шестициліндровому чотиритактному дизельному ДВЗ, якщо: $P_e = 0,75$ МПа, повний об'єм циліндра $- 7,9 \cdot 10^{-4}$ м³, об'єм камери згорання $- 6,9 \cdot 10^{-5}$ м³; $W_n = 6$ м/с; витрата палива $- 4,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $\eta_m = 0,82$.

Задача 9.2.10. Визначити середньоіндикаторний тиск та індикаторну потужність чотирициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $N_e = 100$ кВт; $\omega = 157$ рад/с; $\varepsilon = 15$; об'єм камери згорання $- 2,5 \cdot 10^{-4}$ м³; $\eta_m = 0,84$.

Задача 9.2.11. Визначити індикаторну потужність і питому індикаторну витрату палива в шестициліндровому чотиритактному дизельному ДВЗ, якщо $P_e = 0,62$ МПа; $D = 0,11$ м; $S = 120$ мм; $W_n = 8,2$ м/с; $\eta_m = 0,82$; витрата палива $- 5,55 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Задача 9.2.12. Визначити діаметр циліндра і хід поршня чотирициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо $N_e = 80$ кВт; $P_e = 0,6$ МПа; $n = 1800$ об/хв.; $W_n = 9,6$ м/с; $S/D = 1,185$.

Задача 9.2.13. Визначити потужність механічних втрат шестициліндрового чотиритактного карбюраторного ДВЗ, якщо: $P_i = 0,75$ МПа; $D = 110$ мм; $S = 100$ мм; $\omega = 314$ рад/с; $\eta_m = 0,825$.

Задача 9.2.14. Визначити індикаторну потужність і потужність механічних втрат шестициліндрового двотактного дизельного ДВЗ, якщо: $P_e = 0,65$ МПа $\epsilon = 16$; об'єм камери згорання $- 7,8 \cdot 10^{-3}$ м³; $W_n = 9$ м/с; $S = 0,14$ м; $\eta_m = 0,83$.

Задача 9.2.15. Визначити середньоіндикаторний тиск і середнє значення тиску механічних втрат восьмициліндрового карбюраторного ДВЗ, якщо: $D = S = 0,1$ м; $N_e = 150$ кВт; $W_n = 11$ м/с; $\eta_m = 0,81$.

Задача 9.2.16. Визначити ефективну потужність і питому ефективну витрату палива у восьмициліндровому чотиритактному карбюраторному ДВЗ, якщо: індикаторна робота за цикл $- 650$ кДж; $D = 100$ мм; $S = 110$ мм; $n = 1200$ об/с; $\eta_m = 0,83$; витрата палива $- 36,0$ кг/год.

Задача 9.2.17. Визначити питомі індикаторну і ефективну витрати палива чотирициліндрового дизельного ДВЗ, якщо: $P_i = 0,68$ МПа; $\epsilon = 15,5$; повний об'єм циліндра $- 38 \cdot 10^{-4}$ м³; $\omega = 157$ рад/с; $\eta_m = 0,835$; витрата палива $21,6$ кг/год.

Задача 9.2.18. Визначити ефективну потужність і потужність механічних втрат шестициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $P_e = 0,55$ МПа; $D = 110$ мм; $S = 120$ мм; $W_n = 8,5$ м/с; $\eta_m = 0,81$.

Задача 9.2.19. Визначити середній індикаторний тиск та індикаторну потужність шестициліндрового чотирикратного дизельного ДВЗ, якщо: $D = S = 150$ мм; $n = 1400$ об/хв.; площа індикаторної діаграми $2 \cdot 10^{-3}$ м²; довжина діаграми $- 0,15$ м, масштаб діаграми $- 6 \cdot 10^7$ Па/м.

Задача 9.2.20. Визначити індикаторну потужність і потужність механічних втрат чотирициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $\epsilon = 17$; повний об'єм циліндра $- 1,2 \cdot 10^{-3}$ м³; $\omega = 157$ рад/с; $\eta_m = 0,82$; індикаторна діаграма з масштабом $0,8 \cdot 10^8$ Па/м має довжину 200 мм і площу $1,8 \cdot 10^{-3}$ м².

Задача 9.2.21. Визначити середньоєфективний тиск і середній тиск механічних втрат двоциліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $N_e = 18$ кВт; $D = 105$ мм; $S = 120$ мм; $n = 1800$ об/хв.; $\eta_m = 0,8$.

Задача 9.2.22. Визначити ефективну потужність і механічний ККД шестициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $P_e = 0,7$ МПа; повний об'єм циліндра $8 \cdot 10^{-4}$ м³; об'єм камери згорання $7 \cdot 10^{-5}$ м³; $n = 1900$ об/хв.; потужність механічних втрат $- 15$ кВт.

Задача 9.2.23. Визначити середню швидкість поршня і міру стиску чотирициліндрового чотиритактного карбюраторного ДВЗ, якщо:

$N_e = 52 \text{ кВт}$; $P_e = 0,6 \text{ МПа}$; $S = 100 \text{ мм}$; $W_n = 6,6 \text{ м/с}$; об'єм камери згорання 10^{-4} м^3 .

Задача 9.2.24. Визначити кутову швидкість обертання колінчастого вала і міру стиску в шестициліндровому чотиритактному карбюраторному ДВЗ, якщо: $N_e = 65 \text{ кВт}$; $P_e = 0,62 \text{ МПа}$; $n = 2800 \text{ об/хв.}$; повний об'єм циліндра $- 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Задача 9.2.25. Визначити індикаторну потужність і механічний ККД шестициліндрового чотиритактного карбюраторного ДВЗ, якщо: $P_i = 0,7 \text{ МПа}$; $D = S = 100 \text{ мм}$; $W_n = 9,2 \text{ м/с}$; потужність механічних втрат $- 24 \text{ кВт}$.

Задача 9.2.26. Визначити літраж і питому ефективну витрату палива в шестициліндровому чотиритактному карбюраторному ДВЗ, якщо: $P_e = 0,6 \text{ МПа}$; $\omega = 314 \text{ рад/с}$; витрата палива $- 13,8 \text{ кг/год}$.

Задача 9.2.27. Визначити витрату палива в чотирициліндровому чотиритактному дизельному ДВЗ, якщо: $P_i = 0,68 \text{ МПа}$; $n = 2500 \text{ об/хв.}$; $\epsilon = 16$; об'єм камери згорання $- 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; $\eta_m = 0,83$; питома витрата палива $- 0,185 \text{ кг/кВт-год}$.

Задача 9.2.28. Визначити витрату палива в чотирициліндровому чотиритактному карбюраторному ДВЗ, якщо: $P_i = 0,65 \text{ МПа}$; $D = 90 \text{ мм}$; $S = 110 \text{ мм}$; $W_n = 10 \text{ м/с}$; $\eta_m = 0,84$; $b_e = 0,28 \text{ кг/кВт-год}$.

Задача 9.2.29. Визначити літрову потужність і питому індикаторну витрату палива в шестициліндровому чотиритактному карбюраторному ДВЗ, якщо: $P_i = 0,75 \text{ МПа}$; $D = S = 120 \text{ мм}$; $\omega = 336 \text{ рад/с}$; $\eta_m = 0,82$; витрата палива $- 43,2 \text{ кг/год}$.

Задача 9.2.30. Визначити частоту обертання колінчастого вала і питому ефективну витрату палива в чотирициліндровому чотиритактному дизельному ДВЗ, якщо: $N_e = 100 \text{ кВт}$; $P_e = 0,6 \text{ МПа}$; $\epsilon = 13$; об'єм камери згорання $- 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; витрата палива $- 23,4 \text{ кг/год}$.

Задача 9.2.31. Визначити ефективний ККД шестициліндрового чотиритактного карбюраторного ДВЗ, якщо: $P_e = 0,6 \text{ МПа}$; $D = S = 90 \text{ мм}$; $W_n = 8,4 \text{ м/с}$; витрата палива $- 16 \text{ кг/год.}$; $Q_n^p = 43 \text{ МДж/кг}$.

Задача 9.2.32. Визначити індикаторний і механічний ККД чотирициліндрового чотиритактного дизельного ДВЗ, якщо: $P_i = 0,68 \text{ МПа}$; $\omega = 157 \text{ рад/с}$; $\epsilon = 16$; об'єм камери згорання $- 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; витрата палива $- 22 \text{ кг/год.}$; $Q_n^p = 42 \text{ МДж/кг}$.

Задача 9.2.33. Визначити індикаторний ККД шестициліндрового двотактного дизельного ДВЗ, якщо: $P_e = 0,64 \text{ МПа}$; $\epsilon = 16$; об'єм камери згорання $- 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$; $n = 2200 \text{ об/хв.}$; потужність механічних втрат $- 30 \text{ кВт}$; витрата палива $- 38 \text{ кг/год.}$; $Q_n^p = 41,8 \text{ МДж/кг}$.

Задача 9.2.34. Визначити витрату палива у восьмициліндровому чотиритактному карбюраторному двигуні, якщо: $P_e = 0,7 \text{ МПа}$; повний об'єм циліндра $- 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; об'єм камери згорання $- 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$; $\omega = 314 \text{ рад/с}$; $Q_n^p = 44 \text{ МДж/кг}$; $\eta_e = 0,3$.

Задача 9.2.35. Визначити витрату умовного палива в циклі карбюраторного ДВЗ, якщо: $t_1=30^\circ\text{C}$; $\varepsilon=6$; підведена теплота – 1000 кДж/кг; теоретична потужність – 60 кВт.

Задача 9.2.36. Визначити показники роботи циклу ДВЗ з комбінованим підведенням теплоти, якщо: $t_1=20^\circ\text{C}$; $\varepsilon=5$; $t_3=650^\circ\text{C}$; $t_5=450^\circ\text{C}$; $N_T=50\text{кВт}$.

