

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний університет водного
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних
машин

01-06-64М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

та завдання до виконання практичних робіт з навчальної
дисципліни «Технічна термодинаміка»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності
144 «Теплоенергетика» галузі знань
14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою
з якості ННІВГП
Протокол №10 від 20.06.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки та завдання до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання [Електронне видання] / Костюк О. П. – Рівне : НУВГП, 2023. – 44 с.

Укладач: Костюк О. П., к.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Костюк О. П.

© О. П. Костюк, 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Водяна пара.....	4
2. Вологе повітря.....	8
3. Витікання та дроселювання парів та газів.....	10
4. Стиск парів та газів.....	12
5. Цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання.....	16
6. Цикли газотурбінних установок.....	21
7. Цикли паросилових установок.....	24
8. Цикли холодильних установок.....	28
Література.....	31
Додатки.....	32

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для формування у студентів практичних навиків при виконанні термодинамічних розрахунків та аналізу ефективності роботи теплових машин та установок. Вони містять короткі теоретичні відомості, приклади розв'язку типових задач та умови задач по дисципліні.

Згідно з законом України про системи одиниць вимірювання, в науці, техніці, промисловості та сільському господарстві дозволяється користуватись інтернаціональною системою одиниць вимірювання (СІ). При обчисленнях необхідно користуватись тільки основними одиницями СІ. Законом дозволяється використання деяких позасистемних одиниць, наприклад, для об'єму – літрами, мілілітрами, для тиску – міліметрами ртутного або водяного стовпа, для часу – хвилинами, годинами, днями та роками і деякими іншими одиницями. При закінченні обчислень їх результат може бути доцільним перевести для зручності в кратні одиниці з приставками мега, мілі, санти, мікро, нано, піко, тера та інші, а також в дозволені позасистемні одиниці вимірювання. При обчисленні назва одиниці записується тільки після результату обчислення.

Для самостійної роботи студентів під керівництвом викладача складені багатоваріантні контрольні задачі. Розділи методичних вказівок відповідають темам практичних занять, які наведені у робочій програмі дисципліни. Кількість та зміст задач визначені на основі досвіду викладання дисципліни на кафедрі теплоенергетики та машиноз-

навства Національного університету водного господарства та природокористування. Окремі задачі мають свої прототипи в раніше опублікованих збірниках задач, які вказані у списку рекомендованої літератури.

При розв'язку задач необхідно:

- записати умову задачі та вихідні дані;
- розв'язок задачі супроводжувати коротким текстом з поясненням та обґрунтуванням вибору розрахункових рівнянь;
- для формул які використовуються дати розшифровку літерних позначень в тій послідовності, в якій вони наведені в рівнянні;
- обрахування виконувати в одиницях СІ; після числового значення розмірної величини як результату розрахунку обов'язково проставити позначення одиниці величини (без взяття її в дужки);
- при запису результатів розрахунку використовувати правила округлення чисел.

Вихідні дані до контрольних задач вибираються в залежності від номера варіанта. Контрольні задачі виконуються рукописним або машинописним способами на аркушах паперу формату А4 або в шкільних зошитах з відведеними полями. При рукописному способі виконання використовують чорнила або пасту одного кольору (синю, фіолетову або чорну). Висота літер складає не менше 2,5 мм, а відстань між рядками – 7–10 мм. Описки та неточності допускається виправляти акуратно підчищенням або зафарбовуванням білою фарбою з написом на підчищеному (зафарбованому) місці виправленого тексту.

1. ВОДЯНА ПАРА

1.1 Завдання

Камера автоклава об'ємом V знаходиться під глибоким вакуумом (тобто, початковий абсолютний тиск у камері $p_0 \cong 0$). Автоклав має температуру t_1 . У деякий момент у його камеру надходять m , кг води при цій же температурі. Вода бурхливо закипає. Через деякий час настає термодинамічна рівновага в системі вода - водяна пара при початковій температурі t_1 . Потім автоклав нагрівають до температури t_3 . Необхідно визначити параметри стану водяної пари в інтервалі температур $t_1 - t_3$, визначити витрачену теплоту. Барометричний тиск рівний p_6 .

Таблиця 1.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	V, м ³	m, кг	t ₁ , °C	t ₃ , °C	p _б мм. Hg.	№ n/n	V, м ³	m, кг	t ₁ , °C	t ₃ , °C	p _б мм. Hg
1	0,35	0,45	10	250	750	14	1,50	3,25	25	240	732
2	0,47	0,85	15	300	745	15	1,40	2,5	35	280	735
3	1,20	2,10	18	240	740	16	0,35	0,65	40	320	740
4	0,72	0,95	20	320	735	17	0,65	0,75	35	340	750
5	0,95	2,00	5	280	755	18	0,45	0,55	25	360	745
6	1,20	3,20	25	200	760	19	0,35	0,30	30	380	750
7	0,85	1,50	30	220	748	20	0,58	1,20	15	400	755
8	0,15	0,50	0	300	745	21	0,90	1,70	15	300	760
9	0,32	1,00	50	340	750	22	1,10	3,2	25	320	762
10	0,90	2,50	15	380	735	23	1,40	1,90	30	280	735
11	0,79	1,40	5	360	740	24	0,85	0,90	35	260	738
12	0,42	1,05	0	300	738	25	0,35	0,45	40	240	748
13	0,55	0,80	10	250	745	26	0,65	1,50	45	320	745

1.2 Приклад

$V = 0,5 \text{ м}^3$; $m = 0,8 \text{ кг}$; $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_3 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_b = 755 \text{ мм.рт.ст.}$

Розв'язання

1. Визначаємо питомі параметри стану.

1.1 Перший стан (вода, поступаючи при заданій температурі t_1 в умови глибокого вакууму, закипає).

Для цього стану маємо температуру насичення $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Згідно з додатком цій температурі відповідають такі параметри водяної пари:

- тиск насичення $p_{н1} = 0,003167 \text{ МПа}$;
- значення питомого об'єму киплячої води та сухої насиченої водяної пари $v_1' = 0,0010030 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_1'' = 43,40 \text{ м}^3/\text{кг}$;
- питоме значення ентальпії киплячої води та сухої насиченої водяної пари $h_1' = 104,8 \text{ кДж/кг}$; $h_1'' = 2546,4 \text{ кДж/кг}$;
- питоме значення ентропії киплячої води та сухої насиченої водяної пари $S_1' = 0,3672 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $S_1'' = 8,5570 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
- степінь сухості пари

$$x_1 = \frac{m_{1n}}{m} = \frac{\rho_1'' \cdot V_{1n}}{m}, \quad (1.1)$$

де ρ_1'' – густина сухої насиченої водяної пари,

$$\rho_1'' = \frac{1}{v_1''} = \frac{1}{43,40} = 0,02304 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

V_{1n} – об'єм, який займає суха насичена водяна пара в камері автоклава

$V_{1n} = V - V_g$, де V_g – об'єм, який займає вода в камері автоклава

$$V_g = v_1' \cdot m = 0,0010030 \cdot 0,8 = 0,0008024 \text{ м}^3.$$

$$V_{1n} = 0,5 - 0,0008024 = 0,4991976 \text{ м}^3.$$

$$x_1 = \frac{0,02304 \cdot 0,4991976}{0,8} = 0,0144 \text{ або } 14,4\%.$$

Якщо при температурі $t_1 = 25^\circ\text{C}$ всю воду $m = 0,8 \text{ кг}$ перевести в стан сухої насиченої водяної пари, то вона займе об'єм рівний

$$V'' = v'' \cdot m = 43,40 \cdot 0,8 = 34,72 \text{ м}^3.$$

Так, як камера автоклава має об'єм $V = 0,5 \text{ м}^3$, то це означає що водяна пара в першому стані є вологою насиченою в якій знаходиться $m_1 \text{ кг}$ сухої насиченої водяної пари.

Манометричний тиск рівний

$$P_{m1} = P_{n1} - P_b = P_{n1} - \rho_{Hg} \cdot g \cdot H = 3167 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,755 = -97562 \text{ Па}.$$

Це означає, що термодинамічна система знаходиться під вакуумом.

1.2 Другий стан (у результаті подальшого підведення теплоти до камери відбувається википання води до стану сухої насиченої пари)

– значення питомого об'єму сухої насиченої водяної пари

$$v_2'' = \frac{V}{m} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Значення питомого об'єму пари знаходиться між двома табличними значеннями, які відповідають температурі 130°C та 135°C , цим температурам відповідають питомі об'єми сухої насиченої водяної пари

$v_{130^\circ\text{C}} = 0,6683 \text{ м}^3/\text{кг}$ та $v_{135^\circ\text{C}} = 0,5820 \text{ м}^3/\text{кг}$. Використовуючи метод

лінійного інтерполювання визначасмо значення температури сухої насиченої водяної пари в другому стані

$$t_2 = 130 + \frac{0,625 - 0,6683}{0,5820 - 0,6683} \cdot (135 - 130) = 132,51^\circ\text{C}.$$

Аналогічним чином визначасмо і інші параметри стану водяної пари

– тиск насичення $p_{н2} = 0,29164 \text{ МПа}$;

– питоме значення ентальпії киплячої води та сухої насиченої водяної пари $h_2' = 553,17 \text{ кДж/кг}$; $h_2'' = 2723,96 \text{ кДж/кг}$;

– питоме значення ентропії киплячої води та сухої насиченої водяної пари $S_1' = 1,6608 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$; $S_1'' = 7,0025 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$;

– степінь сухості пари $x_2 = 1$

Манометричний тиск рівний

$$p_{м2} = 291640 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,755 = 190910,9 \text{ Па} \approx 0,191 \text{ МПа} .$$

1.3 Третій стан (підведення теплоти до сухої насиченої пари перетворює її в перегріту пару)

Тиск перегрітої водяної пари можна визначити з рівняння стану для ідеального газу

$$p_3 = p_3 \frac{RT_3}{\mu} = \frac{0,8}{0,5} \cdot \frac{8314 \cdot (250 + 273,15)}{18} = 386619,5 \text{ Па} \approx 0,3866 \text{ МПа} .$$

2. Визначення питомої витрати теплоти

2.1 Перший стан (вода з температурою $t_1 = 25^\circ \text{C}$, попадаючи в глибокий вакуум $p_0 \cong 0$ закипає і досягає ізотермічно термодинамічної рівноваги). На википання води у цьому етапі витрачається питома кількість теплоти

$$q_1 = r_1 \cdot x_1 = (h_1'' - h_1') \cdot x_1 = (2546,4 - 104,8) \cdot 0,0144 = 35,16 \text{ кДж/кг} .$$

2.2 Другий стан (вода ізохорно википає і досягає стану сухої насиченої пари при температурі t_2)

$$q_2 = C_{pв}(t_2 - t_1) + h_2'' - h_2' = 4,19(132,51 - 25) + 2724,4 - 553,17 = 2621,7 \text{ кДж/кг}$$

2.3 Третій стан (насичена пара ізохорно перегрівается до $t_3 = 250^\circ \text{C}$)

$$q_3 = C_{vm} \Big|_0^{250^\circ \text{C}} \cdot 250 - C_{vm} \Big|_0^{132,51^\circ \text{C}} \cdot 132,51 = 1,445 \cdot 250 - 1,417 \cdot 132,51 = 173,48 \text{ кДж/кг}$$

3. Загальна кількість теплоти необхідна для перетворення $m = 0,8 \text{ кг}$ води з температурою $t_1 = 25^\circ \text{C}$ у перегріту пару з температурою $t_3 = 250^\circ \text{C}$.

$$Q = m \cdot (q_1 + q_2 + q_3) = 0,8 \cdot (35,16 + 2621,7 + 173,48) = 2264,27 \text{ кДж} .$$

2. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

2.1 Завдання

У печі для висушування насіння надходить повітря із навколишнього середовища з температурою t_1 та відносною вологістю φ_1 спочатку нагрівається до температури t_2 , потім повітря перегіає в камеру, де завдяки конвекції висушується насіння, а температура знижується до t_3 . Визначити потужність електропривода вентилятора печі, якщо за годину висушується m кг насіння з вологістю δ , %. Втрати теплоти на нагрівання насіння знехтувати. Коефіцієнт корисної дії установки $\eta_{\text{уст}}$.

