

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Технічна термодинаміка
**Розрахунок та аналіз термодинамічних процесів
з ідеальним газом і водяною парою**

**Рекомендації до виконання
розрахунково-графічної роботи**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки
електростанцій»
спеціальності 144 Теплоенергетика*

Укладачі: А.С. Соломаха, Н.О. Притула, В.В. Середа

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 621.1.016.7

Укладачі: *Соломаха Андрій Сергійович*, канд. техн. наук, доц.
Притула Наталя Олександрівна, канд. техн. наук, доц.
Середа Володимир Володимирович, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Кравець В.Ю.*, д.т.н., проф., проф. каф. атомної енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Сірий О.А.*, канд. техн. наук, доц. каф. теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 08.05.2025 р.)
за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики (протокол № 11 від 28.04.2025 р.)

Технічна термодинаміка. Розрахунок та аналіз термодинамічних процесів з ідеальним газом і водяною парою [Електронний ресурс]: рек. до виконання розрахунково-графічної роботи : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спец. 144 Теплоенергетика / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.С. Соломаха, Н. О. Притула, В.В. Середа – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 99 с.

Наведені мета розрахунково-графічної роботи та завдання на її виконання: склад, обсяг і структура. Надано приклади розрахунку для чотирьох основних термодинамічних процесів. Подані рекомендації до оформлення розрахунково-графічної роботи. В додатках наведені таблиці для визначення термодинамічних параметрів найбільш поширених ідеальних газів та таблиці і ентропійні діаграми $h-s$, $T-s$ водяної пари, необхідних при виконанні розрахунково-графічної роботи. Для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спеціальності 144 Теплоенергетика. Посібник може бути також корисним для здобувачів за напрямком галузі знань 14 Електрична інженерія.

УДК 621.1.016.7

Реєстр. № НП 24/25-485. Обсяг 2,7 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056

<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Мета, завдання та структура розрахунково-графічної роботи.....	4
2. Приклади розрахунків основних термодинамічних процесів.....	6
2.1. Ізобарний процес.....	6
2.2. Ізотермічний процес.....	21
2.3. Ізоентропний процес.....	37
2.4. Ізохорний процес.....	54
3. Рекомендації до оформлення розрахунково-графічної роботи...	69
Список рекомендованої літератури.....	72
Перелік посилань.....	73
Додатки	
Додаток А. Довідкові таблиці та діаграми.....	74
Додаток Б. Титульний аркуш розрахункової роботи.....	96
Додаток В. Зміст розрахункової роботи.....	97
Додаток Г. Завдання до розрахунково-графічної роботи	98

ВСТУП

Студенти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спеціальності 144 «Теплоенергетика», вивчають освітній компонент «Технічна термодинаміка» на 2 курсі у III семестрі [1].

Згідно з навчальним планом з освітнього компонента передбачено виконання розрахунково-графічної роботи, в якій за відповідними індивідуальними завданнями студентам пропонується розрахувати один з чотирьох термодинамічних процесів: ізотермічний, ізобарний, ізохорний або ізоентропний.

У навчальному посібнику наведено мету розрахункової роботи та завдання на її виконання; склад, обсяг та структуру; наведено приклади виконання всіх чотирьох термодинамічних процесів; таблиці та діаграми для визначення термодинамічних параметрів водяної пари.

1. МЕТА, ЗАВДАННЯ ТА СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Розрахунково-графічна робота виконується індивідуально студентом за відповідними вихідними даними. В залежності від варіанту, робиться розрахунок та аналіз одного із ізопараметричних процесів ($p, v, t, s = \text{const}$).

Мета роботи – засвоїти і закріпити методику аналізу термодинамічних процесів з врахуванням їх енергетичних особливостей та отримати навички користування довідковими таблицями води і водяної пари, а також масштабними hs , Ts - діаграмами.

Важливим завданням розрахунково-графічної роботи є набуття практичних знань із зображення основних процесів на діаграмах.

Завдання на розрахунково-графічну роботу. Об'єм водяної пари V_1 , м³ (*ідеальний газ*) при тиску p_1 , бар і температурі t_1 , °C (або питомому об'ємі v_1 м³/кг) здійснює *ізохорний* (або *ізотермічний, ізоентропний, ізобарний*) процес до тиску p_2 , бар (або до об'єму V_2 , м³). Визначити всі початкові та кінцеві параметри

робочого тіла, виконану роботу та кількість теплоти в процесі. Розрахунок виконати для двох випадків: 1) теплоємність ідеального газу має постійне значення $c = \text{const}$ та 2) теплоємність ідеального газу залежить від температури $c = c(T)$.

При тих же вихідних даних виконати розрахунок процесу з водяною парою, якщо її властивості визначаються з припущення, що H_2O - *реальний газ*. Розрахунок виконати двома способами: а) користуючись лише термодинамічними таблицями властивостей водяної пари; б) користуючись лише термодинамічними діаграмами (Ts, hs).

Зробити висновки за результатами виконаних розрахунків та графіків.

В процесі виконання роботи:

1. Жодну з обрахованих величин для першого випадку (ідеальний газ) неможна використовувати для розрахунку другого випадку (реальний газ), тобто дві частини розрахунково-графічної роботи є незалежними одна від одної та пов'язані лише спільними значеннями вихідних даних.

2. Всі розрахунки необхідно супроводжувати короткими поясненнями і проміжними обчисленнями.

3. Обов'язково вказувати одиниці вимірювання отриманих величин.

Числові значення вихідних даних необхідно обрати відповідно з *варіантом індивідуального завдання* з Додатку Г.

Довідкові данні наведені для визначення термодинамічних властивостей наведено в Додатку А.