Задача 9.2.37. Визначити показники роботи циклу ДВЗ з комбінованим підведенням теплоти, якщо: $P_1=740\text{ мм.рт.ст.}$; $t_1=30^\circ\text{C}$; $\varepsilon=9$; $P_3=4\text{ МПа}$; загальна теплота, що підведена в циклі 1000 кДж/кг; $N_T=38\text{ кВт}$.

Задача 9.2.38. Визначити витрату умовного палива в чотирициліндровому чотиритактному дизельному ДВЗ, якщо: $t_1=30^\circ\text{C}$; $t_2=580^\circ\text{C}$; $t_4=300^\circ\text{C}$; $D=110\text{ мм}$; $S=125\text{ мм}$; $W_n=9\text{ м/с}$.

Задача 9.2.39. Порівняти термічні ККД і питомі витрати умовного палива в циклах ДВЗ з ізохорним та ізобарним підведенням теплоти, якщо: $P_1=755\text{ мм.рт.ст.}$; $\rho_1=1,25\text{ кг/м}^3$; $\varepsilon=8$; $q_{iv}=q_{ip}=1050\text{ кДж/кг}$.

Задача 9.2.40. Визначити показники роботи і питому витрату умовного палива в циклі ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти, якщо: $P_1=730\text{ мм.рт.ст.}$; $t_1=27^\circ\text{C}$; $\varepsilon=8$; $P_3=3,5\text{ МПа}$; $P_5=0,35\text{ МПа}$.

Задача 9.2.41. Визначити показники роботи циклу карбюраторного ДВЗ і витрату умовного палива, якщо: $P_1=755\text{ мм.рт.ст.}$; $\rho_1=1,15\text{ кг/м}^3$; $T_4=387^\circ\text{C}$; $P_3=4\text{ МПа}$; теоретична потужність $N_T=42\text{ кВт}$.

10 ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН І ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

10.1 Приклади розв'язання задач

Задача 10.1.1. Визначити холодильний і ексергетичний ККД, потужності компресора і детандера повітряної холодильної машини (рис.10.1), якщо відомо: витрата повітря $V=7200\text{ м}^3/\text{год.}$; параметри навколишнього середовища $B=755\text{ мм.рт.ст.}$; $v_{nc}=0,833\text{ м}^3/\text{кг}$; температура повітря в холодильній камері (-13°C); величина недогріву в холодильній камері та газоохолоднику $\theta=5^\circ\text{C}$; холодовидатність $Q_o=120\text{ кВт}$; ККД компресора і детандера 0,84 і 0,86, відповідно.

Розв'язування

Атмосферний тиск, кПа

$$P_{nc} = (B/750) 100 = (755/750) 100 = 101.$$

Температура навколишнього повітря, К

$$T_{nc} = P_{nc} v_{nc} / R = 101 \cdot 0,833 / 0,287 = 290.$$

Масова витрата повітря, кг/с

$$G = V / (v_{nc} \cdot 3600) = 7200 / (0,833 \cdot 3600) = 2,4.$$

Питома холодовидатність, кДж/кг

$$q_o = Q / (G C_p) = 120 / (2,4 \cdot 1) = 50.$$

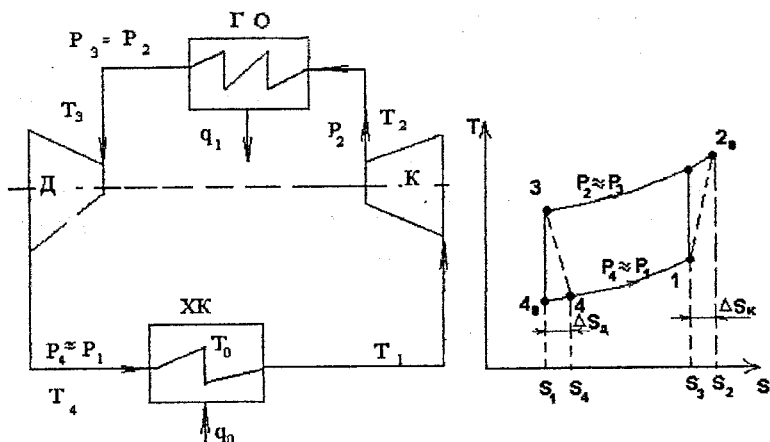


Рисунок 10.1 – Схема і цикл повітряної холодильної машини на T-S діаграмі: ХК – холодильна камера; К – компресор; ГО – газоохолодник; Д - детандер.

Температури повітря на виході з газоохолодника і холодильної камери відповідно, К

$$T_3 = T_{nc} + \theta = 290 + 5 = 295$$

$$T_1 = T_o - \theta = 260 - 5 = 255.$$

Температура повітря на виході з детандера, К

$$T_4 = T_1 - q_o / C_p = 255 - 50 / 1 = 205.$$

Питома робота в детандері, кДж/кг

$$\ell_d = C_p(T_3 - T_4) = 1 (295 - 205) = 90.$$

Міра зменшення тиску в детандері

$$\lambda = (T_3 / T_4)^{k/(k-1)} = (295 / 205)^{1,4/(1,4-1)} = 3,57.$$

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1 [1 + (\lambda^{(k-1)/k} - 1) / \eta_k] = 255 [1 + (3,57^{(1,4-1)/1,4}) / 0,84] = 388.$$

Питома робота компресора, кДж/кг

$$\ell_k = C_p(T_2 - T_1) = 1 (388 - 255) = 133.$$

Потужність детандера і компресора, кВт

$$N_d = G \ell_d = 2,4 \cdot 90 = 216$$

$$N_k = G \ell_k = 2,4 \cdot 133 = 319.$$

Питома робота циклу, кДж/кг

$$\ell_{\pi} = \ell_k - \ell_d = 133 - 90 = 43.$$

Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = q_o / \ell_{\pi} = 50 / 43 = 1,163.$$

Питома теплота, яка відведена в газоохолоднику. КДж/кг

$$q_1 = q_o + \ell_{\pi} = 50 + 43 = 93.$$

Питома ексергія підведеної теплоти, кДж/кг

$$e_{xqo} = q_o (T_{nc} / T_o - 1) = 50 (290 / 260 - 1) = 5,77.$$

Ексергетичний ККД холодильної машини

$$\eta_e = e_{xqo} / \ell_{\text{ц}} = 5,77/43 = 0,134.$$

Задача 10.1.2. Визначити потужність компресора, холодильний коефіцієнт, ексергетичні втрати і ексергетичний ККД холодильної машини, робочим тілом якої є хладон R12, якщо холодовидатність $Q_o = 214 \text{ кВт}$; температура в холодильній камері -25°C ; температура навколишнього середовища 25°C ; величина недогріву в конденсаторі та випарнику $\theta = 5^\circ\text{C}$; ефективний ККД компресора 0,8 (рис.10.2).

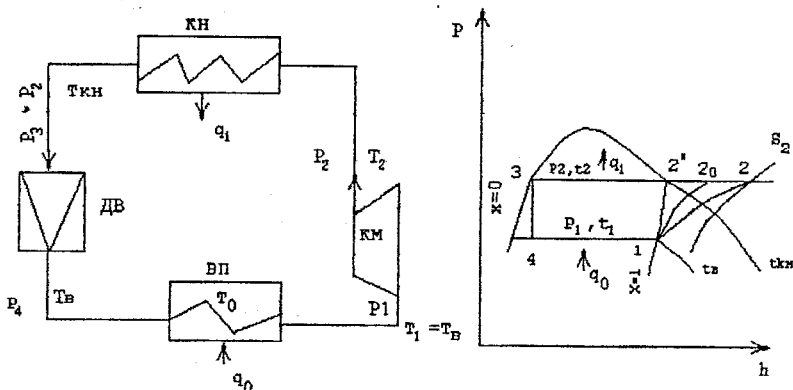


Рисунок 10.2 – Схема парокомпресійної холодильної машини та її цикл на Р-*h* діаграмі: КМ – компресор; ВП – випарник; ДВ – дросельний вентиль; КН – конденсатор.

Розв'язування

Температура випаровування і конденсації, відповідно, $^\circ\text{C}$

$$t_v = t_o - \theta = -25 - 5 = -30.$$

$$t_{\text{кн}} = t_{\text{нс}} + \theta = 25 + 5 = 30$$

Будуємо цикл холодильної машини на Р-*h* діаграмі. На перетині ізотерм t_v і $t_{\text{кн}}$ з лінією $x = 1$ визначаємо точки 1 і 2''. Точку 3 визначаємо на перетині ізобари (ізотерми $t_{\text{кн}}$) з лінією $x = 0$. Точку 4 визначаємо на перетині ізобари (ізотерми t_v) з ізоентальпією h_4 . Точку 2_о, яка характеризує стан робочого тіла після стиску в теоретичному (адіабатному) компресорі визначаємо на перетині ізобари P_2 з ізоентропою S_1 . Запишемо параметри в характерних точках циклу:

$P_1 = 950 \text{ кПа};$	$h_1 = 537 \text{ кДж/кг};$	$S_1 = 4,48 \text{ кДж/(кг К)};$
$P_2 = 0,75 \text{ МПа};$	$h_{2o} = 575 \text{ кДж/кг};$	$S_{2o} = 4,48 \text{ кДж/(кг К)};$
$P_3 = 0,75 \text{ МПа};$	$h_3 = 430 \text{ кДж/кг};$	$S_3 = 4,1 \text{ кДж/(кг К)};$
$P_4 = 950 \text{ кПа};$	$h_4 = 430 \text{ кДж/кг};$	$S_4 = 4,125 \text{ кДж/(кг К)}.$

Питома робота компресора, кДж/кг

$$\ell_{\text{км}} = (h_{2o} - h_1) / \eta_{\text{км}} = (575 - 537) / 0,8 = 47,5.$$

Ентальпія пари за компресором, кДж/кг

$$h_2 = h_1 + \ell_{\text{км}} = 537 + 47,5 = 584,5.$$

Точку 2 визначаємо на перетині ізобари P_2 з ізоентальпою h_2 . Ентропія в точці 2: $S_2 = 4,51$ кДж/(кг К).