Таблиця 2.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	t_1 , $^{\circ}\text{C}$	φ_1 , %	t_2 , $^{\circ}\text{C}$	t_3 , $^{\circ}\text{C}$	m , кг / год	δ , %	$\eta_{\text{уст}}$, %
1	20	45	85	40	120	1,5	80
2	25	35	90	35	80	1,2	75
3	30	40	80	40	150	1,5	70
4	20	50	85	45	50	1,8	77
5	15	55	90	35	75	1,4	80
6	15	60	80	35	100	1,7	82
7	18	55	85	40	90	2,3	65
8	20	60	90	35	150	2,4	70
9	25	45	95	45	75	4,0	74
10	35	55	90	35	50	1,7	80
11	35	45	95	45	120	4,2	67
12	32	55	80	40	70	9,0	82
13	28	50	85	45	130	1,4	65
14	25	60	85	35	80	2,5	70
15	20	55	95	35	150	3,2	75
16	35	65	90	40	90	1,7	80
17	30	45	85	35	75	1,5	75
18	25	50	95	45	120	1,0	85
19	15	70	85	35	85	3,2	78
20	20	65	80	30	120	1,7	75
21	15	40	85	35	60	5,0	65
22	20	45	90	40	85	1,4	68
23	25	50	85	35	130	1,9	72

продовження таблиці 2.1

№ <i>n / n</i>	t_1 , °C	φ_1 , %	t_2 , °C	t_3 , °C	m , кг / год	δ , %	$\eta_{\text{вст}}$, %
24	30	55	90	45	80	1,4	80
25	20	60	80	40	150	1,5	85
26	25	70	85	40	110	1,7	82

2.2 Приклад

$$t_1 = 20^\circ\text{C}; \quad \varphi_1 = 60\%; \quad t_2 = 90^\circ\text{C}; \quad t_3 = 40^\circ\text{C};$$

$$m = 100 \text{ кг / год}; \quad \delta = 4,2\%; \quad \eta_{\text{вст}} = 80\%$$

Розв'язання

1. Розв'язок виконується за допомогою $h-d$ - діаграми вологого повітря [2].

1.1 На $h-d$ - діаграмі на перетині лінії $t_1 = 20^\circ\text{C}$ та кривої відносної вологості повітря $\varphi_1 = 60\%$ знаходимо початкову точку процесу сушки, та визначаємо параметри навколишнього повітря на вході у калорифер $h_1 = 43 \text{ кДж / кг}$ та $d_1 = 9 \text{ гп / кг}$.

1.2 Процес нагрівання повітря відбувається при $d = \text{const}$ від температури t_1 при відносній вологості повітря φ_1 , до температури t_2 при змінній відносній вологості повітря від φ_1 до φ_2 . На перетині ліній вологовмісту $d_1 = 9 \text{ гп / кг} = \text{const}$ та ізотерми $t_2 = 90^\circ\text{C}$ знаходимо точку, яка характеризує стан повітря на виході з калорифера, та визначаємо параметри повітря в даній точці $h_2 = 114 \text{ кДж / кг}$ та $d_2 = d_1 = 9 \text{ гп / кг}$.

1.3 Процес віддачі теплоти на висушування насіння відбувається при $h = \text{const}$, тому провівши лінію постійної вологості з точки, яка характеризує стан повітря на виході з калорифера до перетину з ізотермою $t_3 = 40^\circ\text{C}$ отримаємо точку, яка характеризує стан повітря на виході з сушильної установки. Використовуючи $h-d$ - діаграму визначаємо $h_3 = 114 \text{ кДж / кг}$, $d_3 = 28,2 \text{ гп / кг}$ та $\varphi_3 = 58,7\%$.

1.4 Визначаємо кількість вологи (води), яка випарилася із одного кг сухого повітря

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 28,2 - 9 = 19,2 \text{ гп / кг}.$$

1.5 Визначаємо масу сухого повітря, необхідного для випаровування 1 кг вологи (води)

$$m_{c.n.} = \frac{1000}{\Delta d} = \frac{1000}{19,2} = 52,08 \text{ кг}.$$

1.6 Визначаємо витрату теплоти на нагрівання 1 кг сухого повітря

$$q_{c.n.} = h_3 - h_1 = 114 - 43 = 71 \text{ кДж / кг}.$$

1.7 Визначаємо витрату теплоти для випаровування 1 кг вологи

$$q_{c.n.} = m_{c.n.} \cdot q_{c.n.} = 52,08 \cdot 71 = 3697,7 \text{ кДж / кг} \approx 3,7 \text{ МДж / кг}.$$

1.8 Визначаємо масу вологи в насінні

$$m_{в.н.} = \frac{m \cdot \delta}{100} = \frac{100 \cdot 4,2}{19,2} = 4,2 \text{ кг}.$$

1.9 Визначаємо витрату теплоти для випаровування 4,2 кг вологи із насіння

$$Q = m_{в.н.} \cdot q_{c.n.} = 4,2 \cdot 3,7 \cdot 10^6 = 15,54 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг} = 15,54 \text{ МДж / кг}.$$

1.10 Потужність електропривода вентилятора печі

$$N = \frac{Q}{3600 \cdot \eta_{уст}} \cdot 100 = \frac{15,54 \cdot 10^6}{3600 \cdot 80} = 5395,8 \text{ Вт} \approx 5,4 \text{ кВт}.$$

3. ВИТІКАННЯ ТА ДРОСЕЛЮВАННЯ ПАРІВ ТА ГАЗІВ

3.1 Завдання

В резервуарі, який заповнений киснем, підтримується тиск p_1 . Повітря витікає через сопло, яке звужується в атмосферу з тиском p_2 . Початкова температура кисню t_1 . Визначити теоретичну швидкість витікання та витрату газу, якщо площа вихідного перерізу сопла f . Визначити також теоретичну швидкість витікання кисню та його витрату, якщо витікання відбуватиметься в атмосферу. Барометричний тиск прийняти рівним $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$. В обох випадках витікання рахувати адіабатним.

Таблиця 3.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_1 , °C	f , мм ²	№ n/n	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_1 , °C	f , мм ²
1	3	2	70	20	14	8	7	100	50
2	3,5	3	75	25	15	7,5	6	95	60
3	4	2	80	30	16	6	5	90	45
4	4,5	3	85	35	17	6,5	5	85	40

продовження таблиці 3.1

№ n / n	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_1 , °C	f , мм ²	№ n / n	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_1 , °C	f , мм ²
5	5	4	90	40	18	9	7	80	35
6	5,5	4	95	45	19	10	8	75	30
7	6	5	100	50	20	5	4	70	20
8	6,5	5	90	55	21	4,5	3	65	25
9	7	6	80	60	22	4	3	60	15
10	7,5	7	70	65	23	5,5	4	55	60
11	8	7	60	70	24	6	5	50	55
12	8,5	6	50	75	25	7	6	45	70
13	9	8	40	80	26	10	9	90	85

3.2 Приклад

$p_1 = 5 \text{ МПа}$; $p_2 = 5 \text{ МПа}$; $t_1 = 100^\circ \text{C}$; $f = 20 \text{ мм}^2$; $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Розв'язання

1. Визначаємо відношення тисків та порівнюємо його з критичним значенням тисків для двоатомних газів

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{4 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 0,8 > \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = 0,528,$$

відповідно швидкість витікання менше критичної.

2. Визначаємо швидкість витікання кисню

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (3.1)$$

де v_1 – питомий об'єм кисню, визначаємо з характеристичного рівняння стану для 1 кг.

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314 \cdot 373}{32 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,0194 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Підставляємо всі відомі величини у формулу (3.1) і отримаємо

$$\omega = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0194 \left(1 - \left(\frac{4 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right)} = 205 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3. Визначаємо секундну витрату кисню

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}. \quad (3.2)$$

$$M = 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,0194} \left(\left(\frac{4 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{4 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right)} = 0,175 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

4. Визначаємо відношення тисків при витіканні кисню в атмосферу та порівнюємо його з критичним значенням тисків для двоатомних газів

$$\frac{p_6}{p_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 0,02 < \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = 0,528,$$

відповідно швидкість витікання буде рівна критичній, а витрата буде максимально можливою.

5. Визначаємо швидкість витікання кисню

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0194} = 336,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

6. Секундна витрата кисню

$$M_{\text{max}} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad (3.3)$$

$$M_{\text{max}} = 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,0194} \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}}} = 0,22 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

4. СТИСК ПАРІВ ТА ГАЗІВ

4.1 Завдання

Подача повітряного поршневого компресора V_1 визначена при початкових параметрах повітря: p_1 і t_1 , тиск в кінці процесу стиску рівний p_2 . Визначити питомий об'єм та значення питомої ентропії перед початком стиску; питомі об'єми, температури та значення питомої ентропії стисненого повітря; об'ємний к.к.д. компресора, теоретичну потужність затрачену на привід компресора, а також тепловий потік, при охолодженні повітря що стискається, витрату води на охо-

лодження компресора прийнявши що температура води збільшується на Δt . Розрахунки виконати для випадку ізотермічного, політропного та адіабатного процесу стиску, показник політропи прийняти рівним n , відносний об'єм шкідливого простору a .