Склад, обсяг і структура розрахункової-графічної роботи. Розрахункова робота складається з двох частин:

- *частина перша* – розрахунок процесу припускаючи, що водяна пара має властивості ідеального газу [2];

- *частина друга* – розрахунок процесу припускаючи, що водяна пара має властивості реального газу [3].

Рекомендований зміст роботи та перелік необхідних розрахунків наведено в додатку В.

Структура пояснювальної записки до розрахунково-графічної роботи:

- титульний аркуш (форма в Додатку Б);
- завдання;
- зміст;
- основна частина (виконується згідно з виданим завданням та наведеними рекомендаціями);
- висновки;
- перелік посилань (бібліографічний список);

Конкретне наповнення роботи наведене в представлених нижче прикладах розрахунку.

2. ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ОСНОВНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1. Ізобарний процес

$V_1 = 2 \text{ м}^3$ водяної пари (П, $c = \text{const}$) при тискові $P = 8 \text{ бар}$ і питомому об'ємі $v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$ здійснює ізобарний процес до об'єму $V_2 = 4,2 \text{ м}^3$. Визначити всі початкові і кінцеві параметри робочого тіла, роботу і кількість теплоти в процесі. Як зміняться результати розрахунку, якщо при тих же вихідних даних цей процес здійснюється з ідеальним газом H_2O при теплоємностях, що залежать від температури?

Частина №1

Задано:

$$V_1 = 2 \text{ м}^3$$

$$P = 8 \text{ бар} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$V_2 = 4,2 \text{ м}^3$$

$$p = \text{const}$$

Визначити:

$$h_1, h_2, s_1, s_2, u_1, u_2,$$

$$\Delta u, \Delta h, \Delta s,$$

$$t_1, t_2, l, l_n, q - ?$$

1. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – ідеальний газ.

1.1. Визначення параметрів у початковому стані.

1.1.1. Термічні параметри (P_1, T_1, v_1).

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск

($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Третій термічний параметр – термодинамічну температуру – обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу $P_1 v_1 = R T_1$:

$$T_1 = \frac{P v_1}{R} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,2}{461,9} = 346 \text{ К}.$$

У цьому рівнянні питома газова стала обчислюється за формулою:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,4619 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}),$$

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

$\mu = 18 \text{ кг/кмоль}$ – молярна маса водяної пари.

Маса водяної пари, що бере участь у процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0,2} = 10 \text{ кг.}$$

1.1.2. Калоричні параметри (u_1, h_1, s_1).

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією).

1) З таблиць молярних теплоємностей, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії, для водяної пари (H_2O), як трьохатомного ідеального газу, знаходимо:

а) молярна ізобарна теплоємність

$$c_{\mu p} = \frac{9}{2} R_{\mu} = \frac{9 \cdot 8314}{2} = 37413 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)} = 37,413 \text{ кДж / (кмоль} \cdot \text{К)};$$

б) молярна ізохорна теплоємність

$$c_{\mu v} = \frac{7}{2} R_{\mu} = \frac{7 \cdot 8314}{2} = 29099 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)} = 29,099 \text{ кДж / (кмоль} \cdot \text{К)}.$$

2) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)};$$

б) питома ізохорна теплоємність

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}.$$

3) Питома ентальпія

а) $h_1 = c_p \cdot t_1 = 2,08 \cdot 73 = 151,8 \text{ кДж / кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$

б) $h_1 = c_p \cdot T_1 = 2,08 \cdot 346 = 719,7 \text{ кДж / кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$

4) Питома внутрішня енергія

а) $u_1 = c_v \cdot t_1 = 1,62 \cdot 73 = 118,3 \text{ кДж / кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$

б) $u_1 = c_v \cdot T_1 = 1,62 \cdot 346 = 560,5 \text{ кДж / кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$

5) Питома ентропія

$$s_1 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{346}{273} - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{10^5} = -0,468 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)} < 0$$

початок відліку $T_0 = 273 \text{ К}, P_0 = 0,1 \text{ МПа}.$

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 73^\circ C$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_1 = 639,16$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0K$;

Питома внутрішня енергія $u_1 = 479,41$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0K$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_1 = s^0(T_1) - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 10,7539 - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{10^5} = 9,79 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot K),$$

де $s^0(T_1) = 10,7539$ кДж/(кг · K), початок відліку $T_0 = 0K$, $P_0 = 0,1$ МПа.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 73^\circ C$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність

$$c_{pm}^{t_1} = 1,869 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot K).$$

Середня питома ізохорна теплоємність

$$c_{vm}^{t_1} = 1,408 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot K).$$

Питома ентальпія

$$h_1 = c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,869 \cdot 73 = 136,4 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ C.$$

Питома внутрішня енергія

$$u_1 = c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,408 \cdot 73 = 102,8 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ C.$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані.

1.2.1. Термічні параметри (P_2, T_2, v_2)

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$), який є постійним ($P_1 = P_2 = P$) і об'єм ($V_2 = 4,2 \text{ м}^3$).

Невідомий термічний параметр – термодинамічну температуру – визначаємо, використовуючи рівняння зв'язку:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ звідси } T_2 = \frac{T_1 V_2}{V_1} = \frac{346 \cdot 4,2}{2} = 727 \text{ К } (t_2 = 454^\circ\text{C}).$$

Знайдемо питомий об'єм

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{4,2}{10} = 0,42 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

1.2.2. Калоричні параметри (u_2, h_2, s_2)

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією)

1) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) питома ізохорна теплоємність

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

2) Питома ентальпія

а) $h_2 = c_p \cdot t_2 = 2,08 \cdot 454 = 944,3 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $h_2 = c_p \cdot T_2 = 2,08 \cdot 727 = 1512,2 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{К}$.

3) Питома внутрішня енергія

а) $u_2 = c_v \cdot t_2 = 1,62 \cdot 454 = 735,5 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $u_2 = c_v \cdot T_2 = 1,6166 \cdot 727 = 1177,7 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{К}$.