Питома холодовидатність машини, кДж/кг

$$q_0 = h_1 - h_4 = 537 - 430 = 107.$$

Масова витрата холодоагента, кг/с

$$G = Q_0/q_0 = 214/107 = 2.$$

Потужність компресора, кВт

$$N_{\text{км}} = G \ell_{\text{км}} = 2 \cdot 47,5 = 95.$$

Питома теплота, що відводиться з конденсатора

$$q_1 = h_2 - h_3 = q_0 + \ell_{\text{км}} = 107 + 47,5 = 154,5.$$

Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = q_0/\ell_{\text{км}} = 107/47,5 = 2,25.$$

Ексергетичний ККД циклу холодильної машини

$$\eta_e = (T_{\text{нс}}/T_{\text{в}} - 1) \varepsilon = (298/243 - 1) 2,25 = 0,509.$$

Питомі втрати ексергії, кДж/кг:

в компресорі

$$\Delta e_{\text{хкм}}^{\text{ет}} = T_{\text{нс}} (S_2 - S_1) = 298 (4,51 - 4,48) = 8,94;$$

в конденсаторі

$$\Delta e_{\text{хкн}}^{\text{ет}} = q_1 - T_{\text{нс}} (S_2 - S_3) = 145,5 - 298 (4,51 - 4,1) = 5,6;$$

в процесі дроселювання

$$\Delta e_{\text{хдр}}^{\text{ет}} = T_{\text{нс}} (S_4 - S_3) = 298 (4,125 - 4,1) = 7,46;$$

в холодильній камері (випарнику)

$$\Delta e_{\text{хв}}^{\text{ет}} = T_{\text{нс}} (S_1 - S_2) - q_0 = 298 (4,48 - 4,125) - 107 = 1,21.$$

Загальні ексергетичні втрати

$$\Sigma \Delta e_x^{\text{ет}} = \Delta e_{\text{хкм}}^{\text{ет}} + \Delta e_{\text{хкн}}^{\text{ет}} + \Delta e_{\text{хдр}}^{\text{ет}} + \Delta e_{\text{хв}}^{\text{ет}} = 8,94 + 5,6 + 7,45 + 1,21 = 23,21.$$

Перевіряємо значення η_e

$$\eta_e = 1 - \Sigma \Delta e_x^{\text{ет}} / \ell_{\text{к}} = 1 - 23,21/47,5 = 0,51.$$

Задача 10.1.3. Потужність системи опалення і гарячого водопостачання (теплофікації) промислового підприємства складає 5 МВт. На підприємстві є стічні води з витратою 330 м³/год. і температурою 30°C, які охолоджуються і циркулюють в системі оборотного технічного водопостачання. В зв'язку з цим запропоновано теплопостачання підприємства здійснювати за допомогою теплонасосної установки (ТНУ). Визначити доцільність застосування аміачної ТНУ в порівнянні з водогрійною котельною. В розрахунках прийняти: величини недогріву в конденсаторі та випарнику

ТНУ (рис.10.3) $\theta = 5^\circ\text{C}$; температуру гарячої води в системі теплофікації $t_{\text{гв}} = 75^\circ\text{C}$; ККД компресора $\eta_{\text{км}} = 0,84$; ККД нетто котельні $0,84$; електро-механічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,965$; ККД електростанцій в енергосистемі $0,35$; ККД електромереж $0,9$; охолодження стічної води у випарнику 10°C ; температура навколишнього середовища 18°C .

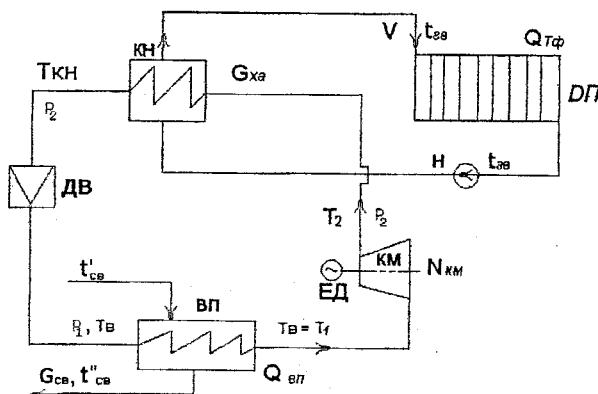


Рисунок 10.3 – Схема ТНУ: ОП – опалювальні пристрої; Н – насос; ЕД – електродвигун. Інші позначення див. на рис.10.2.

Розв'язування

Температура стічної води на виході з випарника, $^\circ\text{C}$

$$t'_{\text{св}} = t'_{\text{св}} - \Delta t_{\text{н}} = 30 - 10 = 20.$$

Температура холодоагенту у випарнику і конденсаторі, відповідно, $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{н}} = t'_{\text{ов}} - \theta = 20 - 5 = 15$$

$$t_{\text{кн}} = t_{\text{гв}} + \theta = 75 + 5 = 80.$$

За аналогією з попередньою задачею (зад.10.1.2) будемо робочий процес циклу ТНУ на P-h діаграмі і визначаємо тиски і ентальпії NH_3 в точках циклу: $P_1 = P_4 = 0,7 \text{ МПа}$; $P_2 = P_3 = 4 \text{ МПа}$; $h_1 = 1680 \text{ кДж/кг}$; $h_{20} = 1960 \text{ кДж/кг}$; $h_3 = h_4 = 800 \text{ кДж/кг}$.

Робота привода компресора, кДж/кг

$$\ell_{\text{км}} = (h_{20} - h_1) / (\eta_{\text{км}} \eta_{\text{ем}}) = (1960 - 1680) / (0,84 \cdot 0,965) = 345.$$

Ентальпія пари NH_3 в точці 2, кДж/кг

$$h_2 = h_1 + \ell_{\text{км}} = 1680 + 345 = 2025.$$

Питома теплота, яка віддана робочим тілом в конденсаторі

$$q_1 = q_{\text{кн}} = h_2 - h_3 = 2025 - 880 = 1145.$$

Питома теплота, яка передана NH_3 у випарнику, кДж/кг

$$q_0 = q_{\text{в}} = h_1 - h_4 = 1680 - 800 = 880.$$

Теплова потужність випарника, МВт

$$Q_v = G_{cv} C_p \Delta t \cdot 10^{-3} = 330 \cdot 4,2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 3,6 = 3,85.$$

Витрата холодоагенту в циклі ТНУ, кг/с

$$G_{ха} = Q_v / q_0 = 3,85 \cdot 10^3 / 880 = 4,375.$$

Потужність компресора, МВт

$$N_{км} = G_{ха} \ell_{км} \cdot 10^{-3} = 4,375 \cdot 345 \cdot 10^{-3} \approx 1,51.$$

Потужність конденсатора, МВт

$$Q_{кн} = Q_v + N_{км} = 3,85 + 1,51 = 5,01.$$

Отже, для заданих G_{cv} і Δt_v необхідна потужність теплофікації забезпечується.

Опалювальний коефіцієнт

$$\varphi = q_1 / \ell_{км} = 1145 / 345 = 3,32.$$

Ексергія відведеної теплоти, МДж/кг

$$e_{Q_{кн}} = (1 - T_{нс} / T_{гв}) Q_{кн} = (1 - 291 / 348) 5,01 = 0,82.$$

Ексергетичний ККД ТНУ

$$\eta_e = e_{Q_{кн}} / N_{км} = 0,82 / 1,5 = 0,547.$$

Доцільність застосування ТНУ визначається за умови [1]

$$\eta_e > (1 - T_{нс} / T_{гв}) \eta_{кот}^H / (\eta_{ес} \eta_{ем})$$

тобто

$$(1 - T_{нс} / T_{гв}) \eta_{кот}^H / (\eta_{ес} \eta_{ем}) = (1 - 291 / 348) \cdot 0,84 / (0,35 \cdot 0,9) = 0,436 < \eta_e = 0,547.$$

Отже, застосування ТНУ в даному випадку доцільне.

10.2 Задачі для самостійної роботи

В процесі розв'язання задач цього розділу величину недогріву в теплообмінниках прийняти рівною $\theta = 5^\circ\text{C}$, а витрату повітря за нормальних умов.

Задача 10.2.1. В компресор повітряної холодильної машини повітря надходить з параметрами: $P = 740$ мм.рт.ст.; $t = -10^\circ\text{C}$, де стискається до п'ятикратного збільшення густини. В газоохолоднику температура повітря зменшується до 5°C . Визначити потужність компресора і детандера, холодовидатність холодильної машини, її ексергетичний ККД, якщо витрата повітря 7200 м³/год.

Задача 10.2.2. Холодовидатність повітряної холодильної машини (ХМ) складає 36000 кДж/год. Параметри повітря перед компресором: $P_1 = 98$ кПа; $t_1 = -13^\circ\text{C}$. Температура повітря на вході в детандер (-10°C). Визначити витрату повітря, потужність компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо міра підвищення тиску в компресорі дорівнює 5.

Задача 10.2.3. Температура в холодильній камері повітряної холодильної машини (-15°C), а температура навколишнього середовища -18°C . В компресорі ХМ повітря стискається до чотирикратного зменшення об'єму. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо початковий тиск

0,1 МПа, а витрата повітря – 3600 м³/год.

Задача 10.2.4. Холодовидатність повітряної ХМ дорівнює 140 кВт. Визначити потужність детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, витрату повітря, якщо відомо: температура в холодильній камері (–10°C), а підігрів повітря 15°C, температура навколишнього середовища 15°C, ККД компресора і детандера по 0,84.

Задача 10.2.5. Теоретична потужність компресора повітряної ХМ складає 200 кВт, а підвищення температури в компресорі 130°C. Визначити холодовидатність, потужності газоохолодника і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері – 10°C, а температура навколишнього середовища 18°C.

Задача 10.2.6. Теоретична потужність детандера повітряної ХМ дорівнює 100 кВт, а зменшення температури в ньому 100°C. Визначити холодовидатність, потужності газоохолодника і компресора, ексергетичний ККД і холодильний коефіцієнт, якщо температури в холодильній камері та навколишнього середовища складають (–17°C) і 20°C, відповідно.