Таблиця 4.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	p_1 , кПа	t_1 , °C	p_2 , кПа	V_1 , м ³ /год	n	Δt , °C	a
1	120	25	850	240	1,2	10	0,08
2	95	35	900	235	1,1	12	0,075
3	130	20	800	240	1,15	15	0,07
4	120	30	850	145	1,2	14	0,077
5	115	25	900	135	1,3	14	0,08
6	95	30	800	235	1,25	15	0,082
7	98	15	850	240	1,3	13	0,075
8	100	20	950	235	1,1	10	0,08
9	125	35	950	145	1,15	10	0,10
10	135	25	900	335	1,2	15	0,12
11	135	15	950	245	1,2	12	0,14
12	130	35	850	140	1,3	10	0,10
13	98	20	850	145	1,3	14	0,085
14	95	30	800	235	1,25	15	0,08
15	100	35	950	300	1,2	12	0,075
16	95	25	900	400	1,1	14	0,08
17	100	15	850	350	1,1	15	0,075
18	105	10	950	450	1,2	10	0,085
19	115	30	800	350	1,3	12	0,08
20	120	25	800	300	1,2	15	0,075
21	115	30	850	235	1,15	12	0,085
22	120	35	900	240	1,1	14	0,08
23	125	30	850	350	1,3	12	0,085
24	100	25	900	450	1,25	14	0,08
25	120	20	800	400	1,2	15	0,085
26	95	10	850	400	1,1	12	0,082

4.2 Приклад

$$p_1 = 100 \text{ кПа}; \quad t_1 = 30^\circ \text{C}; \quad p_2 = 700 \text{ кПа}; \quad V_1 = 240 \text{ м}^3 / \text{год};$$

$$\Delta t = 10^0 C; \quad n = 1,1; \quad a = 0,1.$$

Розв'язання

1. Визначаємо питому масову ізобарну та ізохорну теплоємність повітря

$$C_p = \frac{7}{2} R = \frac{7}{2} \cdot \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{7}{2} \cdot \frac{8314}{28,96} = 1004,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$C_v = \frac{5}{2} R = \frac{5}{2} \cdot \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8314}{28,96} = 717,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,7177 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

2. Параметри стану повітря перед початком стиску

питомий об'єм $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314}{28,96} \cdot 303,15 = 0,870 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$

питоме значення ентропії

$$s_1 = C_p \ln \frac{T_1}{T_n} - R \ln \frac{p_1}{p_n} = 1,005 \ln \frac{303,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,325} = 0,108 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

3. Визначаємо параметри стисненого повітря

3.1 Ізотермічний процес стиску

температура $T_2 = T_1 = 303,15 \text{ К};$

питомий об'єм $v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8314}{28,96} \cdot 303,15 = 0,124 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$

питоме значення ентропії

$$s_2 = C_p \ln \frac{T_2}{T_n} - R \ln \frac{p_2}{p_n} = 1,005 \ln \frac{303,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,325} = -0,45 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

3.2 Політропний процес стиску

температура $T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 303,15 \cdot \left(\frac{700}{100} \right)^{\frac{1,1-1}{1,1}} = 362 \text{ К};$

питомий об'єм $v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8314}{28,96} \cdot 362 = 0,148 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$

питоме значення ентропії

$$s_2 = C_p \ln \frac{T_2}{T_n} - R \ln \frac{p_2}{p_n} = 1,005 \ln \frac{362}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,325} = -0,27 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}};$$

питома робота затрачена на привід компресора

$$l = -\frac{n}{n-1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{1,1}{1,1-1} \cdot \frac{8314}{28,96} \cdot (362 - 303,15) = 185844,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \approx 185,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

3.3 Адіабатний процес стиску

температура $T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 303,15 \cdot \left(\frac{700}{100}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 528\text{K}$;

питомий об'єм $v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{\frac{8314}{28,96} \cdot 528}{0,7 \cdot 10^6} = 0,216 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

питоме значення ентропії

$$s_2 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 1,005 \ln \frac{528}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,325} = -0,108 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

4. Питома робота затрачена на стиск повітря

4.1 Ізотермічний процес стиску

$$l = RT_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{8314}{28,96} \cdot 303,15 \cdot \ln \frac{700}{100} = 169351,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \approx 169,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

4.2 Політропний процес стиску

$$l = -\frac{n}{n-1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{1,1}{1,1-1} \cdot \frac{8314}{28,96} \cdot (362 - 303,15) = 185844,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \approx 185,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

4.3 Адіабатний процес стиску

$$l = -\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{8314}{28,96} \cdot (528 - 303,15) = 225929,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \approx 226 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

5. Масова секундна витрата повітря

$$M_1 = \frac{V_1}{3600 \cdot v_1} = \frac{240}{3600 \cdot 0,87} = 0,0766 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

6. Теоретична потужність двигуна на привід компресора

$$N = lM_1, \tag{4.1}$$

6.1 Ізотермічний процес стиску

$$N = 169,4 \cdot 0,0766 = 12,98 \text{кВт}$$

6.2 Політропний процес стиску

$$N = 185,8 \cdot 0,0766 = 14,23 \text{кВт}$$

6.3 Адіабатний процес стиску

$$N_1 = 226 \cdot 0,0766 = 17,31 \text{кВт}$$

7. Тепловий потік який відводиться від повітря в процесі стиску

7.1 Ізотермічний процес стиску

$$Q = L = l \cdot M_1 = 169,4 \cdot 0,0766 = 12,98 \text{ кВт} .$$

7.2 Політропний процес стиску

$$Q = M_1 \cdot C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = 0,0766 \cdot 0,7177 \cdot \frac{1,1-1,4}{1,1-1} \cdot (362 - 303,15) = 9,8 \text{ кВт} .$$

7.3 Адіабатний процес стиску

$$Q = 0 \text{ кВт} .$$

8. Витрата води на охолодження компресора

$$M_6 = \frac{3600 \cdot Q}{C_6 \cdot \Delta t} , \quad (4.2)$$

де C_6 – середня ізобарна масова теплоємність води, $C_6 = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кгК})$

8.1 Ізотермічний процес стиску

$$M_6 = \frac{3600 \cdot 12,98}{4,19 \cdot 10} = 1115,2 \frac{\text{кг}}{\text{год}} .$$

8.2 Політропний процес стиску

$$M_6 = \frac{3600 \cdot 9,8}{4,19 \cdot 10} = 842 \frac{\text{кг}}{\text{год}} .$$

8.3 Адіабатний процес стиску

$$M_6 = 0 \frac{\text{кг}}{\text{год}} .$$

9. Об'ємний к.к.д. компресора

$$\lambda_v = 1 - a \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) = 1 - 0,1 \left(\left(\frac{700}{100} \right)^{\frac{1}{1,1}} - 1 \right) = 0,514$$

5. ЦИКЛИ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

5.1 Завдання

В ідеальному циклі поршневого ДВЗ з змішаним підводом теплоти, відомий початковий тиск p_1 та температура t_1 , степінь стиску $\varepsilon = v_1/v_2$, степінь підвищення тиску $\lambda = p_3/p_2$, степінь попереднього розширення $\rho = v_4/v_3$. Визначити параметри в характерних точках циклу, корисну роботу циклу, термічний к.к.д., кількість підведеної і відведеної теплоти, якщо робоче тіло – повітря. Залежність теплоємності від температури – постійна.

Таблиця 5.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	p_1 , МПа	t_1 , °C	λ	ρ	ε	№ n/n	p_1 , МПа	t_1 , °C	λ	ρ	ε
1	0,1	12	1,2	1,2	6	14	0,1	30	1,4	2,0	7
2	0,095	13	1,5	1,4	7	15	0,095	27	1,5	1,9	8
3	0,09	15	1,3	1,5	8	16	0,094	25	1,6	1,8	9
4	0,1	15	1,4	1,7	9	17	0,098	24	1,7	1,5	10
5	0,098	17	1,6	1,9	10	18	0,1	23	1,8	1,4	11
6	0,095	19	1,7	2,0	12	19	0,11	20	1,9	1,2	12
7	0,097	20	1,8	1,2	14	20	0,12	17	2,0	1,3	14
8	0,1	22	1,9	1,3	15	21	0,1	15	1,4	1,7	15
9	0,12	24	2,0	1,4	16	22	0,098	13	1,5	1,9	16
10	0,1	25	1,8	1,5	17	23	0,097	23	1,6	1,4	17
11	0,095	27	1,7	1,6	18	24	0,098	27	1,7	1,5	18
12	0,098	30	1,6	1,7	20	25	0,1	30	1,8	2,0	20
13	0,095	17	1,5	1,9	19	26	0,1	28	1,9	2,0	12

5.2 Приклад

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}; \quad t_1 = 27^\circ \text{C}; \quad \varepsilon = 12,7; \quad \lambda = 1,4; \quad \rho = 1,6.$$

Розв'язання

1. Зобразимо цикл ДВЗ в $p-v$ та $T-s$ координатах

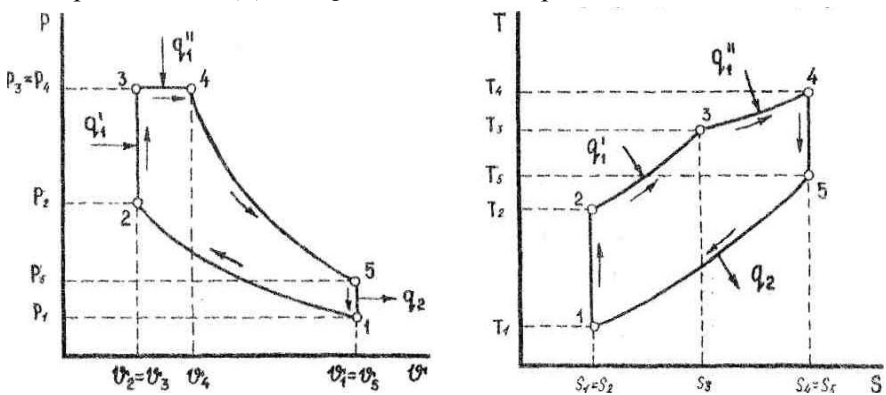


Рис. 5.1 Цикл поршневого ДВЗ з змішаним підводом теплоти в

$p-v$ та $T-s$ координатах

2. Визначаємо параметри стану в характерних точках циклу

Точка 1 (стан повітря на початку всмоктування в циліндр двигуна):

тиск $p_1 = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа}$;

температура $T_1 = 27 + 273,15 = 300,15 \text{ К}$;

$$\text{питомий об'єм} \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314}{28,96} \cdot \frac{300,15}{0,1 \cdot 10^6} = 0,862 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\begin{aligned} \text{питоме значення ентропії} \quad s_1 &= C_p \ln \frac{T_1}{T_n} - R \ln \frac{p_1}{p_n} = \frac{7}{2} R \ln \frac{T_1}{T_n} - R \ln \frac{p_1}{p_n} = \\ &= \frac{7}{2} \cdot 0,287 \ln \frac{300,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,325} = 0,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}. \end{aligned}$$

Точка 2 (стан повітря в кінці процесу стиску):

$$\text{питомий об'єм} \quad v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,862}{12,7} = 0,068 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\text{тиск} \quad p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k = 0,1 \cdot 12,7^{1,4} = 3,51 \text{ МПа};$$

$$\text{температура} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} = 300,15 \cdot 12,7^{1,4-1} = 830 \text{ К};$$

питоме значення ентропії

$$s_2 = \frac{7}{2} \cdot 0,287 \ln \frac{830}{273,15} - 0,287 \ln \frac{3510}{101,325} = 0,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

Точка 3 (стан робочого тіла в кінці процесу ізохорного підводу теплоти):

$$\text{питомий об'єм} \quad v_2 = v_3 = 0,068 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

тиск $p_3 = p_2 \lambda = 3510 \cdot 1,4 = 4910 \text{ кПа} = 4,91 \text{ МПа}$;

температура $T_3 = T_2 \lambda = 830 \cdot 1,4 = 1162 \text{ К}$;

питоме значення ентропії

$$s_3 = \frac{7}{2} \cdot 0,287 \ln \frac{1162}{273,15} - 0,287 \ln \frac{4910}{101,325} = 0,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

Точка 4 (стан робочого тіла в кінці процесу ізобарного підводу теплоти):

$$\text{питомий об'єм } v_4 = v_3 \rho = 0,068 \cdot 1,6 = 0,109 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\text{тиск } p_4 = p_3 = 4910 \text{ кПа} = 4,91 \text{ МПа};$$

$$\text{температура } T_4 = T_3 \rho = 1162 \cdot 1,6 = 1859 \text{ К};$$

питоме значення ентропії

$$s_4 = \frac{7}{2} 0,287 \ln \frac{1859}{273,15} - 0,287 \ln \frac{4910}{101,325} = 0,814 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

Точка 5 (стан робочого тіла в кінці процесу адіабатного розширення):

$$\text{питомий об'єм } v_5 = v_1 = 0,068 \cdot 1,6 = 0,862 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\text{тиск } p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = 4910 \cdot \left(\frac{0,109}{0,862} \right)^{1,4} = 272 \text{ кПа} = 0,272 \text{ МПа};$$

$$\text{температура } T_5 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = 1859 \cdot \left(\frac{0,109}{0,862} \right)^{1,4-1} = 815 \text{ К};$$

питоме значення ентропії

$$s_4 = \frac{7}{2} 0,287 \ln \frac{815}{273,15} - 0,287 \ln \frac{272}{101,325} = 0,815 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

3. Визначаємо теплоту та роботу у процесах, які складають цикл

3.1 Адіабатний процес 1-2

$$\text{- питома теплота } q_{1-2} = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\text{- питома робота } l_{1-2} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{0,287}{1,4-1} (300,15 - 830) = -380,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Знак «мінус» вказує на те, що робота затрачається зовні на стиск робочого тіла.