4) Питома ентропія

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{727}{273} - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{10^5} = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \text{ початок}$$

відліку $T_0 = 273\text{К}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = 454^\circ\text{C}$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_2 = 1393,96$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома внутрішня енергія $u_2 = 1058,38$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_2 = s^0(T_2) - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 12,2143 - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{10^5} = 11,254 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

де $s^0(T_2) = 12,2143$ кДж/(кг · К), початок відліку $T_0 = 0\text{K}$, $P_0 = 0,1$ МПа.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = 454^\circ\text{C}$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність

$$c_{pm}^{t_2} = 1,964 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Середня питома ізохорна теплоємність

$$c_{vm}^{t_2} = 1,502 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Питома ентальпія

$$h_2 = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 = 1,964 \cdot 454 = 891,7 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C}.$$

Питома внутрішня енергія

$$u_2 = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 = 1,502 \cdot 454 = 681,9 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C}.$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.3. Зміна калоричних параметрів у процесі.

1.3.1. Обчислення зміни калоричних параметрів за наближеними формулами (випадок $c = \text{const}$).

Зміна питомої ентальпії:

$$\Delta h = c_p \cdot (t_2 - t_1) = 2,08 \cdot (454 - 73) = 792,5 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 2,08 \cdot (727 - 346) = 792,5 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

Перевірка:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 944,3 - 151,8 = 792,5 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1512,2 - 719,7 = 792,5 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = 1,62 \cdot (454 - 73) = 617,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,62 \cdot (727 - 346) = 617,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

Перевірка:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 735,5 - 118,3 = 617,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 1177,7 - 560,5 = 617,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

З пунктів 1 і 2 ми бачимо, що зміна параметрів не залежить від початку відліку і шкали, за якою ми вимірюємо температуру (Цельсія чи Кельвіна).

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 2,08 \cdot \ln \frac{727}{346} - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{8 \cdot 10^5} = 1,544 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) > 0,$$

Перевірка:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 1,077 - (-0,468) = 1,545 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Так як зміна калоричних параметрів обчислюється за наближеними формулами, то значення отримані неточно.

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 792,5 \cdot 10 = 7925 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 617,2 \cdot 10 = 6172 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,544 \cdot 10 = 15,44 \text{ кДж/K}.$$

1.3.2. Обчислення зміни калоричних параметрів за уточненими формулами (випадок $c = c(T)$)

1) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1393,96 - 639,16 = 754,8 \text{ кДж/кг}.$$

Зміну питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 1058,38 - 479,41 = 578,97 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої ентропії

$$\begin{aligned}\Delta s &= s_0 - R \ln \frac{P_2}{P_1} = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \frac{P_2}{P_1} = \\ &= 12,2143 - 10,7539 - 0,4619 \ln \frac{8 \cdot 10^5}{8 \cdot 10^5} = 1,46 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.\end{aligned}$$

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 754,8 \cdot 10 = 7548 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 578,97 \cdot 10 = 5789,7 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,46 \cdot 10 = 14,6 \text{ кДж/К}.$$

2) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,964 \cdot 454 - 1,869 \cdot 73 = 755,2 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 891,7 - 136,4 = 755,3 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,502 \cdot 454 - 1,408 \cdot 73 = 579,12 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 681,9 - 102,8 = 579,1 \text{ кДж/кг};$$

В повних величинах

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 755,2 \cdot 10 = 7552 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 579,2 \cdot 10 = 5792 \text{ кДж}.$$

1.4. Визначення характеристик процесу (l , l_n , L , L_n , q , Q)

Для процесу $P = \text{const}$ деформаційна робота (l , L) і робота переміщення (l_n , L_n) не зв'язані з поняттям теплоємності. Крім того, при ізобарному процесі робота переміщення рівна нулю ($l_n = 0$, $L_n = 0$).

Питому деформаційну роботу обчислюємо за формулою:

$$l = P \cdot (v_2 - v_1) = 8 \cdot 10^5 \cdot (0,42 - 0,2) = 176 \text{ кДж/кг} = 0,176 \text{ МДж/кг}.$$

В повних величинах

$$L = l \cdot m = 0,176 \cdot 10^6 \cdot 10 = 1,76 \text{ МДж}.$$

Теплота з першого закону термодинаміки для ізобарного процесу $q = \Delta h$:

1) випадок $c = \text{const}$: $q = 792,5 \text{ кДж/кг}$,

в повних величинах $Q = q \cdot m = 792,5 \cdot 10 = 7925 \text{ кДж} = 7,925 \text{ МДж}$.

2) випадок $c = c(T)$:

а) з використанням таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу

$$q = 754,8 \text{ кДж/кг},$$

в повних величинах $Q = q \cdot m = 754,8 \cdot 10 = 7548 \text{ кДж} = 7,548 \text{ МДж}$;

б) з використанням таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу

$$q = 755,2 \text{ кДж/кг},$$

в повних величинах $Q = q \cdot m = 755,2 \cdot 10 = 7552 \text{ кДж} = 7,552 \text{ МДж}$.

1.5. Зображення процесу в $P-v$ і $T-s$ діаграмах.