Задача 10.2.7. Потужність газоохолодника теоретичної повітряної ХМ становить 500 кВт. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері (–12°C), температура навколишнього середовища 17°C, а стиск повітря здійснюється до збільшення густини в 3,8 раза.

Задача 10.2.8. В теоретичному циклі ХМ циркулює 3600 м³/год. повітря, температура якого за детандером складає 192 К. Визначити холодовидатність, потужності детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо: температура в холодильній камері та в навколишньому середовищі (–25) і +20°C, відповідно, а тиск перед компресором – 760 мм.рт.ст.

Задача 10.2.9. Потужність газоохолодника холодильної машини дорівнює 440 кВт, а витрата повітря 74000 м³/год.; параметри навколишнього середовища: $P_{\text{нс}} = 765$ мм.рт.ст.; $\rho_{\text{нс}} = 1,25$ кг/м³. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура повітря в холодильній камері складає (–10°C).

Задача 10.2.10. Холодовидатність теоретичної повітряної ХМ складає 185 кВт, а підігрів повітря в холодильній камері 65°C. Визначити потужності газоохолодника, компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері (–12°C), а тиск в детандері зменшується в чотири рази.

Задача 10.2.11. В циклі повітряної ХМ процеси розширення і стиску здійснюються політропно ($n = 1,2$). При цьому зміна ентропії в процесі розширення становить 0,213 кДж/(кг·К). Визначити потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо темпе-

ратура навколишнього середовища 20°C , температура в холодильній камері (-12°C), а витрата повітря за нормальних умов складає $-10800 \text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 10.2.12. В циклі повітряної холодильної машини процеси розширення і стиску здійснюються політропно ($n = 1,25$). При цьому зміна ентропії в процесі стиску дорівнює $0,115 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Визначити потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура повітря на виході з холодильної камери дорівнює 260 K , температура навколишнього середовища 25°C , а витрата повітря $-7200 \text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 10.2.13. В теоретичному циклі ХМ стиск повітря здійснюється до чотирикратного збільшення густини. Визначити потужність детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо потужність газоохолодника 520 кВт ; температура навколишнього середовища і в холодильній камері складають 25°C і -23°C відповідно.

Задача 10.2.14. Зміна ентропії в газоохолоднику повітряної ХМ складає $0,27 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Стиск повітря здійснюється до чотирикратного зменшення об'єму. Визначити роботу детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний коефіцієнт, якщо температура навколишнього середовища 17°C .

Задача 10.2.15. В холодильній камері повітряної холодильної машини ентропія збільшується на $0,3 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Визначити потужність детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура навколишнього середовища 15°C , параметри повітря на вході в компресор: $P_1 = 735 \text{ мм.рт.ст.}$; $\rho_1 = 1,315 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Задача 10.2.16. Витрата повітря в циклі холодильної машини складає $6,48 \text{ т}/\text{год.}$, а потужність детандера -180 кВт . Визначити потужності компресора, холодильної камери і газоохолодника, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура навколишнього середовища 285 K , а температура в холодильній камері (-15°C).

Задача 10.2.17. Холодовидатність повітряної ХМ дорівнює 360 кВт . Визначити потужності компресора, газоохолодника і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері (-15°C), температура навколишнього середовища 15°C , а температура повітря на виході з детандера 195 K .

Задача 10.2.18. В циклі повітряної ХМ циркулює $5400 \text{ м}^3/\text{год}$. повітря. Визначити потужності холодильної камери, компресора, детандера і газоохолодника, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура навколишнього середовища 288 K ; параметри повітря перед компресором: $P = 735 \text{ мм.р.ст.}$, $v_1 = 0,761 \text{ м}^3/\text{кг}$, а розширення в детандері здійснюється до чотирикратного зменшення тиску.

Задача 10.2.19. Холодовидатність повітряної ХМ складає 200 кВт , а зміна ентропії в холодильній камері $0,262 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Визначити потужності компресора, газоохолодника і детандера, холодильний коефіцієнт і ек-

сергетичний ККД, якщо температура навколишнього середовища 20°C , а температура повітря за детандером 200 K .

Задача 10.2.20. Зміна ентропії в детандері повітряної ХМ становить $0,1\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, а параметри навколишнього середовища: $P_0 = 740\text{ мм.рт.ст.}$, $v = 0,89\text{ м}^3/\text{кг}$. Визначити потужності детандера, компресора і газоохолодника, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо витрата повітря складає $8640\text{ м}^3/\text{год.}$, а температура після стиску в компресорі 355 K , стиск і розширення політропні з показником $n = 1,3$.

Задача 10.2.21. Визначити потужності компресора, детандера і холодильної камери повітряної ХМ, якщо потужність газоохолодника 400 кВт , параметри навколишнього середовища: $P = 745\text{ мм.рт.ст.}$; $\rho = 1,2\text{ кг}/\text{м}^3$, температура в холодильній камері (-13°C) , а температура повітря за детандером 195 K .

Задача 10.2.22. Холодовидатність повітряної ХМ складає 360 кВт , а температура навколишнього середовища 17°C . Визначити потужності компресора і газоохолодника, якщо робота детандера дорівнює $100\text{ кДж}/\text{кг}$. Визначити холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД за умови, що температура в холодильній камері (-15°C) .

Задача 10.2.23. Питома робота компресора повітряної холодильної машини складає $140\text{ кДж}/\text{кг}$, а потужність газоохолодника 500 кВт . Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, якщо температура в холодильній камері (-15°C) , а параметри навколишнього середовища: $P = 736\text{ мм.рт.ст.}$, $v = 0,88\text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 10.2.24. Температура в холодильній камері ХМ дорівнює (-15°C) . В циклі циркулює повітря з витратою $5400\text{ м}^3/\text{год.}$, параметри навколишнього середовища: $P = 740\text{ мм.рт.ст.}$, $\rho_1 = 1,22\text{ кг}/\text{м}^3$. При цьому потужність газоохолодника складає 400 кВт . Визначити потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД.

Задача 10.2.25. Повітряна ХМ працює з політропним розширенням і стиском ($n=1,27$) робочого тіла. Зміна ентропії в газоохолоднику дорівнює $0,25\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, а стиск здійснюється до чотирикратного збільшення густини. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура навколишнього середовища 20°C , а витрата повітря $7200\text{ м}^3/\text{год.}$

Задача 10.2.26. В циклі повітряної ХМ циркулює $3600\text{ м}^3/\text{год.}$ повітря. Температура навколишнього середовища і в холодильній камері складають 17°C і (-13°C) , відповідно. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура повітря за детандером складає 197 K .

Задача 10.2.27. Потужність детандера повітряної ХМ складає 120 кВт , а розширення в ньому відбувається до чотирикратного зменшення густини. Визначити холодовидатність, потужності компресора і газоохолодника, якщо температура повітря за компресором 80°C , а параметри навколишнього середовища: $P = 740\text{ мм.рт.ст.}$, $T = 288\text{ K}$.

Задача 10.2.28. В циклі ХМ циркулює $9360 \text{ м}^3/\text{год.}$ повітря, а питома робота компресора дорівнює 100 кДж/кг. Визначити холодовидатність, потужності детандера, холодоохолодника, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері -8°C , а параметри навколишнього середовища: $P=0,98 \text{ бар, } \rho_1 = 1,225 \text{ кг/м}^3$.

Задача 10.2.29. Процеси стиску і розширення в повітряній ХМ здійснюються політропно ($n = 1,27$). При цьому зміна ентропії в детандері становить $0,22 \text{ кДж/(кг К)}$. Визначити потужності детандера, компресора і газоохолодника, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо холодовидатність складає 250 кВт, температура в холодильній камері (-10°C) , а температура навколишнього середовища 17°C .

Задача 10.2.30. Питома зміна ентропії в холодильній камері повітряної ХМ складає $0,115 \text{ кДж/(кг К)}$, а температура в камері (-10°C) . Визначити потужності компресора, газоохолодника, холодовидатність, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо потужність детандера 120 кВт, а температура навколишнього середовища 15°C .

Задача 10.2.31. Потужність компресора аміачної ТНУ складає 2 МВт, а температура гарячої та зворотної води в системі теплофікації 75 і 35°C , відповідно. Стиск холодоагенту здійснюється до п'ятикратного збільшення густини. Визначити параметри NH_3 в характерних точках циклу, потужності конденсатора і випарника, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо ККД компресора $0,82$.

Задача 10.2.32. У випарнику аміачної ТНУ температура стічної води змінюється від 30 до 20°C , а її витрата дорівнює $360 \text{ м}^3/\text{год.}$ Температура гарячої та зворотної води в системі теплофікації 75 і 35°C , відповідно. Визначити потужності випарника, компресора і конденсатора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо ККД компресора $0,825$.

Задача 10.2.33. Міра підвищення тиску в компресорі ТНУ дорівнює 6 , а температура NH_3 у випарнику 15°C . Визначити потужності випарника і конденсатора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо температура зворотної води в системі теплофікації 40°C , ККД компресора $0,83$, а потужність компресора 2 МВт.

Задача 10.2.34. ТНУ постачає 180 т/год. гарячої води з температурою 75°C . Зворотна вода повертається з температурою 40°C . Тиск пари NH_3 на вході в компресор дорівнює $0,7 \text{ МПа}$. Визначити потужності випарника, компресора і конденсатора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо ККД компресора складає $0,825$.

Задача 10.2.35. Витрата стічної води у випарнику аміачної ТНУ становить $200 \text{ м}^3/\text{год.}$, а значення температур 25 і 15°C . Стиск в компресорі ТНУ здійснюється до п'ятикратного збільшення густини. Визначити потужності випарника, компресора і конденсатора, якщо коефіцієнт перетворення дорівнює $3,2$. Обґрунтувати доцільність застосування ТНУ за умови $T_{\text{нс}} = 288 \text{ К; } \eta_{\text{кот}}^{\text{н}} = 0,81; \eta_{\text{св}} = 0,355; \eta_{\text{ем}} = 0,9$.