3.2 Ізохорний процес 2-3

- питома теплота

$$q_{2-3} = C_v (T_3 - T_2) = \frac{5}{2} R (T_3 - T_2) = \frac{5}{2} 0,287 (1162 - 830) = 238,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\text{- питома робота } l_{2-3} = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3.3 Ізобарний процес 3-4

- питома теплота

$$q_{3-4} = C_p (T_4 - T_3) = \frac{7}{2} R (T_4 - T_3) = \frac{7}{2} 0,287 (1859 - 1162) = 700,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

- питома робота $l_{3-4} = P_3 (v_4 - v_3) = 4910 (0,109 - 0,068) = 201,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3.4 Адіабатний процес 4-5

- питома теплота $q_{4-5} = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

- питома робота $l_{4-5} = \frac{R}{k-1} (T_4 - T_5) = \frac{0,287}{1,4-1} (1859 - 815) = 749,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3.5 Ізохорний процес 5-1

- питома теплота

$$q_{5-1} = C_v (T_1 - T_5) = \frac{5}{2} R (T_1 - T_5) = \frac{5}{2} 0,287 (300,15 - 815) = -369,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Знак «мінус» вказує на те, що теплота відводиться від робочого тіла.

- питома робота $l_{5-1} = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

4. Питома робота циклу

$$l = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1} = -380,2 + 0 + 201,3 + 749,1 + 0 = 570,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5. Питома теплота підведена до робочого тіла в циклі

$$q = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-5} = 0 + 238,2 + 700,1 + 0 = 938,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = \frac{l}{q} = \frac{570,2}{938,2} = 0,608 \text{ або } 60,8\%.$$

Перевірка.

Питома робота циклу $l = q - q_{5-1} = 938,2 - |-369,4| = 568,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{k\rho^k - 1}{k-1+k\lambda(\rho-1)} = 1 - \frac{1}{12,7^{1,4-1}} \cdot \frac{1,4 \cdot 1,6^{1,4} - 1}{1,4-1+1,4 \cdot 1,4(1,6-1)} = 0,608.$$

Отримане значення роботи циклу достатньо близьке з розрахованим раніше (похибка в результатах розрахунку не перевищує 0,2%).

6. ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

6.1 Завдання

Для ідеального циклу ГТУ з підводом теплоти при сталому тиску визначити параметри робочого тіла (повітря) в характерних точках циклу, питому кількість підведеної та відведеної теплоти, питому роботу, термічний к.к.д., теоретичну потужність ГТУ. Початковий тиск та температура відповідно рівні p_1 та t_1 . Степінь підвищення тиску в компресорі $\lambda = p_2 / p_1$, температура робочого тіла перед турбіною t_3 , витрата робочого тіла m . Зобразити цикл в $p-v$ та $T-s$ -діаграмі. Залежність теплоємності від температури прийняти постійною.

Таблиця 6.1

Індивідуальні завдання

№ <i>n/n</i>	p_1 , МПа	t_1 , °C	t_3 , °C	λ	m	№ <i>n/n</i>	p_1 , МПа	t_1 , °C	t_3 , °C	λ	m
1	0,1	12	600	6	20	14	0,1	30	840	9	42
2	0,095	13	620	6,5	22	15	0,095	27	860	10	45
3	0,09	15	640	7	24	16	0,094	25	850	8	47
4	0,1	15	650	7,5	25	17	0,098	24	840	12	50
5	0,098	17	670	8	27	18	0,1	23	650	14	55
6	0,095	19	680	8,5	29	19	0,11	20	680	9	59
7	0,097	20	700	9	28	20	0,12	17	700	6	60
8	0,1	22	720	9,5	30	21	0,1	15	675	7,5	62
9	0,12	24	740	10	32	22	0,098	13	600	6,5	65
10	0,1	25	760	11	34	23	0,097	23	625	9	67
11	0,095	27	780	12	35	24	0,098	27	700	10	70
12	0,098	30	800	10	37	25	0,1	30	725	11	80
13	0,095	17	820	8	40	26	0,1	28	750	12	90

6.2 Приклад

$$p_1 = 100 \text{ кПа}; \quad t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \lambda = 10; \quad m = 25 \text{ кг/с} .$$

Розв'язання

1. Зобразимо цикл ГТУ в $p-v$, $T-s$ та координатах (рис.6.1)

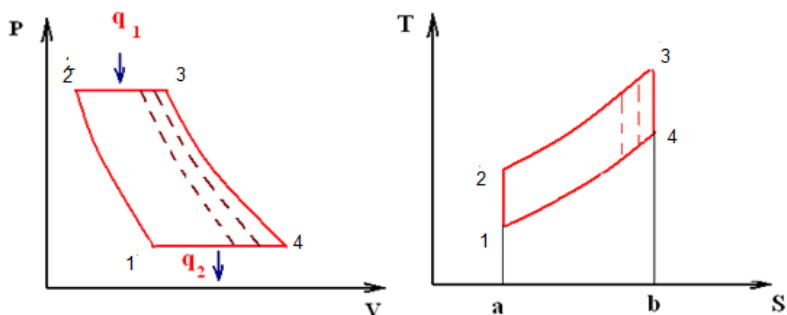


Рис. 6.1 Цикл ГТУ з ізобарним підводом теплоти в $p-v$ та $T-s$ координатах

2. Визначаємо параметри стану в характерних точках циклу

Точка 1 (стан повітря на початку всмоктування в компресор):

тиск $p_1 = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа}$;

температура $T_1 = 27 + 273,15 = 300,15 \text{ К}$;

питомий об'єм $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314}{28,96} \cdot \frac{300,15}{0,1 \cdot 10^6} = 0,862 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

питоме значення ентропії $s_1 = C_p \ln \frac{T_1}{T_n} - R \ln \frac{p_1}{p_n} = \frac{7}{2} R \ln \frac{T_1}{T_n} - R \ln \frac{p_1}{p_n} =$
 $= \frac{7}{2} \cdot 0,287 \ln \frac{300,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,325} = 0,098 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Точка 2 (стан повітря в кінці процесу стиску в компресорі):

тиск $p_2 = p_1 \lambda = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ кПа} = 1 \text{ МПа}$;

температура $T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \lambda^{\frac{k-1}{k}} = 300,15 \cdot 10^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 579 \text{ К}$;

питомий об'єм $v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8314}{28,96} \cdot \frac{579}{1 \cdot 10^6} = 0,166 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

питоме значення ентропії

$$s_2 = \frac{7}{2} \cdot 0,287 \ln \frac{579}{273,15} - 0,287 \ln \frac{1000}{101,325} = 0,097 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

Точка 3 (стан робочого тіла в кінці процесу ізобарного підводу теплоти):

температура $T_3 = t_3 + 273,15 = 973,15 \text{ K}$

тиск $p_3 = p_2 = 1000 \text{ кПа} = 1 \text{ МПа}$

$$\text{питомий об'єм} \quad v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{8314}{28,96} \frac{973,15}{1 \cdot 10^6} = 0,279 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

питоме значення ентропії

$$s_3 = \frac{7}{2} 0,287 \ln \frac{973,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{1000}{101,325} = 0,62 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

Точка 4 (стан робочого тіла в кінці процесу адиабатного розширення):

тиск $p_4 = p_1 = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа}$

$$\text{температура} \quad T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 973,15 \cdot \left(\frac{100}{1000} \right)^{1,4-1} = 504 \text{ K};$$

$$\text{питомий об'єм} \quad v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{8314}{28,96} \frac{504}{1 \cdot 10^5} = 1,447 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

питоме значення ентропії

$$s_4 = \frac{7}{2} 0,287 \ln \frac{504}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,325} = 0,62 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

3. Питома кількість підведеної теплоти в ізобарному процесі 2-3

$$q_{3-2} = C_p (T_3 - T_2) = \frac{7}{2} R (T_3 - T_2) = \frac{7}{2} 0,287 (973,15 - 579) = 395,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

4. Питома кількість відведеної теплоти в ізобарному процесі 4-1

$$q_{4-1} = C_p (T_4 - T_1) = \frac{7}{2} R (T_4 - T_1) = \frac{7}{2} 0,287 (504 - 300,15) = 204,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5. Питома робота циклу

$$l = q_{3-2} - q_{4-1} = 395,9 - 204,8 = 191,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = \frac{l}{q_{3-2}} = \frac{191,1}{395,9} = 0,483 \text{ або } 48,3\%.$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{1}{10^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 0,483.$$

7. Теоретична потужність ГТУ

$$N = lm = 191,1 \cdot 25 = 4777,5 \text{ кВт} \approx 4,8 \text{ МВт}.$$

7. ЦИКЛИ ПАРΟΣИЛОВИХ УСТАНОВОК

7.1 Завдання

Розрахувати ідеальний цикл паросилової установки – цикл Ренкіна, згідно заданим початковим параметрам перегрітої водяної пари p_1 та t_1 , та заданому значенню тиску пари в конденсаторі p_2 . Визначити параметри стану води та водяної пари (p, t, v, h, s, u, x) в характерних точках циклу, питому роботу циклу, питому кількість підведеної теплоти, термічний к.к.д. та питому витрату пари. Питомою роботою насоса знехтувати. Зобразити цикл в $p-v, T-s, h-s$ координатах.