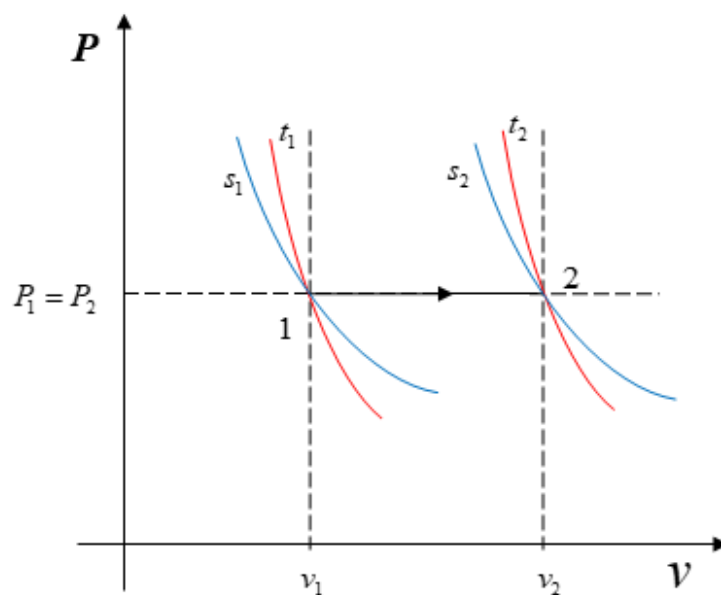


Рисунок 2.1. $P-v$ діаграма ізобарного процесу для ідеального газу

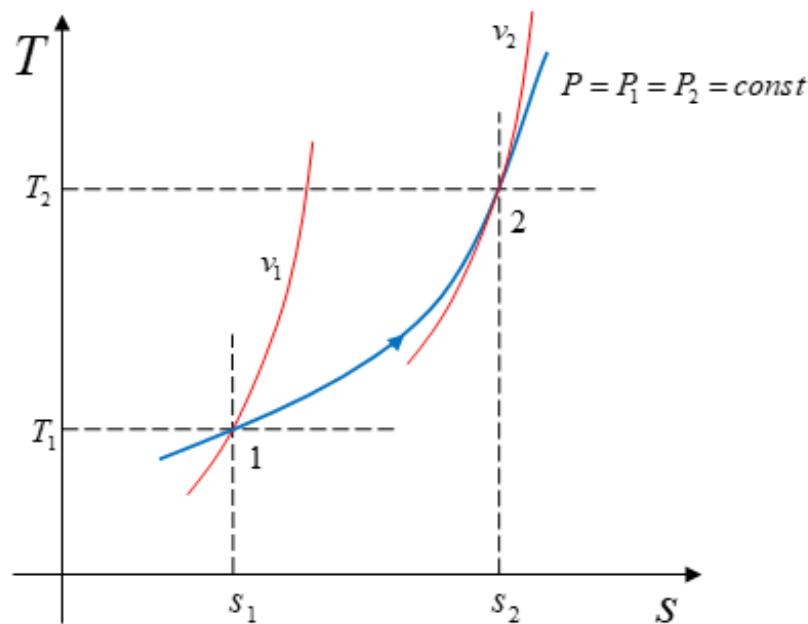


Рисунок 2.2. $T - s$ діаграма ізобарного процесу для ідеального газу

Частина №2

2. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – реальний газ

2.1. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за допомогою таблиць водяної пари

2.1.1. Визначення параметрів у початковому стані (в т. 1).

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в табл. № 2 знаходимо:

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,001115 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,2403 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара, відповідно $v = v_x = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Параметри ВНП знаходимо за допомогою таблиці № 2 і формул змішування.

Ступінь сухості x даної ВНП:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,2 - 0,001115}{0,2403 - 0,001115} = 0,83 \text{ кг}_{\text{СНП}} / \text{кг}_{\text{ВНП}}.$$

Питому ентальпію і питому ентропію обчислюємо за формулами змішування; значення необхідних параметрів h' , h'' , s' , s'' знаходимо за тиском $P < P_{кр}$ у таблиці №2:

– питома ентальпія

$$h_1 = h_x = h'(1-x) + h'' \cdot x = 720,9 \cdot (1-0,83) + 2768,4 \cdot 0,83 = 2420,33 \text{ кДж / кг};$$

– питома ентропія

$$s_1 = s_x = s'(1-x) + s'' \cdot x = 2,0457 \cdot (1-0,83) + 6,6618 \cdot 0,83 = 5,8771 \text{ кДж / кг}.$$

Питому внутрішню енергію розраховують за формулою:

$$u_1 = h_1 - P v_1 = 2420,325 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,2 = 2260,33 \text{ кДж / кг}.$$

Температура ВНП в точці 1 рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 170,42 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані (в т. 2).

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_2 = 0,42 \text{ м}^3 / \text{кг}$). Ці данні дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо:

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,001115 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,2403 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як при $P < P_{кр}$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара. Її параметри знаходимо за таблицею № 3:

– температура $t_2 = 462,4 \text{ }^\circ\text{C}$;

– питома ентальпія $h_2 = 3410,8 \text{ кДж / кг}$;

– питома ентропія $s_2 = 7,694 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P v_2 = 3410,8 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,42 = 3074,8 \text{ кДж / кг}.$$

2.1.3. Зміна калоричних параметрів в процесі

– зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 3410,8 - 2420,325 = 990,475 \text{ кДж / кг};$$

– зміна питомої ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7,694 - 5,8771 = 1,8169 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)};$$

– зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 3074,8 - 2260,325 = 814,475 \text{ кДж / кг}.$$

Маса водяної пари, що бере участь в процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0,2} = 10 \text{ кг}.$$

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 990,475 \cdot 10 = 9904,75 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 814,475 \cdot 10 = 8144,75 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,8169 \cdot 10 = 18,169 \text{ кДж/К}.$$

2.1.4. Характеристики процесу l, L, l_n, L_n, q, Q

Так як даний процес ізобарний ($P = \text{const}$), робота переміщення $l_n = 0$ ($L_n = 0$). Тому в відповідності з першим законом термодинаміки знаходимо:

– питома теплота

$$q = \Delta h = 990,475 \text{ кДж / кг};$$

– питома деформаційна робота

$$l = q - \Delta u = 990,475 - 814,475 = 176 \text{ кДж / кг}.$$

В повних величинах:

$$Q = q \cdot m = 990,475 \cdot 10 = 9904,75 \text{ кДж} = 9,905 \text{ МДж};$$

$$L = l \cdot m = 176 \cdot 10 = 1760 \text{ кДж} = 1,760 \text{ МДж}.$$

2.2. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за ентропійними діаграмами

2.2.1. Діаграма $t - s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо:

- питомий об'єм насиченої рідини: $v' = 0,001115 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питомий об'єм сухої насиченої пари: $v'' = 0,2403 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як при $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара.