Задача 10.2.36. Ам'ячна ТНУ відпускає гарячу воду з температурою 75°C і витратою $180 \text{ м}^3/\text{год}$. У випарнику ТНУ стічна вода охолоджується з 25 до 15°C . В процесі стиску пари NH_3 в компресорі питома ентропія збільшується на $0,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. Визначити потужності випарника, компресора, конденсатора, температуру зворотної води в системі теплофікації, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо $G_{\text{св}} = 265 \text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 10.2.37. Потужність випарника ам'ячної ТНУ складає 1 МВт , а температура стічної води на виході з нього 10°C . Визначити витрату гарячої води з температурою 75°C , яка постачається з конденсатора ТНУ, потужність компресора, ККД якого $0,82$, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо температура зворотної води в конденсаторі 35°C .

Задача 10.2.38. Потужність конденсатора ТНУ дорівнює 5 МВт . Стічна вода у випарнику охолоджується від 25 до 10°C . Стиск NH_3 в компресорі здійснюється до восьмикратного зменшення об'єму. Визначити витрати води в конденсаторі та випарнику, потужність компресора, коефіцієнт перетворення, ексергетичний ККД, якщо ККД компресора $0,84$, а температура зворотної води 40°C .

Задача 10.2.39. Температура гарячої та зворотної води в системі гарячого водопостачання від ам'ячної ТНУ складає 75 і 40°C , відповідно, а її витрата 540 т/год . Густина пари NH_3 на вході в компресор дорівнює 5 кг/м^3 . Визначити потужності конденсатора, компресора і випарника, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо зміна ентропії в процесі стиску складає $0,22 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Задача 10.2.40. У випарнику ам'ячної ТНУ температура стічної води змінюється від 28°C до 20°C , а її витрата складає 540 т/год . Конденсатор ТНУ постачає гарячу воду з температурою 80°C . Визначити потужності конденсатора і компресора, коефіцієнт перетворення, витрату гарячої води, якщо температура зворотної води 40°C , а ексергетичний ККД $0,4$.

Задача 10.2.41. Тиск у випарнику ам'ячної ТНУ складає $0,6 \text{ МПа}$. ТНУ постачає гарячу воду з температурою 75°C . Зворотна вода повертається в конденсатор з температурою 40°C . Визначити витрату гарячої води, потужність випарника і компресора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо потужність конденсатора $2,5 \text{ МВт}$, ККД компресора $0,84$.

Задача 10.2.42. Витрата стічної води у випарнику ам'ячної ТНУ дорівнює $180 \text{ м}^3/\text{год}$, а температура її змінюється від 25 до 15°C . Густина пари NH_3 за компресором складає 25 кг/м^3 . Визначити потужності випарника, компресора, витрату гарячої води, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо зміна ентропії в процесі стиску дорівнює $0,18 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, а температура зворотної води 45°C .

Задача 10.2.43. Температура гарячої та зворотної води в конденсаторі ам'ячної ТНУ складе 80 і 40°C відповідно. В компресорі потужністю 2 МВт стиск здійснюється до восьмикратного збільшення густини. Визначити витрату гарячої води, потужності конденсатора і випарника, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД ТНУ.

Задача 10.2.44. Витрата гарячої води з температурою 75°C в систему теплофікації від аміачної ТНУ становить $360 \text{ м}^3/\text{год}$. У випарнику температура стічної води зменшується від 27 до 15°C . Визначити витрату стічної води, потужність компресора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо ККД компресора $0,82$, а його потужність 2 МВт .

Задача 10.2.45. Потужність випарника аміачної ТНУ дорівнює $2,5 \text{ МВт}$, а температура стічної води на виході із нього 10°C . Визначити потужності компресора і конденсатора, витрату гарячої води в системі теплофікації, ексергетичний ККД, якщо коефіцієнт перетворення дорівнює $3,3$, а температура зворотної води 40°C .

Задача 10.2.46. Потужність конденсатора аміачної ТНУ складає 5 МВт , а ексергетичний ККД ТНУ $0,42$. Температура гарячої води на виході з конденсатора ТНУ дорівнює 75°C . Витрата стічної води у випарнику складає $168,5 \text{ м}^3/\text{год}$, а її температура на вході у випарник 30°C . Визначити температуру стічної води на виході з випарника, потужність компресора, витрату NH_3 в циклі, а також температуру зворотної води в системі теплофікації.

Задача 10.2.47. В компресорі аміачної ТНУ суха насичена пара стискається до десятикратного збільшення густини. Температура води на виході з випарника дорівнює 10°C , а температура зворотної води 50°C . Визначити витрату гарячої води, потужності випарника і конденсатора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо потужність компресора 2 МВт .

Задача 10.2.48. Температура гарячої та зворотної води в конденсаторі аміачної ТНУ становить 75 і 40°C . Міра підвищення тиску в компресорі дорівнює $6,5$. Визначити витрату гарячої води, потужність компресора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо потужність випарника 2 МВт , а ККД компресора $0,82$.

Задача 10.2.49. У випарнику аміачної ТНУ температура стічної води змінюється від 30 до 20°C , а її витрата складає $200 \text{ м}^3/\text{год}$. ТНУ постачає гарячу воду з температурою 80°C . Визначити витрату гарячої води, потужність компресора, ексергетичний ККД, якщо коефіцієнт перетворення дорівнює $3,2$, а температура зворотної води 40°C .

Задача 10.2.50. Потужність компресора аміачної ТНУ дорівнює $1,6 \text{ МВт}$, а температура стічної води на виході з випарника 10°C . Визначити потужності випарника, конденсатора, витрату гарячої води, коефіцієнт перетворення, ексергетичний ККД, якщо міра підвищення тиску дорівнює 7 , а температура зворотної води 40°C .

Задача 10.2.51. Витрата NH_3 в циклі ТНУ – 180 т/год . В конденсаторі ТНУ зворотна вода підігрівається від 38 до 80°C , а стиск в компресорі здійснюється до восьмикратного збільшення густини. Визначити витрату

гарячої води, потужності компресора і випарника, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД.

Задача 10.2.52. Витрата стічної води у випарнику ТНУ дорівнює $180 \text{ м}^3/\text{год.}$, а її температура змінюється від 30 до 20°C . В процесі стиску NH_3 в компресорі ентропія зростає на $0,22 \text{ кДж}/(\text{кг К})$. Визначити потужності випарника, компресора і конденсатора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо температура гарячої води складає 80°C .

Задача 10.2.53. Температура гарячої та зворотної води в конденсаторі аміачної ТНУ становить 75 і 35°C , відповідно, а потужність випарника $1,5 \text{ МВт}$. Визначити витрату гарячої води, потужності випарника і компресора, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо міра підвищення тиску в компресорі 8 , а його ККД $0,83$.

Задача 10.2.54. Витрата гарячої води з конденсатора аміачної ТНУ складає $360 \text{ м}^3/\text{год.}$, а її температура 75°C . Густина пари на вході в компресор $5,2 \text{ кг}/\text{м}^3$. Визначити температуру зворотної та стічної води, потужності випарника і компресора, якщо ККД останнього $0,84$, а перепад температур стічної води 10°C .

Задача 10.2.55. Потужність конденсатора аміачної ТНУ, яка відпускає воду з температурою 70°C , складає 4 МВт . Визначити потужності випарника і компресора, витрату гарячої води, якщо коефіцієнт перетворення дорівнює $3,3$, температура випаровування 15°C , температура зворотної води 37°C , а ККД компресора $0,83$.

Задача 10.2.56. Потужність випарника аміачної ТНУ становить $2,5 \text{ МВт}$, а ексергетичний ККД ТНУ — $0,425$. В конденсаторі зворотна вода підігрівається від 40 до 75°C . Визначити потужності конденсатора і компресора, якщо міра підвищення тиску в останньому дорівнює 8 . Визначити також витрату гарячої та стічної води, якщо перепад температур останньої складає 8°C .

Задача 10.2.57. Густина NH_3 за компресором ТНУ дорівнює $24 \text{ кг}/\text{м}^3$, а температура стічної води на виході з випарника 15°C . Визначити потужності випарника, компресора, а також витрату гарячої води, коефіцієнт перетворення і ексергетичний ККД, якщо температура зворотної води 40°C , а ККД компресора $0,835$.

Задача 10.2.58. Густина пари NH_3 на вході в компресор дорівнює $5 \text{ кг}/\text{м}^3$, а зміна ентропії в процесі стиску $0,25 \text{ кДж}/(\text{кг К})$. ТНУ відпускає $360 \text{ м}^3/\text{год.}$ гарячої води з температурою 80°C . Визначити витрату стічної води, потужності випарника, компресора і конденсатора, коефіцієнт перетворення, ексергетичний ККД, якщо температура зворотної води 40°C , перепад температур стічної води 10°C .

Задача 10.2.59. Витрата стічної води у випарнику аміачної ТНУ складає $160 \text{ м}^3/\text{год.}$, а її температура на виході з випарника 15°C . В компресорі пара NH_3 стискається до дев'ятикратного збільшення густини. Визначити витрату гарячої води, потужності випарника і компресора, коефіцієнт

перетворення і ексергетичний ККД, якщо температура зворотної води 40°C , а перепад температур стічної води 12°C .

ЛІТЕРАТУРА

1. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. – Вінниця: “Поділля – 2000”, 2004. – 358 с.
2. Техническая термодинамика/Под ред. В.И.Крутова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 347 с.
3. Базаров И.П. Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.
4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
5. Ривкин С.А., Александров Л.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергиздат, 1984. – 80 с.
6. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена/Под ред. В.И.Крутова и Г.Б.Петреницкого. – М.: Высшая школа, 1986. – 383 с.
7. Серова Ф.Г., Янкина А.А. Сборник задач по термодинамике. – М.: Просвещение, 1976. – 160 с.
8. Андрианова Т.И., Дзамнов Б.В., Зубарев В.Н. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
9. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 375 с.
10. Кириллин В.А., Шейдлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Задачник по технической термодинамике. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 253 с.