Таблиця 7.1

Індивідуальні завдання

№ <i>n/n</i>	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , кПа	№ <i>n/n</i>	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , кПа
1	4,5	490	4,0	14	5,0	500	10,0
2	2,0	480	3,0	15	4,0	450	4,0
3	3,0	450	4,5	16	4,5	470	4,5
4	3,5	470	4,5	17	1,5	410	5,0
5	1,5	440	5,0	18	2,0	460	6,0
6	2,5	430	7,0	19	3,0	470	8,0
7	4,0	420	8,0	20	2,5	430	10,0
8	5,0	500	10,0	21	3,5	460	9,0
9	3,5	410	12,0	22	4,5	480	5,0
10	2,0	450	4,0	23	5,0	500	7,0
11	4,5	470	5,0	24	4,0	480	8,0
12	4,0	480	7,0	25	3,5	460	9,0
13	3,5	500	8,0	26	3,0	450	4,0

7.2 Приклад

$$p_1 = 5 \text{ МПа}; \quad t_1 = 500^\circ\text{C}; \quad p_2 = 10 \text{ кПа};$$

Розв'язання

1. Зобразимо цикл ПСУ в $p-v, T-s$ та $h-s$ координатах

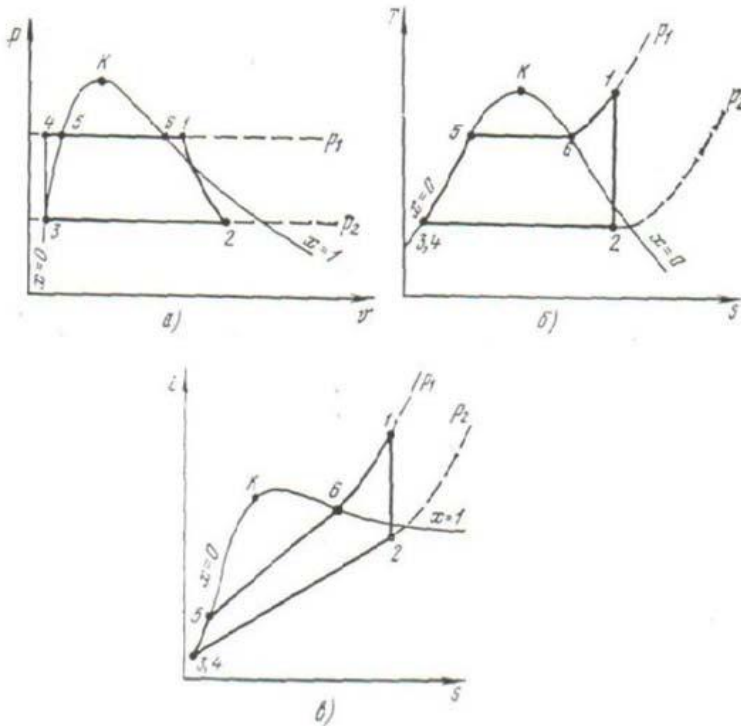


Рис.7.1 Цикл Ренкіна

а) діаграма $p-v$; б) діаграма $T-s$; в) діаграма $h-s$.

2. Визначаємо параметри стану в характерних точках циклу використовуючи $h-s$ -діаграму водяної пари та таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари:

Точка 1 (стан перегрітої пари на вході в парову турбину), параметри перегрітої пари визначаємо за допомогою $h-s$ -діаграми по заданим початковим значенням тиску та температури:

тиск $p_1 = 5 \text{ МПа}$;

температура $t_1 = 500^\circ\text{C}$;

питомий об'єм $v_1 = 0,0685 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_1 = 3433,8 \text{ кДж} / \text{кг}$;

питоме значення ентропії $s_1 = 6,98 \text{ кДж} / (\text{кгК})$;

питоме значення внутрішньої енергії

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3433,8 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,0685 = 3091,3 \text{ кДж / кг} .$$

Точка 2 (стан пари на виході з парової турбіни), параметри вологої насиченої пари визначаємо за допомогою $h-s$ -діаграми по заданим значенням тиску пари в кінці процесу розширення та ентропії пари:

тиск $p_2 = 10 \text{ кПа}$;

температура $t_2 = 45,8^\circ \text{C}$;

питомий об'єм $v_2 = 22,727 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_2 = 2210,1 \text{ кДж / кг}$;

питоме значення ентропії $s_2 = s_1 = 6,98 \text{ кДж / (кгК)}$;

питоме значення внутрішньої енергії

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2210,1 - 10 \cdot 22,727 = 1982,8 \text{ кДж / кг} .$$

ступінь сухості водяної пари $x_2 = 0,844$.

Точка 3 (стан конденсату після конденсатора парової турбіни), параметри конденсату визначаємо за допомогою таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари по заданому значенню p_2 :

тиск $p_3 = p_2 = 10 \text{ кПа}$;

температура $t_3 = t_2 = 45,8^\circ \text{C}$;

питомий об'єм $v_3 = 0,00101 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_3 = 191,8 \text{ кДж / кг}$;

питоме значення ентропії $s_3 = 0,65 \text{ кДж / (кгК)}$;

питоме значення внутрішньої енергії

$$u_3 = h_3 - p_3 v_3 = 191,8 - 10 \cdot 0,00101 = 191,79 \text{ кДж / кг} .$$

ступінь сухості водяної пари $x_3 = 0$.

Точка 4 (стан не киплячої рідини), параметри конденсату визначаємо за допомогою таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари по заданому значенню p_2 :

тиск $p_4 = p_1 = 5 \text{ МПа}$;

температура $t_4 = t_3 = 45,8^\circ \text{C}$;

питомий об'єм $v_4 = v_3 = 0,00101 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_4 = h_3 = 191,8 \text{ кДж / кг}$;

питоме значення ентропії $s_4 = s_3 = 0,65 \text{ кДж / (кгК)}$;

питоме значення внутрішньої енергії $u_4 = u_3 = 191,79 \text{ кДж / кг}$.

ступінь сухості водяної пари $x_4 = x_3 = 0$.

Точка 5 (конденсат в стані насичення), параметри киплячої рідини визначаємо за допомогою таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари по заданому значенню p_1 :

тиск $p_5 = p_4 = 5 \text{ МПа}$;

температура $t_5 = 263,9 \text{ }^\circ\text{C}$;

питомий об'єм $v_5 = 0,00129 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_5 = 1154,6 \text{ кДж} / \text{кг}$;

питоме значення ентропії $s_5 = 2,92 \text{ кДж} / (\text{кгК})$;

питоме значення внутрішньої енергії

$$u_5 = h_5 - p_5 v_5 = 1154,6 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,00129 = 1148,2 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

ступінь сухості водяної пари $x_5 = 0$.

Точка 6 (стан сухої насиченої водяної пари), параметри киплячої рідини визначаємо за допомогою таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари по заданому значенню p_1 :

тиск $p_6 = p_5 = 5 \text{ МПа}$;

температура $t_6 = t_5 = 263,9 \text{ }^\circ\text{C}$;

питомий об'єм $v_6 = 0,0394 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

питоме значення ентальпії $h_6 = 2792,8 \text{ кДж} / \text{кг}$;

питоме значення ентропії $s_6 = 5,97 \text{ кДж} / (\text{кгК})$;

питоме значення внутрішньої енергії

$$u_6 = h_6 - p_6 v_6 = 2792,8 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,0394 = 2595,8 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

ступінь сухості водяної пари $x_6 = 1$.

3. Питома робота пари

$$l = h_1 - h_2 = 3433,8 - 2210,1 = 1223,7 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

4. Питома кількість підведеної теплоти

$$q = h_1 - h_3 = 3433,8 - 191,8 = 3242 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

5. Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = \frac{l}{q} = \frac{1223,7}{3242} = 0,377 \text{ або } 37,7\%.$$

6. Питома витрата пари

$$d = \frac{3600}{h_1 - h_2} = \frac{3600}{3433,8 - 2210,1} = 2,94 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}.$$

8. ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК

8.1 Завдання

В компресор холодильної машини надходить сухий насичений пар хладону $R12$ з температурою $t_1 = -17^\circ\text{C}$ та адіабатно стискається до тиску, який рівний температурі насичення $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Після повної конденсації в конденсаторі (переохолодження конденсату в конденсаторі не передбачене) хладон надходить у терморегулюючий вентиль.

Визначити параметри в характерних точках циклу, холодильний коефіцієнт, холодопродуктивність, масову витрату хладону та теоретичну потужність приводу компресора холодильної машини, якщо холодопродуктивність машини рівна $Q = 140 \text{ кВт}$. Виконати розрахунок для випадку неповного випаровування у випаровувачі (в компресор холодильної машини надходить вологий насичений пар хладону), та порівняти отримані результати. Зобразити цикл в $T-s$ -координатах.

Таблиця 8.1

Індивідуальні завдання

№ n/n	$t_1,$ $^\circ\text{C}$	$t_2,$ $^\circ\text{C}$	$Q,$ кВт	№ n/n	$t_1,$ $^\circ\text{C}$	$t_2,$ $^\circ\text{C}$	$Q,$ кВт
1	0	10	10	14	-22	15	75
2	-5	15	15	15	-25	10	80
3	-10	20	20	16	-30	20	85
4	-15	25	25	17	-28	25	90
5	-18	30	30	18	-25	30	95
6	-20	35	35	19	-20	35	100
7	-25	30	40	20	-18	30	110
8	-30	25	45	21	-15	25	120
9	-35	20	50	22	-12	20	130
10	-40	15	55	23	-10	15	140
11	-28	10	60	24	-5	10	150
12	-25	20	65	25	-25	30	160
13	-30	25	70	26	-30	35	170

8.2 Приклад

$$t_1 = -17^\circ\text{C}; \quad t_2 = 30^\circ\text{C}; \quad Q = 140 \text{ кВт}.$$

Розв'язання

1. Зобразимо цикл холодильної установки з повним та неповним випаруванням у випарувачі в $T-s$ координатах (рис.7.1).

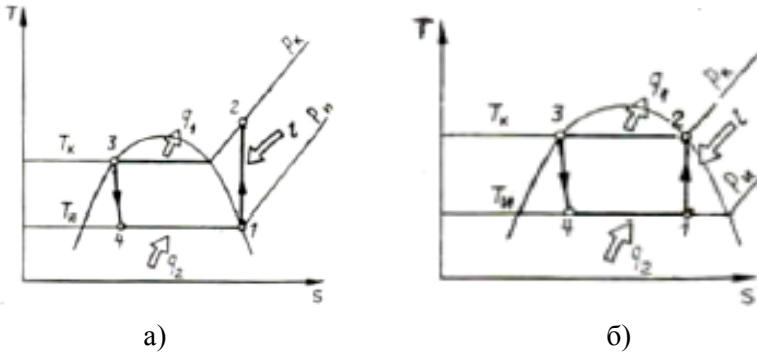


Рис.8.1 Парокомпресорна холодильна машина
 а) цикл з повним випаруванням у випарувачі;
 б) цикл з неповним випаруванням у випарувачі.

Цикл з повним випаруванням у випарувачі

2. Визначасмо параметри хладону в характерних точках циклу використовуючи таблицю теплофізичних властивостей хладону на лінії насичення

Точка 1 (стан хладону на вході в компресор) при температурі $t_1 = -17^{\circ}\text{C}$ виписуємо властивості сухої насиченої пари хладону:

$$p_1 = 0,17 \text{ МПа}; \quad h_1 = h_1'' = 544,4 \text{ кДж/кг}; \quad s_1 = s_1'' = 4,566 \text{ кДж/(кгК)};$$

$$v_1 = v_1'' = 0,098 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3 (стан рідкого хладону при температурі насичення) при температурі $t_3 = 30^{\circ}\text{C}$ виписуємо властивості рідкого хладону:

$$p_3 = 0,744 \text{ МПа}; \quad h_3 = h_3' = 429,1 \text{ кДж/кг}; \quad s_3 = s_3' = 4,010 \text{ кДж/(кгК)};$$

$$v_3 = v_3' = 0,0008 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2 (стан хладону на виході з компресора) параметри визначаємо за допомогою ентропійної $h-s$ діаграми на перетині ізобари

$$p_2 = p_3 = 0,744 \text{ МПа} \quad \text{та} \quad s_2 = s_1 = s_1'' = 4,566 \text{ кДж/(кгК)}; \quad t_2 = 35^{\circ}\text{C},$$

$$h_2 = 571 \text{ кДж/кг}.$$

Точка 4 (стан хладону на виході з терморегулюючого вентиля). Так як в процесі дроселювання $h = const$ то $h_4 = h_3 = h_3' = 429,1 \text{ кДж/кг}$, а $p_4 = p_1 = 0,17 \text{ МПа}$.