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари. Її параметри:

– питома ентальпія

$$h_1 = 596 \text{ ккал} / \text{кг} = 575 \cdot 4,19 = 2409,25 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома ентропія

$$s_1 = 1,42 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{К}) = 1,4 \cdot 4,19 = 5,866 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - P v_1 = 2409,25 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,2 = 2249,25 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Температура ВНП у точці 1 рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 170 \text{ }^\circ\text{C}$.

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_2 = 0,42 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара. Інші параметри визначаємо за діаграмою $t - s$:

– температура $t_2 = 460 \text{ }^\circ\text{C}$;

– питома ентальпія

$$h_2 = 794 \text{ ккал} / \text{кг} = 810 \cdot 4,19 = 3393,9 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома ентропія

$$s_2 = 1,84 \text{ ккал} / \text{кг} = 1,85 \cdot 4,19 = 7,75 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P v_2 = 3393,9 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,42 = 3057,9 \text{ кДж / кг.}$$

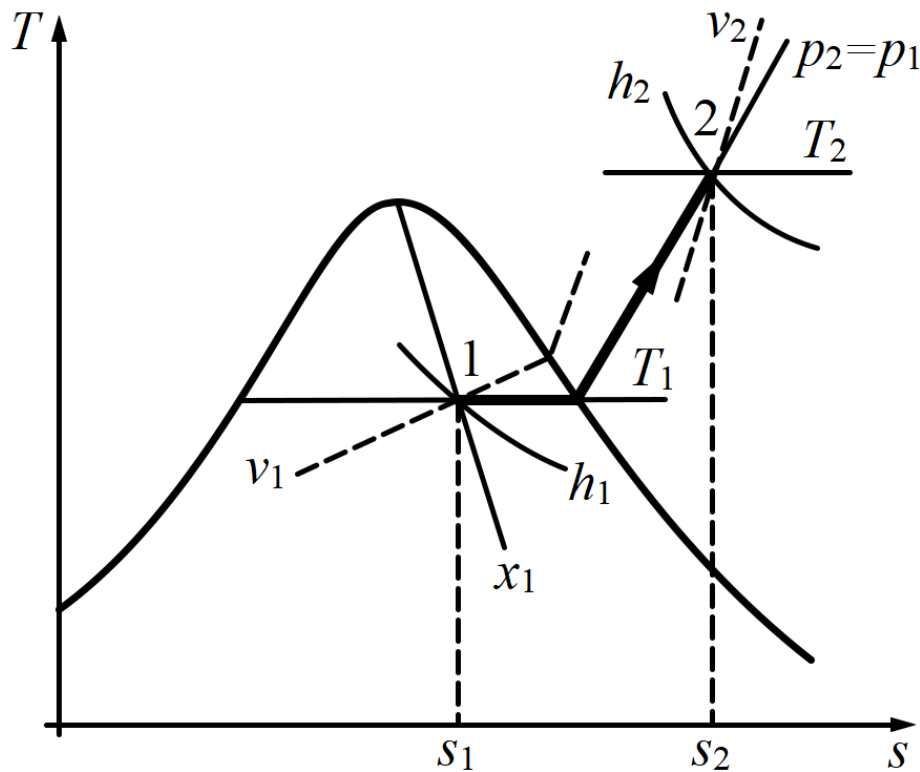


Рисунок 2.3. $T - s$ діаграма ізобарного процесу для реального газу

2.2.2. Діаграма $h - s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,2 \text{ м}^3 / \text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо:

- питомий об'єм насиченої рідини: $v' = 0,001115 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питомий об'єм сухої насиченої пари: $v'' = 0,2403 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як при $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари. Температура ВНП в ній рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 170 \text{ °C}$ на кривій $x = 1$. Параметри в точці 1:

- питома ентальпія $h_1 = 2430 \text{ кДж / кг}$;
- питома ентропія $s_1 = 5,9 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - P v_1 = 2430 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,2 = 2270 \text{ кДж / кг}.$$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 8 \text{ бар} = 0,8 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_2 = 0,42 \text{ м}^3/\text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара.

Інші параметри визначаємо за діаграмою $h-s$:

- температура $t_2 = 460 \text{ }^\circ\text{C}$;
- питома ентальпія $h_2 = 3410 \text{ кДж / кг}$;
- питома ентропія $s_2 = 7,78 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P v_2 = 3410 \cdot 10^3 - 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,42 = 3074 \text{ кДж / кг}.$$