Додаток А
Основні фізичні властивості деяких газів

Назва	Хімічна формула	Густина при 0°C і 760 мм рт.ст.	Молекулярна маса	Газова стала, Дж/к Кг	Температура кипіння при 760 мм.рт.ст	Теплота пароутворення при 760 мм рт.ст., г · 10 ⁻³ , Дж/кг	Критичні точки		Теплоємність при 20 °C і p = 1 бар, кДж/(кг·К)	
							Температура, °C	Тиск (абсолютний), бар	C _p	C _v
Азот	N ₂	1,25	28	297	-195,8	199,4	-147,1	33,49	1,05	0,746
Аміак	NH ₃	0,77	17	488	33,4	1374	+132,4	111,5	2,22	1,68
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,171	26,0	320	-83,7(в)	830	+35,7	61,6	1,68	1,36
Бензол	C ₆ H ₆	-	78,1	106	+80,2	394	+288,5	47,7	1,25	1,140
Бутан	C ₄ H ₁₀	2,673	58,1	143	-0,5	387	+152	37,5	1,92	1,80
Повітря	-	1,293	(29,0)	287	-195	197	-140,7	37,2	1,01	0,721
Водень	H ₂	0,0899	2,02	2140	-252,8	450,5	-239,9	12,80	14,3	10,14
Гелій	He	0,179	4,0	2080	-268,9	19,5	-268,0	2,26	5,28	3,18
Двоокис азоту	NO ₂	-	46,0	181	+21,2	712	+158,2	100,00	0,804	0,62
Двоокис сірки	SO ₂	2,93	64,1	130	-10,8	394	+157,5	77,78	0,633	0,503
Двоокис вуглецю	CO ₂	1,90	44,0	189	78,2(возг)	574,0	+31,1	72,9	0,838	0,654
Кисень	O ₂	1,429	32	260	-83,0	213	-118,8	49,71	0,913	0,654
Метан	CH ₄	0,72	16,0	519	-161,6	511	-82,15	45,6	2,23	1,70
Окис вуглецю	CO	1,25	28,0	297	-191,5	212	-140,2	34,53	1,05	0,754
Пропан	C ₃ H ₈	2,02	44,1	189	-42,1	427	+95,6	43	1,87	1,65
Сірководень	H ₂ S	1,54	34,1	244	-60,2	549	+100,4	188,9	1,060	0,804
Хлор	Cl ₂	3,22	70,9	117	-33,8	306	+144,0	76,1	0,482	0,355

Додаток Б

Таблиця Б.1 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см³·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3575	0,9864
700	33,025	24,710	30,725	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948

Таблиця Б.2 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ ВОДНЮ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/см³·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,350	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	30,488	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964

Таблиця Б.3 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоємність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC _p	μC _v	μC _{pm}	μC _{vm}	C _{pm}	C _{vm}	C' _{pm}	C' _{vm}
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,700	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9227	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,588	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644

Таблиця Б.4 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ СІРЧАНОГО ГАЗУ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль К)				Масова теплоємність, кДж/(кг К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ К)	
	μC _p	μC _v	μC _{pm}	μC _{vm}	C _{pm}	C _{vm}	C' _{pm}	C' _{vm}
0	38,85	30,52	38,85	30,52	0,607	0,477	1,733	1,361
100	42,41	34,08	40,65	32,32	0,636	0,507	1,813	1,440
200	45,55	37,22	42,33	34,00	0,662	0,532	1,888	1,516
300	48,23	39,90	43,88	35,55	0,687	0,557	1,955	1,587
400	50,24	41,91	45,22	36,89	0,708	0,578	2,018	1,645
500	51,71	43,38	46,39	38,06	0,724	0,595	2,068	1,700
600	52,88	44,55	47,35	39,02	0,737	0,607	2,114	1,742
700	53,76	45,43	48,23	39,90	0,754	0,624	2,152	1,799
800	54,43	46,10	48,94	40,61	0,762	0,632	2,181	1,813
900	55,01	46,68	49,61	41,128	0,775	0,645	2,215	1,842
1000	55,43	47,10	50,16	41,83	0,783	0,653	2,236	1,867
1100	55,77	47,44	50,66	42,33	0,791	0,662	2,261	1,888
1200	56,06	47,73	51,08	42,75	0,795	0,666	2,278	1,908

Таблиця Б.5 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,984	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286

Таблиця Б.6 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ ПОВІТРЯ

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	1,0000
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,687	31,862	23,547	1,0999	0,8432	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,976	32,109	23,794	1,1082	0,8127	1,4327	1,0618
1300	35,291	27,231	32,343	24,028	1,1166	0,8215	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,457	32,565	24,250	1,1242	0,8294	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,662	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0999
1600	35,977	27,725	33,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,1036
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078

Таблиця Б.7 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ КИСНЮ

Темпе- ратура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоємність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9551	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,246	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,0166
1100	34,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	28,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752

Таблиця Б.8 - ТЕПЛОЄМНІСТЬ АЗОТУ

Темпе- ратура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоємність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7427	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7691	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7792	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7900	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,452	22,136	1,0869	0,8005	1,3586	1,0877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8110	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8210	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,757	27,432	32,899	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,461	1,0961

Додаток В
Інтерполяційні формули для обчислення
масових і об'ємних теплосмностей деяких газів в межах 0 – 1250°С

Газ	Масова теплосмність, кДж/(кг·К)	Об'ємна теплосмність, кДж/(м³·К)
Повітря	$C_p = 0,9952 + 9,349 \cdot 10^{-5}$ $C_v = 0,7084 + 9,349 \cdot 10^{-5}$	$C'_p = 1,287 + 1,209 \cdot 10^{-4}$ $C'_v = 0,9161 + 1,209 \cdot 10^{-4}$
N ₂	$C_p = 1,0258 + 8,382 \cdot 10^{-5}$ $C_v = 0,7289 + 8,382 \cdot 10^{-5}$	$C'_p = 1,2833 + 1,049 \cdot 10^{-4}$ $C'_v = 0,9123 + 1,049 \cdot 10^{-4}$
O ₂	$C_p = 0,9127 + 1,2724 \cdot 10^{-4}$ $C_v = 0,6527 + 1,2724 \cdot 10^{-4}$	$C'_p = 1,3046 + 1,8183 \cdot 10^{-4}$ $C'_v = 0,9337 + 1,8183 \cdot 10^{-4}$
CO	$C_p = 1,0304 + 9,575 \cdot 10^{-5}$ $C_v = 0,7335 + 9,575 \cdot 10^{-5}$	$C'_p = 1,2883 + 1,1966 \cdot 10^{-4}$ $C'_v = 0,9173 + 1,1966 \cdot 10^{-4}$
CO ₂	$C_p = 0,8725 + 2,4053 \cdot 10^{-4}$ $C_v = 0,6837 + 2,4053 \cdot 10^{-4}$	$C'_p = 1,725 + 4,756 \cdot 10^{-5}$ $C'_v = 1,354 + 4,756 \cdot 10^{-5}$
SO ₂	$C_p = 0,6314 + 1,554 \cdot 10^{-4}$ $C_v = 0,5016 + 1,554 \cdot 10^{-4}$	$C'_p = 1,8472 + 4,547 \cdot 10^{-5}$ $C'_v = 1,4764 + 4,547 \cdot 10^{-5}$
H ₂ O	$C_p = 1,84 + 2,9278 \cdot 10^{-4}$ $C_v = 1,3783 + 2,9878 \cdot 10^{-4}$	$C'_p = 1,48 + 2,355 \cdot 10^{-4}$ $C'_v = 1,105 + 2,355 \cdot 10^{-4}$
H ₂	$C_p = 14,2494 + 5,9574 \cdot 10^{-4}$ $C_v = 10,1241 + 5,9574 \cdot 10^{-4}$	$C'_p = 1,2803 + 5,355 \cdot 10^{-5}$ $C'_v = 0,9094 + 5,355 \cdot 10^{-5}$

Додаток Г
Значення теплосмності C_p води і водяної пари на нижній та верхній
граничних кривих, кДж/(кг·К)

Температура насичення	Вода	Пара	Температура насичення	Вода	Пара	Температура насичення	Вода	Пара
t	C _{ps}	C _{ps} ^{''}	C _{ps} [']	t	C _{ps} ^{''}	C _{ps} [']	t	C _{ps} ^{''}
0,01	4,218	1,87	130	4,264	2,27	260	4,981	4,31
10	4,193	1,88	140	4,286	2,34	270	5,118	4,66
20	4,182	1,88	150	4,311	2,42	280	5,28	5,09
30	4,178	1,89	160	4,340	2,52	290	5,49	5,60
40	4,179	1,90	170	4,372	2,62	300	5,75	6,22
50	4,181	1,92	180	4,409	2,73	310	6,10	7,06
60	4,184	1,95	190	4,451	2,86	320	6,56	8,25
70	4,189	1,98	200	4,498	3,00	330	7,21	9,88
80	4,196	2,01	210	4,552	3,15	340	(8,16)	(12,39)
90	4,205	2,05	220	4,614	3,32	350	(9,80)	(17,25)
100	4,217	2,09	230	4,686	3,53	360	(13,98)	(29,31)
110	4,230	2,14	240	4,769	3,75	370	(40,32)	(97,13)
120	4,245	2,20	250	4,866	4,01			