3. Питома робота затрачена на привід компресора

$$l = h_2 - h_1 = 571 - 544,4 = 26,6 \text{ кДж/кг}.$$

4. Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{544,4 - 429,1}{571 - 544,4} = 4,33.$$

5. Масова витрата хладону R12

$$m = \frac{Q}{h_1 - h_4} = \frac{140}{544,4 - 429,1} = 1,214 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

6. Теоретична потужність приводу компресора

$$N = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{140}{4,33} = 32,33 \text{ кВт}.$$

Цикл з неповним випаровуванням у випарувачі

1. Визначаємо параметри хладону в характерних точках циклу використовуючи таблицю теплофізичних властивостей хладону на лінії насичення

Точка 2 (стан хладону на виході з компресора) параметри визначаємо при температурі $t_2 = 30^\circ\text{C}$ виписуємо властивості сухої насиченої пари хладону: $p_2 = p_3 = 0,744 \text{ МПа}$ та $s_2 = s_1 = s_2'' = 4,547 \text{ кДж/(кгК)}$:
 $h_2 = h_2'' = 564,7 \text{ кДж/кг}$; $v_2 = v_2'' = 0,0238 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Точка 3 (стан рідкого хладону при температурі насичення) при температурі $t_3 = 30^\circ\text{C}$ виписуємо властивості рідкого хладону:

$$p_3 = 0,744 \text{ МПа}; \quad s_3 = s_3' = 4,010 \text{ кДж/(кгК)}; \quad h_3 = h_3' = 429,1 \text{ кДж/кг};$$

$$v_3 = v_3' = 0,0008 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 1 (стан хладону на вході в компресор) при температурі $t_1 = -17^\circ\text{C}$ виписуємо властивості сухої насиченої пари хладону:

$$p_1 = 0,17 \text{ МПа}; \quad h_1' = 384,2 \text{ кДж/кг}; \quad s_1' = 3,941 \text{ кДж/(кгК)};$$

$$v_1' = 0,0007 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad r_1 = 160,2 \text{ кДж/кг}.$$

Розраховуємо вологість насиченої пари хладону на вході в компресор враховуючи те, що $s_1 = s_2$

$$x_1 = (s_1 - s_1') \cdot \frac{T_1}{r_1} = (4,547 - 3,941) \cdot \frac{(-17 + 273,15)}{160,2} = 0,969 .$$

Питома значення ентальпії

$$h_1 = h_1' + x \cdot r = 384,2 + 0,969 \cdot 160,2 = 539,4 \text{ кДж / кг} .$$

2. Питома робота затрачена на привід компресора

$$l = h_2 - h_1 = 564,7 - 539,4 = 25,3 \text{ кДж / кг} .$$

3. Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{539,4 - 429,1}{564,7 - 539,4} = 4,36 .$$

4. Масова витрата хладону R12

$$m = \frac{Q}{h_1 - h_4} = \frac{140}{539,4 - 429,1} = 1,269 \frac{\text{кг}}{\text{с}} .$$

5. Теоретична потужність приводу компресора

$$N = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{140}{4,36} = 32,11 \text{ кВт} .$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Богданов С. Н., Куприянова А. В. Задачник по термодинамическим расчетам в пищевой и холодильной промышленности: учебное пособие для студентов вузов. Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1983. 144 с.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебное пособие для вузов / Изд. 3-е, испр. и доп. Москва : Высшая школа, 1980. 469 с.
3. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике : учебное пособие для вузов / Изд. 5-е, переработанное. Москва : Машиностроение, 1973. 344 с.
4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара : справочник. Москва : Энергия, 1980. 424 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике : учебное пособие для вузов / Т. Н. Андрианова и др.; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоиздат, 1981. 240 с.
6. Теплофизические основы получения искусственного холода : справочник / сост. Н. А. Бучко и др. Москва : Пищевая промышленность, 1980. 231 с.
7. Техническая термодинамика / В. И. Крутов и др.; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1991. 384 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Молекулярні маси та газові сталі R , Дж/(кг·К), деяких газів

Найменування газу	Хімічна формула	Молекулярна маса	Газова стала
Азот	N_2	28,01	296,8
Аміак	NH_3	17,03	488
Бутан	C_4H_{10}	58,12	143
Водень	H_2	2,02	4124
Водяна пара	H_2O	18,02	461
Повітря	–	28,96	287
Двоокис вуглецю	CO_2	44	189
Кисень	O_2	32	259,8
Метан	CH_4	16,04	518,2
Окис вуглецю	CO	28,01	296,8
Пропан	C_3H_8	44,1	188,5
Етан	C_2H_6	30,07	276,5
Етилен	C_2H_4	28,05	296,4

Додаток Б

Масові теплоємності Дж/(кг·К) та
показник адіабати k деяких газів

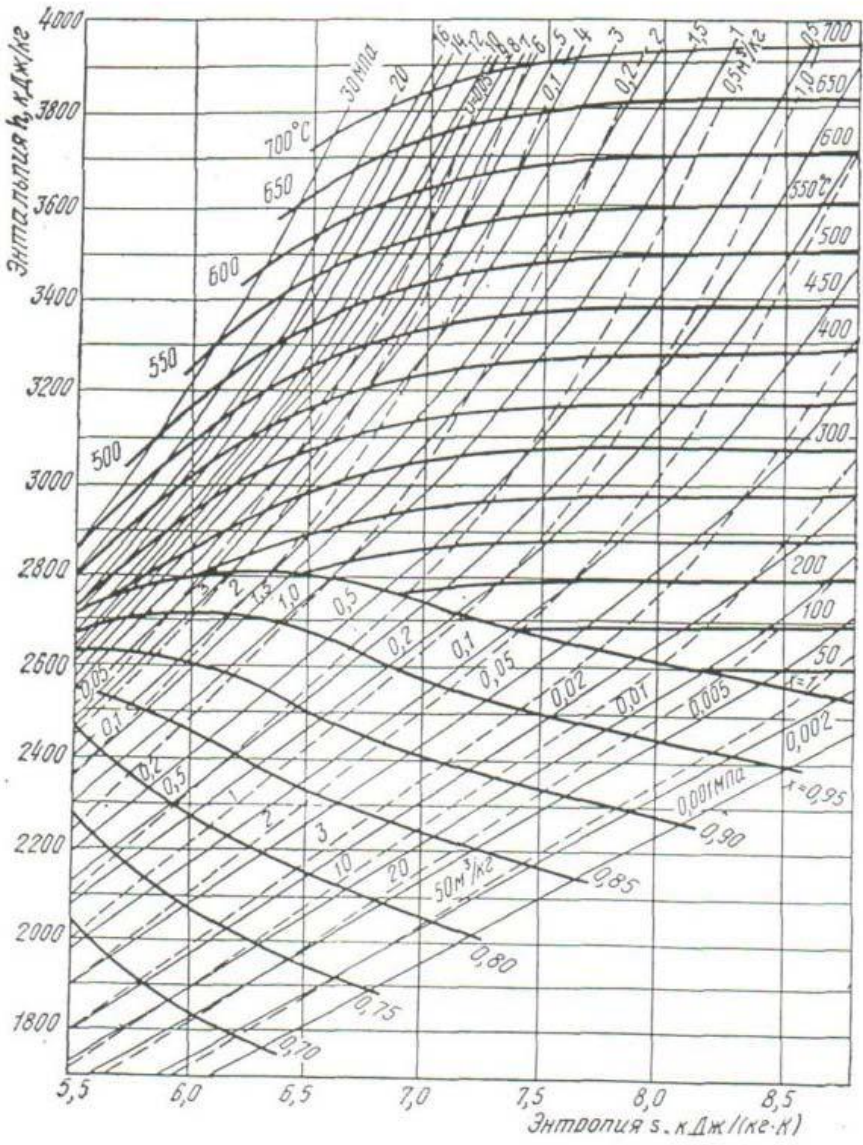
Гази	C_{vm}	C_{pm}	k
Одноатомні	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	1,67
Двоатомні	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	1,4
Трьох- та багатоатомні	$\frac{7}{2}R$	$\frac{9}{2}R$	1,29

Додаток В

Фізичні параметри сухого повітря при атмосферному тиску

Температура		Густина ρ , кг/м ³	Теплоємність C_p , кДж/(кг·К)	Теплопровідність $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Температуропровідність $a \cdot 10^6$, м ² /с	Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Число Прандтля Pr
К	t, °С						
223	-50	1,584	1,013	2,040	12,7	9,23	0,728
233	-40	1,515	1,013	2,120	13,8	10,04	0,728
243	-30	1,453	1,013	2,200	14,9	10,80	0,723
253	-20	1,395	1,009	2,280	16,2	12,79	0,716
263	-10	1,342	1,009	2,360	17,4	12,43	0,712
273	0	1,293	1,005	2,442	18,8	13,28	0,707
283	10	1,247	1,005	2,510	20,0	14,26	0,705
293	20	1,205	1,005	2,590	21,4	15,06	0,703
303	30	1,165	1,005	2,670	22,9	16,00	0,701
313	40	1,128	1,005	2,760	24,3	16,96	0,699
323	50	1,093	1,005	2,826	25,7	17,95	0,698
333	60	1,060	1,005	2,900	27,2	18,97	0,696
343	70	1,029	1,009	2,960	28,2	20,02	0,694
353	80	1,000	1,009	3,050	30,2	21,09	0,693
363	90	0,972	1,009	3,130	31,9	22,10	0,690
373	100	0,946	1,009	3,210	33,6	23,13	0,688
393	120	0,898	1,009	3,340	36,8	25,45	0,686
413	140	0,854	1,013	3,490	40,3	27,80	0,684
433	160	0,815	1,017	3,640	43,9	30,09	0,682
453	180	0,779	1,022	3,780	47,5	32,49	0,681
473	200	0,740	1,026	3,931	51,4	34,85	0,680
523	250	0,674	1,038	4,268	61,0	40,61	0,677
573	300	0,615	1,047	4,605	71,6	48,33	0,674
623	350	0,566	1,059	4,908	81,9	55,46	0,676
673	400	0,524	1,068	5,210	93,1	63,09	0,678
773	500	0,456	1,093	5,745	115,3	79,38	0,687
873	600	0,404	1,114	6,222	138,3	96,89	0,699
973	700	0,362	1,135	6,710	163,4	115,40	0,706
1073	800	0,329	1,156	7,176	188,7	134,80	0,713
1173	900	0,301	1,172	7,629	216,2	155,10	0,717
1273	1000	0,277	1,185	8,071	245,9	177,10	0,719
1373	1100	0,257	1,197	8,502	276,3	199,30	0,722
1473	1200	0,239	1,210	9,153	316,5	223,70	0,724