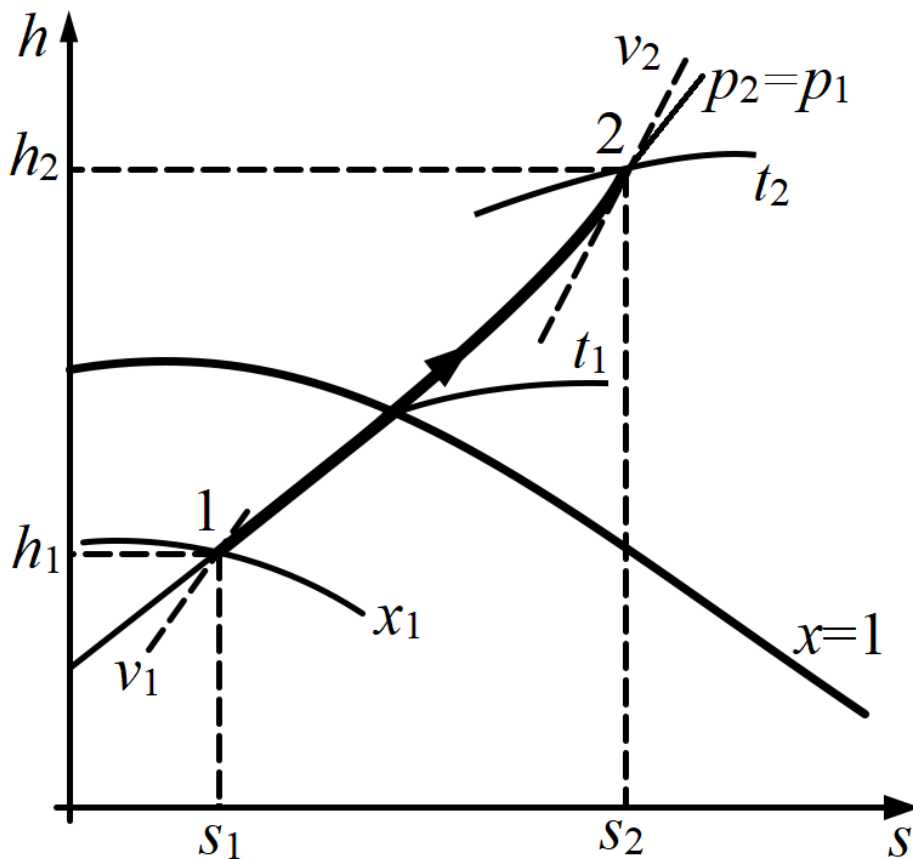


Рисунок 2.4. $h-s$ діаграма ізобарного процесу для реального газу

2.2. Діаграма $P - v$ (зображення процесу)

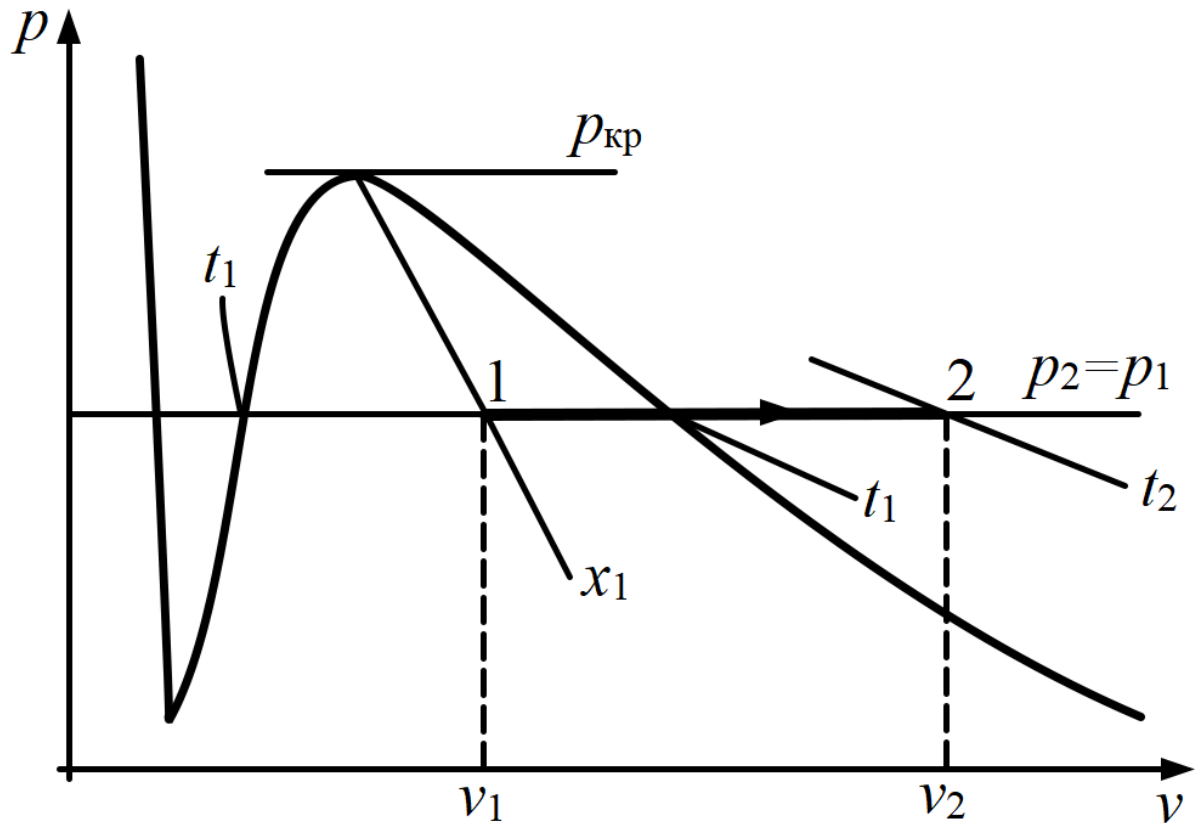


Рисунок 2.5. $P - v$ діаграма ізобарного процесу для реального газу

2.3. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і діаграмами

Таблиця 2.1. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і ентальпійними діаграмами водяної пари для ізобарного процесу

Назва величини, позначання	Таблиці		$t - s$ діаграма		$h - s$ діаграма	
	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2
Абсолютний тиск P , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Питомий об'єм v , м ³ / кг	0,2	0,42	0,2	0,42	0,2	0,42
Термодинамічна температура t , °C	170,42	462,4	170	460	170	460
Питома ентальпія h , кДж / кг	2420,33	3410,8	2409,25	3393,9	2430	3410

Продовження таблиці 2.1.