Додаток Д

Таблиця Д.1 -Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення

Р, бар	t, °C	v', м³/кг	v'', м³/кг	p'', кг/м²	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	g, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,9575
0,015	13,038	0,0010007	87,9	0,01138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,5	2539	2451	0,3124	8,642
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,055	34,59	0,0010059	25,77	0,03880	144,95	2564	2419	0,4993	8,359
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,065	37,65	0,0010070	22,02	0,04542	157,68	2570	2412	0,5406	8,300
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,075	40,32	0,0010080	19,23	0,05198	168,8	2574	24,05	0,05764	8,250
0,080	41,54	0,0010085	18,1	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,085	42,69	0,0010090	17,1	0,05849	178,7	2578	2399	0,608	8,206
0,090	43,79	0,0010094	16,2	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,095	44,84	0,0010098	15,4	0,06493	187,7	2582	2394	0,6362	8,167
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,11	47,72	0,0010111	13,4	0,07462	199,7	2588	2388	0,674	8,116
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207	2591	2384	0,6966	8,085
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,15	54	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373	0,755	8,007
0,16	55,34	0,0010147	9,429	0,106	231,7	2601	2369	0,7722	7,984
0,17	56,61	0,0010153	8,909	0,1123	236,9	2603	2366	0,7884	7,963
0,18	57,82	0,0010159	8,444	0,1185	241,9	2605	2363	0,8038	7,944
0,19	58,98	0,0010165	8,025	0,1247	246,7	2607	2360	0,8183	7,925
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,21	61,14	0,0010177	7,304	0,1369	255,9	2611	2355	0,8453	7,89
0,22	62,16	0,0010183	6,992	0,143	260,2	2613	2353	0,8581	7,847
0,23	63,14	0,0010188	6,708	0,1491	264,3	2614	2350	0,8703	7,859
0,24	64,08	0,0101930	6,445	0,1551	268,2	2616	2348	0,8821	7,844
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272	2618	2346	0,8934	7,83
0,26	65,88	0,0010204	5,977	0,1673	275,7	2620	2344	0,9043	7,816
0,27	66,73	0,0010209	5,769	0,1733	279,3	2621	2342	0,9147	7,803
0,28	67,55	0,0010214	5,576	0,1793	282,7	2623	2640	0,9248	7,791
0,29	68,35	0,0010218	5,395	0,1853	286	2624	2338	0,9346	7,779
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,32	70,6	0,0010232	4,922	0,20322	295,5	2627	2332	0,9625	7,745
0,34	72,02	0,001024	4,65	0,2151	301,5	2630	2328	0,9796	7,724
0,36	73,36	0,0010248	4,407	0,2269	307,1	2632	2325	0,9958	7,705
0,38	74,64	0,0010256	4,189	0,2387	312,5	2634	2322	1,0113	7,687
0,4	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,67
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311	1,0601	7,229
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311	1,0601	7,229
0,5	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,091	7,593

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,55	83,74	0,0010315	2,963	0,3375	350,7	2649	2298	1,1193	7,561
0,6	85,95	0,001033	2,732	0,3661	360	2653	2293	1,1453	7,531
0,65	88,02	0,0010345	2,534	0,3946	368,6	2657	2288	1,1693	7,504
0,7	89,97	0,0010359	2,364	0,423	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,75	91,8	0,0010372	2,216	0,4512	384,5	2663	2278	1,213	7,456
0,8	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,233	7,434
0,85	95,16	0,0010397	1,972	0,5071	398,7	2668	2269	1,2518	7,414
0,9	96,72	0,0010409	1,869	0,535	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,95	98,21	0,0010421	1,777	0,5627	411,5	2673	2261	1,2865	7,376
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,36
1,1	102,32	0,0010452	1,55	0,6453	428,9	2679	2250	1,3227	7,328
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
1,4	109,33	0,001051	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,455	7,202
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,0010591	0,929	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,547	7,111
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,563	7,096
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524	2713	2189	1,5783	7,081
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,34	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,04
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,2	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167	1,66	7,003
3	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,85	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,01	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,32	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
4,6	148,73	0,0010892	0,4054	2,467	626,9	2745	2118	1,829	6,85
4,7	149,53	0,0010901	0,3973	2,517	630,3	2746	2116	1,837	6,843
4,8	150,31	0,001091	0,3895	2,568	633,7	2747	2113	1,845	6,835
4,9	151,08	0,0010918	0,3819	2,618	636,9	2748	2111	1,853	6,828
5	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,86	6,822

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5,2	153,32	0,0010943	0,3612	2,769	646,5	2750	2104	1,875	6,809
5,4	154,76	0,001096	0,3485	2,869	652,7	2752	2099	1,89	6,796
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095	1,904	6,784
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095	1,904	6,784
5,8	157,52	0,0010992	0,3258	3,069	664,7	2755	2090	1,918	6,772
6	158,84	0,0011007	0,3156	3,16	670,5	2757	2086	1,931	6,761
6,2	160,12	0,0011022	0,306	3,268	676	2758	2082	1,944	6,75
6,4	161,37	0,0011037	0,297	3,367	681,5	2760	2078	1,956	6,739
6,6	162,59	0,0011052	0,2885	3,467	686,9	2761	2074	1,968	6,729
6,8	163,79	0,0011066	0,2804	3,566	692,1	2762	2070	1,98	6,719
7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
7,2	166,1	0,0011095	0,2656	3,765	702,2	2765	2063	2,003	6,699
7,4	167,21	0,0011109	0,2588	3,864	707,1	2766	2059	2,014	6,69
7,6	168,3	0,0011123	0,2523	3,963	711,8	2767	2055	2,025	6,681
7,8	169,37	0,0011136	0,2462	4,062	716,4	2768	2052	2,036	6,672
8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
8,2	171,44	0,0011162	0,2347	4,26	725,4	2770	2045	2,056	6,655
8,4	172,44	0,0011175	0,2294	4,359	729,8	2771	2041	2,066	6,647
8,6	173,43	0,0011187	0,2243	4,458	734,2	2772	2038	2,076	6,639
8,8	174,4	0,00112	0,2195	4,556	738,6	2773	2034	2,085	6,631
9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
9,2	176,29	0,0011225	0,2104	4,753	746,9	2775	2028	2,103	6,615
9,4	177,21	0,0011237	0,2061	4,852	750,9	2776	2025	2,112	6,608
9,6	178,12	0,0011249	0,202	4,949	754,8	2777	2022	2,121	6,601
9,8	179,01	0,0011261	0,1982	5,045	758,8	2778	2019	2,130	6,594
10	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
10,5	182,00	0,0011303	0,1856	5,388	772,1	2779	2007	2,159	6,570
11	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
11,5	186,04	0,0011358	0,1701	5,879	789,8	2783	1993	2,198	6,538
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
12,5	189,8	0,0011412	0,157	6,369	806,5	2786	1980	2,234	6,509
13	191,6	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
13,5	193,34	0,0011464	0,1458	6,859	822,3	2789	1967	2,268	6,482
14	195,04	0,001149	0,1408	7,103	830	2790	1960	2,284	6,469
14,5	196,68	0,0011515	0,1361	7,348	837,4	2791	1954	2,299	6,457
15	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
15,5	199,84	0,0011563	0,1276	7,837	851,5	2793	1941	2,329	6,433
16	201,36	0,0011586	0,1238	8,08	858,3	2793	1935	2,344	6,422
16,5	202,85	0,0011609	0,1201	8,325	865	2794	1929	2,358	6,411
17	204,3	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,40
17,5	205,72	0,0011655	0,1135	8,812	878,1	2796	1918	2,384	6,389
18	207,1	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
18,5	208,45	0,0011700	0,1075	9,303	890,6	2797	1907	2,41	6,369
19	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896	2,435	6,350
20	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
20,5	213,62	0,0011788	0,09719	10,29	914,2	2800	1886	2,458	6,331
21	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,47	6,322
21,5	216,05	0,001183	0,09276	10,78	925,4	2800	1875	2,481	6,314
22	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
22,5	218,41	0,0011872	0,08869	11,28	936,3	2801	1865	2,503	6,297

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	219,5	0,0011892	0,8679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
23,5	220,67	0,0011912	0,08498	11,77	946,7	2802	1855	2,524	6,28
24	221,77	0,0011932	0,8324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
24,5	222,85	0,0011952	0,08156	12,26	956,8	2802	1845	2,544	6,264
25	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
25,5	224,99	0,0011992	0,07837	12,76	966,8	2803	1836	2,564	6,249
26	226,03	0,0012012	0,7688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
26,5	227,05	0,0012031	0,07545	13,25	976,6	2803	1820	2,582	6,234
27	228,06	0,001205	0,07406	13,5	981,3	2803	1822	2,592	6,227
27,5	229,06	0,0012069	0,07271	13,75	985,9	2803	1817	2,602	6,22
28	230,04	0,0012088	0,07141	14	990,4	2803	1813	2,611	6,213
28,5	231,01	0,0012107	0,07016	14,25	994,9	2803	1808	2,62	6,206
29	231,96	0,0012126	0,06895	14,5	999,4	2803	1804	2,628	6,199
29,5	232,9	0,0012145	0,06778	14,75	1003,8	2804	1800	2,637	6,193
30	233,83	0,0012163	0,06665	15	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
31	235,66	0,0012201	0,0645	15,5	1016,9	2804	1787	2,662	6,173
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
33	239,18	0,0012274	0,06055	16,52	1033,7	2803	1769	2,695	6,149
34	240,88	0,001231	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,71	6,137
35	242,54	0,0012345	0,05704	17,53	1049,8	2803	1753	2,725	6,152
36	244,16	0,001238	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,74	6,113
37	245,75	0,0012415	0,05391	18,55	1065,2	2802	1737	2,755	6,102
38	247,31	0,001245	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
39	248,84	0,0012485	0,05108	19,58	1080,2	2801	1721	2,783	6,081
40	250,33	0,001252	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,07
41	251,8	0,0012554	0,04852	20,61	1094,7	2800	1705	2,81	6,059
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
43	254,66	0,0012622	0,04617	21,66	1108,5	2799	1691	2,836	6,039
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
45	257,41	0,001269	0,04404	22,71	1122,1	2798	1676	2,862	6,02
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,01
47	260,07	0,0012757	0,0421	23,76	1135,4	2796	1661	2,886	6,001
48	261,37	0,001279	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
49	262,65	0,0012824	0,04029	24,82	1148,2	2795	1647	2,909	5,982
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
51	265,15	0,001289	0,03863	25,89	1160,6	2793	1632	2,932	5,964
52	266,38	0,0012923	0,03784	26,43	1166,8	2792	1625	2,943	5,956
53	267,58	0,0012955	0,03708	26,97	1172,9	2791	1618	2,954	5,947
54	268,77	0,0012988	0,03635	27,51	1179	2791	1612	2,965	5,939
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,93
56	271,1	0,0013054	0,03495	28,61	1190,8	2789	1597,7	2,987	5,922
57	272,24	0,0013087	0,03429	29,16	1196,6	2788	1591	2,997	5,914
58	273,6	0,001312	0,03365	29,72	1202,4	2786	1584,3	3,007	5,906
59	274,47	0,0013152	0,03303	30,28	1208,2	2786	1577,6	3,017	5,898
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,89
61	276,64	0,0013217	0,03185	31,4	1219,6	2784	1564,1	3,037	5,882
62	277,71	0,001325	0,0313	31,95	1225,1	2782	1557,4	3,047	5,874
63	278,76	0,0013282	0,03076	32,51	1230,6	2781	1550,7	3,057	5,866
64	279,8	0,0013314	0,03024	33,07	1236	2780	1544,1	3,066	5,859
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
66	281,85	0,001338	0,02923	34,21	1246,6	2778	1530,9	3,085	5,844