Діаграма $h-s$ водяної пари



Додаток Д

Фізичні властивості води на лінії насичення

t , °C	p , бар	ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{c_p}{\text{кДж}} \cdot \text{К}$	$\frac{\lambda \cdot 10^2}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4$, $\frac{1}{\text{К}}$	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	0,006	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1,789	-0,63	756,1	13,67
10	0,012	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1,306	0,70	742,0	9,52
20	0,023	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1,006	1,82	728,3	7,02
30	0,042	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	0,805	3,21	712,2	5,42
40	0,073	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	0,659	3,87	696,3	4,31
50	0,123	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	0,556	4,49	676,9	3,54
60	0,199	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	0,478	5,11	662,2	2,98
70	0,312	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	0,415	5,70	643,5	2,55
80	0,473	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	0,365	6,32	625,9	2,21
90	0,701	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	0,326	6,95	609,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	0,252	8,64	549,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	0,233	9,19	529,0	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	0,217	9,72	507,1	1,26
150	4,76	917,0	633,2	4,313	68,4	17,3	0,203	10,3	488,6	1,17
160	6,18	907,4	676,1	4,346	68,3	17,3	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	712,3	4,380	67,9	17,3	0,181	11,3	443,5	1,05
180	10,03	886,9	758,0	4,417	67,4	17,2	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	886,0	792,3	4,459	67,0	17,1	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	836,1	4,505	66,3	17,0	0,158	13,3	376,1	0,93
210	19,08	852,8	876,5	4,555	65,5	16,9	0,153	14,1	354,7	0,91
220	23,20	840,3	912,3	4,614	64,5	16,6	0,149	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	954,6	4,681	63,7	16,4	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	997,2	4,756	62,8	16,2	0,141	16,3	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1050,6	4,844	61,8	15,9	0,137	18,1	265,9	0,86
260	46,94	781,5	1103,1	4,949	60,5	15,6	0,135	19,7	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,8	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	0,127	53,4	56,7	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,38	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,34	538,0	1761,5	13,98	39,5	5,36	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	33,7	1,86	0,126	264	4,71	6,79

Додаток Є

Фізичні властивості водяної пари на лінії насичення

t , °C	p , бар	ρ'' , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$v \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,375	18,58	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,538	3,128	2,939	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2798,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	2,03	1,36
210	19,09	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,5	16,24	10,70	0,0580	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0396	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	0,166	11,10

Додаток Ж

Параметри сухої насиченої пари і води на лінії насичення (за тиском)

p , МПа	$t_{\text{н}}$, °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	0,1053	8,9749
0,0015	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	0,1952	8,8268
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	0,3547	8,5784
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	0,3912	8,5222
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,0010054	28,24	137,79	2560,9	0,4764	8,3946
0,010	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	0,8334	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	1,0261	7,6710
0,05	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	1,0912	7,5923
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	1,3026	7,3579
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	1,6716	6,9922
0,5	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	1,9311	6,7609
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	1,9923	6,7090
0,8	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2,0461	6,6630
0,9	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2773,7	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2,1383	6,5867
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	2,3148	6,4458
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	2,4471	6,3411
3,0	233,83	0,0012164	0,06663	1008,4	2803,1	2,6455	6,1859
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	2793,9	2,9210	5,9739
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	3,0276	5,8894
7,0	285,80	0,001,3510	0,02738	1267,6	2772,3	3,1221	5,8143
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	3,2079	5,7448
9,0	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	3,2866	5,6783
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	3,3601	5,6147
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	3,4966	5,4930
14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	3,6233	5,3731
16,0	347,32	0,001710	0,00932	1649,6	2581,7	3,7456	5,2478
18,0	356,96	0,001836	0,00750	1732,2	2510,6	3,8708	5,1054
20,0	365,72	0,002030	0,00586	1826,8	2410,3	4,0147	4,9280
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	4,2943	4,5815

Додаток 3

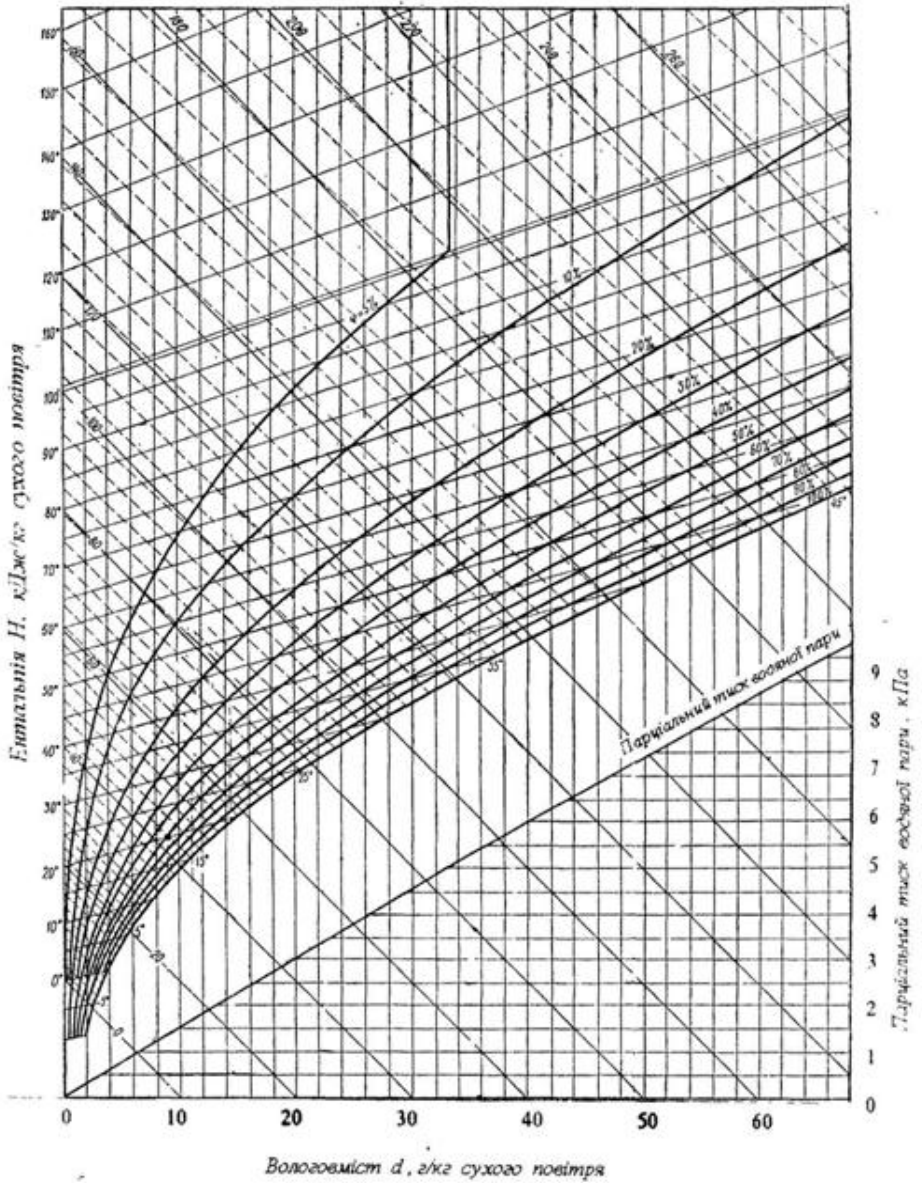
Параметри сухої насиченої пари і води на лінії насичення (за температурою)

$t_{н}$, °C	p , МПа	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000	2500,8	0	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,2	21,06	2510,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,0010010	77,97	62,97	2528,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,0010030	43,40	104,80	2546,4	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,69	2555,6	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,0010060	25,25	146,58	2564,8	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,51	2573,6	0,5723	8,2560
45	0,009582	0,0010099	15,28	188,41	2582,4	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,05	209,30	2591,6	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	230,19	2600,4	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	251,12	2609,2	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	272,06	2617,6	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	292,99	2626,4	0,9550	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,133	313,97	2634,8	1,0157	7,6819
80	0,04736	0,0010290	3,409	334,94	2643,1	1,0752	7,6116
85	0,05780	0,0010324	2,828	355,96	2651,5	1,1342	7,5438
90	0,07011	0,0010359	2,361	376,98	2659,5	1,1924	7,4785
95	0,08452	0,0010396	1,982	398,04	2667,8	1,2502	7,4157
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,10	2675,8	1,3071	7,3545
105	0,12080	0,0010474	1,419	440,20	2683,3	1,3632	7,2959
110	0,14327	0,0010515	1,210	461,34	2691,3	1,4185	7,2386
115	0,16906	0,0010558	1,037	482,53	2698,8	1,4725	7,1833
120	0,19854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	1,5278	7,1289
125	0,23208	0,0010649	0,7704	525,0	2713,5	1,5814	7,0778
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	1,6345	7,0271
135	0,3130	0,0010747	0,5820	567,7	2727,3	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	610,4	2740,3	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,5	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3465	653,6	2752,4	1,8924	6,7939
160	0,6180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	1,9427	6,7508
165	0,7008	0,0011081	0,2725	697,5	2763,7	1,9925	6,7081
170	0,7920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2,0419	6,6666
175	0,8925	0,0011208	0,2166	741,1	2773,3	2,0909	6,6256
180	1,0027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2,1395	6,5858
185	1,1234	0,0011344	0,1739	35,4	2782,5	2,1876	6,5465

продовження додатку 3

$t_{пр}$ °C	p , МПа	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
190	1,2553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	2,2358	6,5075
195	1,3989	0,0011489	0,1409	829,8	2789,7	2,2835	6,4699
200	1,5550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	2,3308	6,4318
205	1,7245	0,0011644	0,1150	875,0	2795,5	2,3777	6,3945
210	1,9080	0,0011726	0,1044	897,6	2798,0	2,4246	6,3577
215	2,1062	0,0011812	0,09465	920,7	2800,1	2,4715	6,3212
220	2,3202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	2,5179	6,2848
225	2,5504	0,0011992	0,07837	9672	2802,6	2,5640	6,2488
230	2,7979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	2,6101	6,2132
235	3,0635	0,0012187	0,06527	1014,0	2803,4	2,6561	6,1780
240	3,3480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	2,7022	6,1425
245	3,6524	0,0012399	0,05462	1061,8	2802,6	2,7478	6,1073
250	3,978	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	2,7934	6,0721
255	4,325	0,0012631	0,04591	1110,3	2788,9	2,8395	6,0365
260	4,694	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	2,8851	6,0014
265	5,088	0,0012886	0,03872	1160,2	2793,4	2,9308	5,9658
270	5,505	0,0013123	0,03560	1185,3	2789,7	2,9764	5,6298
275	5,949	0,0013168	0,03275	1210,8	2785,1	3,0225	5,8938
280	6,419	0,0013321	0,03013	1236,8	2779,6	3,0685	5,8578
285	6,918	0,0013483	0,02774	1263,2	2773,3	3,1146	5,8201
290	7,445	0,0013655	0,02553	1290,0	2766,2	3,1610	5,7824
295	8,002	0,0013839	0,02351	1317,2	2758,3	3,2079	5,7445
300	8,592	0,0014036	0,02164	1344,8	2749,1	3,2548	5,7049
305	9,213	0,001425	0,01992	1373,3	2739,0	3,3025	5,6647
310	9,869	0,001447	0,01831	1402,2	2727,3	3,3507	5,6233
315	10,561	0,001472	0,01683	1431,9	2714,3	3,3997	5,5802
320	11,290	0,001499	0,01545	1462,0	2699,6	3,4495	5,5354
325	12,057	0,001529	0,01417	1493,4	2683,3	3,5002	5,4893
330	12,864	0,001562	0,01297	1526,1	2665,7	3,5521	5,4412
335	13,715	0,001599	0,01184	1559,6	2645,2	3,6057	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	1594,8	2621,8	3,6605	5,3361
345	15,547	0,001686	0,09771	1632,0	2595,4	3,7183	5,2770
350	16,537	0,001741	0,08805	1671,4	2564,4	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	1714,1	2527,2	3,8439	5,1385
360	18,674	0,001894	0,006943	1761,4	2481,1	3,9163	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00600	1817,5	2420,8	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	1892,4	2330,8	4,1135	4,7951
375	22,087	0,00280	0,00361	2031,9	2171,7	4,3258	4,5418