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
67	282,86	0,0013412	0,02874	34,79	1251,8	2776	1524,4	3,095	5,836
68	283,85	0,0013445	0,02827	35,37	1257	2775	1517,9	3,104	5,829
69	284,83	0,0013478	0,02782	35,95	1262,2	2773	1511,4	3,113	5,822
70	285,8	0,001351	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
71	286,76	0,0013542	0,02694	37,12	1272,5	2771	1498,4	3,131	5,807
72	287,71	0,0013574	0,02652	37,71	1277,6	2769	1492	3,14	5,8
73	288,65	0,0013607	0,02611	38,3	1282,6	2768	1485,6	3,149	5,793
74	289,58	0,001364	0,02571	38,89	1287,6	2767	1479,2	3,158	5,786
75	290,5	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
76	291,41	0,0013706	0,02494	40,09	1297,7	2764	1466,4	3,174	5,772
77	292,32	0,0013739	0,02457	40,7	1302,6	2763	1460	3,183	5,765
78	293,22	0,0013772	0,02421	41,3	1307,4	2761	1453,7	3,192	5,758
79	294,1	0,0013805	0,02386	41,91	1312,2	2759	1447,4	3,2	5,751
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317	2758	1441,1	3,208	5,745
81	295,85	0,0013872	0,02318	43,14	1321,8	2757	1434,8	3,216	5,738
82	296,71	0,0013905	0,02285	43,76	1326,6	2755	1428,5	3,224	5,731
83	297,56	0,0013938	0,02253	44,38	1331,4	2753	1422,2	3,232	5,724
84	298,4	0,0013972	0,02222	45	1336,1	2752	1416	3,24	5,717
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
86	300,07	0,0014039	0,02162	46,25	1345,4	2749	1403,7	3,255	5,704
87	300,89	0,0014073	0,02132	46,9	1350,1	2747	1397,6	3,263	5,698
88	301,71	0,0014106	0,02103	47,55	1354,7	2746	1391,5	3,271	5,691
89	302,52	0,001414	0,02075	48,19	1359,2	2744	1385,4	3,279	5,685
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,87	5,678
91	304,11	0,0014208	0,02021	49,48	1368,2	2741	1373,2	3,294	5,672
92	304,9	0,0014242	0,01995	50,13	1372,7	2740	1367	3,301	5,665
93	305,67	0,0014276	0,01969	50,79	1377,1	2738	1360,9	3,309	5,659
94	306,45	0,001431	0,01944	51,45	1381,5	2736	1354,7	3,316	5,653
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
96	307,98	0,001438	0,01895	52,77	1390,2	2732	1342,1	3,331	5,64
97	308,74	0,0014415	0,01871	53,44	1394,5	2730	1335,8	3,338	5,634
98	309,49	0,001445	0,01848	54,11	1398,9	2728	1329,5	3,346	5,628
99	310,23	0,0014486	0,01825	54,79	1403,3	2726	1323,2	3,353	5,621
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317	3,36	5,615
102	312,42	0,0014592	0,01759	56,85	1416,4	2721	1304,6	3,374	5,602
104	313,86	0,0014664	0,01716	58,27	1425	2717	1292,3	3,388	5,59
106	315,28	0,0014736	0,01675	59,7	1433,5	2713	1280	3,402	5,578
108	316,67	0,0014808	0,01636	61,13	1441,9	2709	1267,3	3,416	5,565
110	318,04	0,0014889	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,43	5,553
112	319,39	0,001496	0,01561	64,05	1458,4	2701	1243	3,443	5,541
114	320,73	0,001503	0,01526	65,54	1466,6	2697	1230,6	3,457	5,528
116	322,05	0,001511	0,01491	67,06	1474,8	2693	1218,3	3,47	5,516
118	323,35	0,001519	0,01458	68,59	1483	2689	1205,9	3,483	5,504
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
122	325,9	0,001535	0,01395	71,7	1499,2	2680	1181	3,509	5,48
124	327,15	0,001543	0,01364	73,3	1507,3	2676	1168,5	3,522	5,468
126	328,39	0,001551	0,01334	74,94	1515,4	2671	1156	3,535	5,456
128	329,61	0,001559	0,01305	76,61	1523,5	2667	1143,4	3,548	5,444
130	330,81	0,001567	0,01277	78,3	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
132	332	0,001576	0,0125	80	1539,5	2658	1118,2	3,573	5,42
134	333,18	0,001585	0,01224	81,72	1547,3	2653	1105,5	3,586	5,408

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
136	334,34	0,001594	0,01198	83,47	1555,1	2648	1092,7	3,598	5,396
138	335,49	0,001602	0,01173	85,25	1562,9	2643	1079,9	3,61	5,384
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
142	337,75	0,00162	0,01125	88,89	1578,7	2633	1053,8	3,636	5,36
144	338,86	0,001629	0,01101	90,83	1586,6	2628	1040,7	3,648	5,348
146	339,96	0,001638	0,01078	92,76	1594,5	2622	1027,6	3,66	5,336
148	341,04	0,001648	0,01056	94,69	1602	2617	1014,5	3,672	5,323
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,31
152	343,18	0,001668	0,01014	98,62	1618	2606	987,5	3,697	5,297
154	344,23	0,001678	0,009928	100,72	1626	2600	973,8	3,709	5,285
156	345,27	0,001688	0,00972	102,9	1634	2594	960	3,721	5,273
158	346,3	0,001699	0,009517	105,1	1642	2588	946,1	3,733	5,26
160	347,32	0,00171	0,009318	107,3	1650	2582	932	3,746	5,247
162	348,33	0,001721	0,009124	109,6	1658	2576	917,7	3,758	5,233
164	349,32	0,001732	0,008934	111,9	1666	2569	903,2	3,77	5,219
166	350,31	0,001744	0,008747	114,3	1674	2562	888,4	3,783	5,205
168	351,29	0,001756	0,008563	116,8	1682	2555	873,4	3,795	5,191
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
172	353,21	0,001781	0,008203	121,9	1698	2541	843	3,82	5,163
174	354,17	0,001794	0,008025	124,6	1707	2534	827,4	3,832	5,149
176	355,11	0,001808	0,007848	127,4	1715	2526	811,4	3,845	5,135
178	356,04	0,001822	0,007674	130,3	1723	2518	795	3,858	5,121
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
182	357,87	0,001853	0,007336	136,3	1741	2502	761,2	3,884	5,092
184	358,78	0,00187	0,007169	139,5	1749	2493	743,9	3,898	5,076
186	359,67	0,001887	0,007003	142,8	1758	2484	726,4	3,911	5,06
188	360,56	0,001904	0,00684	146,2	1767	2475	708,5	3,925	5,044
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
192	362,31	0,00194	0,00652	153,4	1785	2456	671	3,952	5,009
194	363,17	0,001961	0,00636	157,3	1795	2446	651	3,967	4,99
196	364,02	0,001985	0,00619	161,6	1805	2435	630	3,982	4,97
198	364,87	0,00201	0,00602	166,1	1816	2423	607	3,998	4,949
200	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
202	366,54	0,00207	0,00568	176	1838	2397	559	4,032	4,906
204	367,37	0,0021	0,00551	181,4	1849	2383	534	4,049	4,883
206	368,18	0,00213	0,00534	187,2	1861	2369	508	4,067	4,858
208	368,99	0,00217	0,00516	193,6	1874	2353	479	4,087	4,832
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
212	370,58	0,00226	0,0048	208,5	1903	2316	413	4,131	4,771
214	371,4	0,00232	0,0046	217,4	1920	2294	374	4,157	4,734
216	372,2	0,00239	0,00436	229,3	1940	2269	329	4,188	4,692
218	372,9	0,00249	0,00402	248,7	1965	2233	268	4,223	4,645
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Параметри критичного стану

Температура	374,15 ⁰ С.
Тиск	22,129 МПа.
Питомий об'єм	0,00326 м ³ /кг.
Питома ентальпія	2100кДж/кг.
Питома ентропія	4,430 кДж/(кг·К).

Навчальне видання
Марко Миколайович Чепурний
Станіслав Йосипович Ткаченко

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА
В ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ

Навчальний посібник

Оригінал – макет підготовлено Чепурним М.М.
Редактор В.О.Дружиніна
Коректор З.В.Поліщук

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 25.06.05р.	Гарнітура Times New Roman
Формат 29,7х42 ¼	Папір офсетний
Друк різнографічний.	Ум.др.арк. 7.44
Тираж 75 прим.	
Зам. № 2005-40	

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