Діаграма $h-d$ вологого повітря



Додаток Л

Параметри хладону R12 на лінії насичення (за температурою)

t_n , °C	p , МПа	ρ' , кг / м ³	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
-40	0,0643	1520	0,242	363,3	533,6	3,856	4,586
-38	0,0706	1512	0,222	365,1	534,5	3,863	4,584
-36	0,0773	1506	0,204	366,9	535,5	3,871	4,582
-34	0,0846	1500	0,188	368,7	536,4	3,878	4,580
-32	0,0923	1495	0,173	370,5	537,4	3,886	4,578
-30	0,101	1489	0,159	372,3	538,3	3,893	4,576
-28	0,109	1483	0,147	374,1	539,2	3,901	4,574
-26	0,119	1477	0,137	375,9	540,2	3,908	4,573
-24	0,129	1471	0,127	377,7	541,1	3,915	4,571
-22	0,140	1465	0,117	379,6	542,0	3,922	4,569
-20	0,151	1459	0,109	381,4	543,0	3,930	4,568
-18	0,163	1453	0,102	383,2	543,9	3,937	4,567
-16	0,176	1447	0,0945	385,1	544,8	3,944	4,565
-14	0,189	1440	0,0881	386,9	545,7	3,951	4,564
-12	0,204	1434	0,0823	388,8	546,6	3,958	4,563
-10	0,220	1428	0,0769	390,6	547,5	3,965	4,562
-8	0,236	1422	0,0719	392,5	548,5	3,972	4,561
-6	0,253	1415	0,0674	394,4	549,4	3,979	4,560
-4	0,271	1409	0,0632	396,2	550,3	3,986	4,558
-2	0,289	1402	0,0593	398,1	551,2	3,993	4,558
0	0,309	1396	0,0557	400	552,1	4,000	4,557
2	0,330	1389	0,0523	401,9	553,0	4,007	4,556
4	0,352	1383	0,0492	403,8	553,8	4,021	4,554
6	0,375	1376	0,0464	405,7	554,7	4,021	4,554
8	0,398	1369	0,0437	407,6	555,6	4,027	4,554
10	0,424	1362	0,0412	409,5	556,4	4,034	4,553
12	0,450	1356	0,0389	411,5	557,3	4,041	4,552
14	0,477	1349	0,0367	413,4	558,2	4,047	4,552
16	0,506	1342	0,0347	415,3	559,0	4,054	4,551
18	0,536	1335	0,0328	417,3	559,9	4,061	4,550
20	0,567	1327	0,0311	419,2	560,7	4,067	4,550
22	0,599	1320	0,0294	421,2	561,5	4,074	4,549
24	0,633	1313	0,0279	423,1	562,3	4,080	4,549

продовження додатку Л

t_w , °C	p , МПа	ρ' , кг / м ³	ν'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
26	0,669	1306	0,0264	425,1	563,1	4,087	4,548
28	0,705	1298	0,0250	427,1	563,9	4,093	4,548
30	0,744	1291	0,0238	429,1	564,7	4,010	4,547
32	0,783	1283	0,0226	431,1	565,5	4,106	4,547
34	0,824	1275	0,0214	433,1	566,3	4,113	4,546
36	0,867	1268	0,0204	435,1	567,0	4,119	4,546
38	0,912	1260	0,0194	437,2	567,8	4,126	4,545
40	0,958	1252	0,0184	439,2	568,5	4,132	4,545
42	1,005	1244	0,0175	441,2	569,2	4,138	4,544
44	1,055	1235	0,0167	443,3	569,8	4,145	4,544
46	1,106	1227	0,0159	445,3	570,6	4,151	4,544
48	1,159	1219	0,0151	447,4	571,2	4,158	4,543
50	1,214	1210	0,0144	449,5	571,9	4,164	4,543

Додаток М

Фізичні параметри димових газів при атмосферному тиску
(0,101 МПа), Склад газів: CO₂=13%; H₂O=11%; N₂=76%

Температура		Густи- на ρ , кг/м ³	Теплоєм- ність C_p , кДж/(м ³ · К)	Тепло- провід- ність $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Темпе- ра- туро- ро- відність $\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	Коефіці- єнт кінема- тичної в'язкості $\nu \cdot 10^6$, м ³ /с	Число Пран для Pr
К	t°С						
273	0	1,295	1,3562	2,280	16,9	12,20	0,72
373	100	0,950	1,3712	3,129	30,6	21,54	0,69
473	200	0,748	1,3875	4,012	48,9	32,80	0,67
573	300	0,617	1,4057	4,838	69,9	45,81	0,65
673	400	0,525	1,4234	5,699	94,3	60,38	0,64
773	500	0,457	1,4424	6,559	121,1	76,30	0,63
873	600	0,405	1,4315	7,420	150,9	93,61	0,62
973	700	0,363	1,4807	8,268	183,8	112,10	0,61
1073	800	0,330	1,4994	9,153	219,7	131,80	0,60
1173	900	0,301	1,5170	10,013	258,0	152,50	0,59
1273	1000	0,275	1,5337	10,897	303,4	174,30	0,58
1373	1100	0,257	1,5496	11,746	345,5	197,10	0,57
1473	1200	0,240	1,5646	12,319	392,4	221,00	0,56

Додаток Н

Середня кіломольна теплоємність газів при постійному тиску μC_{pm} ,
кДж/(кмоль·град), в інтервалі температур 0... t °С.

t , °С	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	Повітря
0	29,278	29,023	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503	29,077
100	29,542	29,052	28,939	29,182	38,118	40,660	33,746	29,157
200	29,936	29,140	29,077	29,308	40,065	42,335	34,123	29,303
300	30,405	29,291	29,128	29,521	41,761	43,884	34,580	29,525
400	30,882	29,504	29,190	29,793	43,256	45,224	35,095	29,793
500	31,338	29,768	29,253	30,103	44,579	46,396	35,635	30,099
600	31,766	30,049	29,320	30,430	45,760	47,360	36,200	30,409
700	32,155	30,346	29,412	30,756	46,819	48,239	36,795	30,727
800	32,507	30,639	29,521	31,075	47,770	48,951	37,398	31,033
900	32,829	30,928	29,651	31,380	48,624	49,621	38,013	31,326
1000	33,122	31,200	29,793	31,669	49,399	50,165	38,624	31,602
1100	33,390	31,460	29,948	31,941	50,106	50,668	39,232	31,866
1200	33,637	31,711	31,111	32,197	50,747	51,086	39,830	32,113
1300	33,868	31,946	30,292	32,431	51,329	-	40,412	32,348
1400	34,081	32,168	30,472	32,658	51,865	-	40,482	32,570
1500	34,286	32,377	30,652	32,863	52,355	-	41,531	32,779
1600	34,479	32,570	30,836	33,055	52,807	-	42,062	32,971
1700	34,663	32,754	31,016	33,236	53,226	-	42,582	33,156
1800	34,839	32,921	31,196	33,407	53,611	-	43,076	33,323
1900	35,011	33,085	31,376	33,566	53,967	-	43,545	33,487
2000	35,174	33,235	31,552	33,713	54,298	-	44,001	33,646
2100	35,333	33,382	31,728	33,855	54,604	-	44,399	33,792
2200	35,488	33,520	31,895	33,985	54,888	-	44,860	33,931
2300	35,639	33,646	32,063	34,110	55,152	-	45,262	34,064
2400	35,790	33,683	32,226	34,228	55,399	-	45,651	34,190
2500	35,932	33,880	32,389	34,341	55,625	-	46,023	34,311
2600	36,074	34,180	32,544	34,480	56,350	-	46,388	34,450
2700	36,212	34,290	32,695	34,580	56,580	-	46,736	34,560
2800	36,360	34,390	32,870	34,680	56,820	-	47,066	34,670
2900	36,480	34,490	33,010	34,770	57,040	-	47,384	34,770
3000	36,610	34,580	33,160	34,860	57,230	-	-	34,870

Додаток О

Одиниці виміру деяких значень величин

<p>1 ккал = 4187 Дж 1 Вт = 0,86 ккал/год 1 кгс·м = 9,81 Дж 1 кгс = 9,80665 Н 1 МВт – 1,36 ГДж/год</p> <p>$q_{\text{дис}}^{CO_2} = 243 \text{ МДж/кмоль}$</p> $\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$ <p>$q_{\text{дис}}^{H_2O} = 286 \text{ МДж/кмоль}$</p> <p>$\mu_{H_2} = 2 \text{ кг/кмоль}$</p> <p>$\rho_{\text{вх}}^{H_2O} = 1,293 = \frac{28,96 \text{ кг}}{22,4 \text{ м}^3}$</p> <p>1 ярд = 0,9144 м 1 фунт = 0,45359 кг $r_i = V_i / V_{\text{см}}$</p> <p>В повітрі по об'єму</p> $\frac{V_{N_2}}{V_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,7619$	<p>1 ккал/год = 1,163 Вт 1 Дж = $0,239 \cdot 10^{-3}$ ккал 1 Вт = Дж/с 1 лс = 735,499 Вт</p> <p>$v_{\text{кин}} = \frac{v_{\text{кин}}}{\rho} \text{ м}^2 / \text{с}$</p> <p>$\rho^{H_2O} = \frac{\mu}{22,4} \text{ кг/м}^3$</p> $\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$ <p>$\mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$</p> <p>$\mu_{Fe} = 55,847 \text{ кг/кмоль}$</p> <p>$\rho_{\text{пр.з}}^{H_2O} = 0,73 \text{ кг/м}^3$</p> <p>1 фунт = 0,3048 м 1 термія = 4,2 МДж</p> <p>$\bar{C}_{\text{пр.з}}^1 = \sum C_{\text{пр.з}}^1 \cdot r_i$</p> <p>$N_{\text{ел}} = \frac{V \cdot \Delta P \cdot K}{\eta} \text{ кВт}$ (V, м³/с; ΔP, кПа; K=1,0...1,1</p>	<p>1 Гкал/год = 1,163 МВт 1 Вт·год = $3,6 \cdot 10^3$ Дж 1 Дж = нм 1 ГДж/год = 0,277 МВт</p> <p>$\gamma = \rho \cdot g$</p> <p>$r_{\text{cono}} = 2516 \text{ кДж/кг}_{H_2O}$</p> $\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}$ <p>$\mu_C = 12 \text{ кг/кмоль}$</p> <p>$\mu_{\text{пов}} = 28,96 \text{ кг/кмоль}$</p> <p>$\rho_{H_2O}^{H_2O} = 0,804 \text{ кг/м}^3$</p> <p>1 карат = $2 \cdot 10^{-4}$ кг 1 дюйм = 0,254 м 1 унція = $28,3495 \cdot 10^{-3}$ кг</p> <p>В повітрі по масі</p> $\frac{G_{N_2}}{G_{O_2}} = 3,29$
Для H ₂ O: P _{кр} = 221,145 бар; t _{кр} = 374,116 °C; V _{кр} = 0,003145 м ³ /кг		
Тера Т 10 ¹² Гіга Г 10 ⁹ Мега М 10 ⁶ Кіло к 10 ³	Гекто г 10 ² Дека да 10 ¹ Деци д 10 ⁻¹ Санти с 10 ⁻² Мілі м 10 ⁻³	Мікро мкм 10 ⁻⁶ Нано н 10 ⁻⁹ Піко п 10 ⁻¹² Фемто ф 10 ⁻¹⁵ Атто а 10 ⁻¹⁸