Питома ентропія s , кДж / (кг · К)	5,8771	7,694	5,866	7,75	5,9	7,78
Питома внутрішня енергія u , кДж / кг	2260,33	3074,8	2249,25	3057,9	2270	3074

2.2. Ізотермічний процес

$V_1 = 4,5 \text{ м}^3$ водяної пари (ІГ, $c = \text{const}$) при тискові $P = 20$ бар і питомому об'ємі $v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$ здійснює ізотермічний процес до об'єму $V_2 = 105 \text{ м}^3$. Визначити всі початкові і кінцеві параметри робочого тіла, роботу і кількість теплоти в процесі. Як зміняться результати розрахунку, якщо при тих же вихідних даних цей процес здійснюється з ідеальним газом H_2O при теплоємностях, що залежать від температури?

Задано:

$$V_1 = 4,5 \text{ м}^3$$

$$P = 20 \text{ бар} = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_2 = 105 \text{ м}^3$$

$$T = \text{const}$$

Визначити:

$$h_1, h_2, s_1, s_2, u_1, u_2,$$

$$\Delta u, \Delta h, \Delta s,$$

$$t_1, t_2, p_2, v_2, l, l_n, q - ?$$

Частина №1

1. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – ідеальний газ.

1.1. Визначення параметрів у початковому стані.

1.1.1. Термічні параметри (P_1, T_1, v_1).

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 20 \text{ бар} = 2 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$)

Третій термічний параметр – термодинамічну температуру – обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу $P_1 v_1 = R T_1$:

$$T_1 = \frac{P v_1}{R} = \frac{20 \cdot 10^5 \cdot 0,08}{461,9} = 346 \text{ К} .$$

У цьому рівнянні питома газова стала обчислюється за формулою:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,4619 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

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

$\mu = 18 \text{ кг} / \text{кмоль}$ – молярна маса водяної пари.

Маса водяної пари, що бере участь у процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{4,5}{0,08} = 56,25 \text{ кг}.$$

1.1.2. Калоричні параметри (u_1, h_1, s_1).

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією)

1) З таблиць молярних теплоємностей, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії, для водяної пари (H_2O), як трьохатомного ідеального газу, знаходимо:

а) молярна ізобарна теплоємність

$$c_{\mu p} = \frac{9}{2} R_{\mu} = \frac{9 \cdot 8314}{2} = 37413 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 37,413 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

б) молярна ізохорна теплоємність

$$c_{\mu v} = \frac{7}{2} R_{\mu} = \frac{7 \cdot 8314}{2} = 29099 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 29,099 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

2) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) питома ізохорна теплоємність

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

3) Питома ентальпія

а) $h_1 = c_p \cdot t_1 = 2,08 \cdot 73 = 151,84 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $h_1 = c_p \cdot T_1 = 2,08 \cdot 346 = 719,68 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{К}$.

4) Питома внутрішня енергія

а) $u_1 = c_v \cdot t_1 = 1,62 \cdot 73 = 118,26$ кДж/кг, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $u_1 = c_v \cdot T_1 = 1,62 \cdot 346 = 560,52$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

5) Питома ентропія

$$s_1 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{346}{273} - 0,4619 \ln \frac{20 \cdot 10^5}{10^5} = -0,891 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) < 0$$

початок відліку $T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 0,1$ МПа .

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 73^\circ\text{C}$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_1 = 639,16$ кДж/кг , початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома внутрішня енергія $u_1 = 479,41$ кДж/кг , початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_1 = s^0(T_1) - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 10,7539 - 0,4619 \ln \frac{20 \cdot 10^5}{10^5} = 9,37 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) ,$$

де $s^0(T_1) = 10,7539$ кДж/(кг · К) , початок відліку $T_0 = 0\text{K}$, $P_0 = 0,1$ МПа .

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 73^\circ\text{C}$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність

$$c_{pm}^{t_1} = 1,869 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Середня питома ізохорна теплоємність

$$c_{vm}^{t_1} = 1,408 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Питома ентальпія

$$h_1 = c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,869 \cdot 73 = 136,44 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C} ;$$

Питома внутрішня енергія

$$u_1 = c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,408 \cdot 73 = 102,78 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C} ;$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані.

1.2.1. Термічні параметри (p_2, T_2, v_2).

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: термодинамічна температура ($T = 346\text{K} = 73^\circ\text{C}$), яка є постійною ($T_1 = T_2 = T$) і об'єм ($V_2 = 105\text{ м}^3$).

Невідомий термічний параметр – абсолютний тиск – визначаємо, використовуючи рівняння зв'язку: $p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}$, звідси

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{20 \cdot 10^5 \cdot 4,5}{105} = 0,86\text{ МПа} \quad (p_2 = 8,6\text{ бар}).$$

Знайдемо питомий об'єм

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{105}{56,25} = 1,86\text{ м}^3 / \text{кг}.$$

1.2.2. Калоричні параметри (u_2, h_2, s_2).

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією).

1) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) питома ізохорна теплоємність

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

2) Питома ентальпія

а) $h_2 = h_1 = 151,84\text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $h_2 = h_1 = 719,68\text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

3) Питома внутрішня енергія

а) $u_2 = u_1 = 118,26\text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

б) $u_2 = u_1 = 560,52\text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

4) Питома ентропія

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{346}{273} - 0,4619 \ln \frac{8,6 \cdot 10^5}{10^5} = -0,501 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

початок відліку $T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = t_1 = 73^\circ\text{C}$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_2 = h_1 = 639,16 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома внутрішня енергія $u_2 = u_1 = 479,41 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_2 = s^0(T_2) - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 10,7539 - 0,4619 \ln \frac{8,6 \cdot 10^5}{10^5} = 9,76 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $s^0(T_2) = s^0(T_1) = 10,7539 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = t_1 = 73^\circ\text{C}$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність

$$c_{pm}^{t_2} = 1,869 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Середня питома ізохорна теплоємність

$$c_{vm}^{t_2} = 1,408 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питома ентальпія

$h_2 = h_1 = 136,44 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Питома внутрішня енергія

$u_2 = u_1 = 102,78 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.3. Зміна калоричних параметрів у процесі

1.3.1. Обчислення зміни калоричних параметрів за наближеними формулами

(випадок $c = \text{const}$)

Зміна питомої ентальпії:

$\Delta h = c_p \cdot (t_2 - t_1) = 0$ кДж/кг, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$; $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0$ кДж/кг,
початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

Перевірка:

$\Delta h = h_2 - h_1 = 151,84 - 151,84 = 0$ кДж/кг, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

$\Delta h = h_2 - h_1 = 719,68 - 719,68 = 0$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

Зміна питомої внутрішньої енергії

$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = 0$ кДж/кг, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

Перевірка:

$\Delta u = u_2 - u_1 = 118,26 - 118,26 = 0$ кДж/кг, початок відліку $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

$\Delta u = u_2 - u_1 = 560,52 - 560,52 = 0$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$.

З пунктів 1 і 2 ми бачимо, що зміна параметрів не залежить від початку відліку і шкали, за якою ми вимірюємо температуру (Цельсія чи Кельвіна).

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 2,08 \cdot \ln \frac{346}{346} - 0,4619 \ln \frac{8,6 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^5} = 0,39 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) > 0.$$

Перевірка:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = -0,501 - (-0,891) = 0,39 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Так як зміна калоричних параметрів обчислюється за наближеними формулами, то значення отримані неточно.

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 0,39 \cdot 56,25 = 21,94 \text{ кДж} / \text{K}.$$

1.3.2. Обчислення зміни калоричних параметрів за уточненими формулами (випадок $c = c(T)$)

1) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 639,16 - 639,16 = 0 \text{ кДж/кг}.$$

Зміну питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 479,41 - 479,41 = 0 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 10,7539 - 10,7539 - 0,4619 \ln \frac{8,6 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^5} = 0,39 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 0,39 \cdot 56,25 = 21,94 \text{ кДж / К}.$$

2) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,869 \cdot 73 - 1,869 \cdot 73 = 0 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 136,44 - 136,44 = 0 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,408 \cdot 73 - 1,408 \cdot 73 = 0 \text{ кДж/кг},$$

Перевірка:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 102,78 - 102,78 = 0 \text{ кДж/кг};$$

В повних величинах

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 0 \cdot 56,25 = 0 \text{ кДж}.$$

1.4. Визначення характеристик процесу (l , l_n , L , L_n , q , Q)

Для процесу $T = \text{const}$ деформаційна робота (l , L) і робота переміщення (l_n , L_n) не зв'язані з поняттям теплоємності.

Питому деформаційну роботу обчислюємо за формулою:

$$l = -R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = -0,4619 \cdot 346 \cdot \ln \frac{8,6 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^5} = 134,9 \text{ кДж/кг} = 0,135 \text{ МДж/кг}.$$

В повних величинах

$$L = l \cdot m = 0,135 \cdot 10^6 \cdot 56,25 = 7,59 \text{ МДж}.$$

З першого закону ТТД для ІГ в ізотермічному процесі питома робота переміщення дорівнює:

$$l = l_n = 0,135 \text{ МДж/кг}.$$

В повних величинах

$$L_n = l_n \cdot m = 0,135 \cdot 10^6 \cdot 56,25 = 7,59 \text{ МДж}.$$

Теплота з першого закону термодинаміки для ізобарного процесу $q = l = l_n$:

1) випадок $c = \text{const}$: $q = 0,135 \text{ МДж/кг}$,

в повних величинах $Q = q \cdot m = 0,135 \cdot 56,25 = 7,59 \text{ МДж}$.

1.5. Зображення процесу в $P-v$ і $T-s$ діаграмах

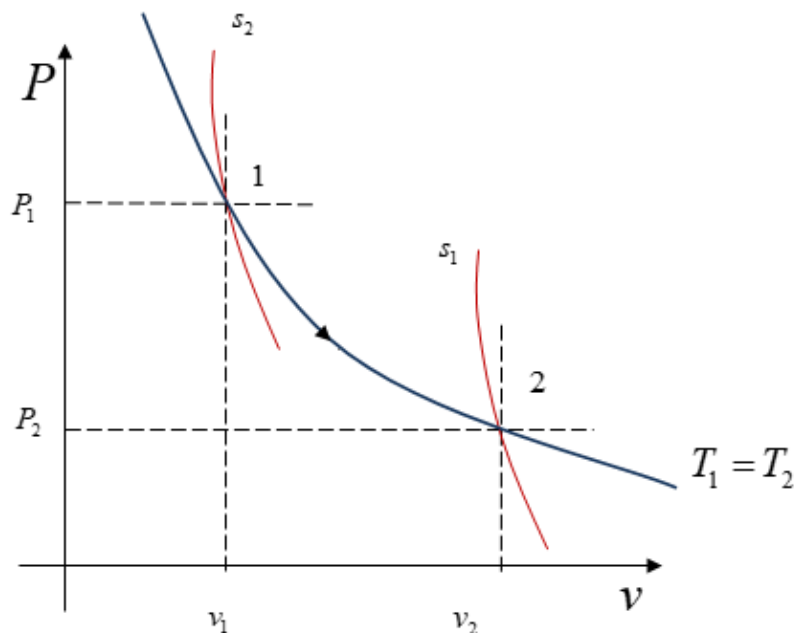


Рисунок 2.6. $P-v$ діаграма ізотермічного процесу для ідеального газу

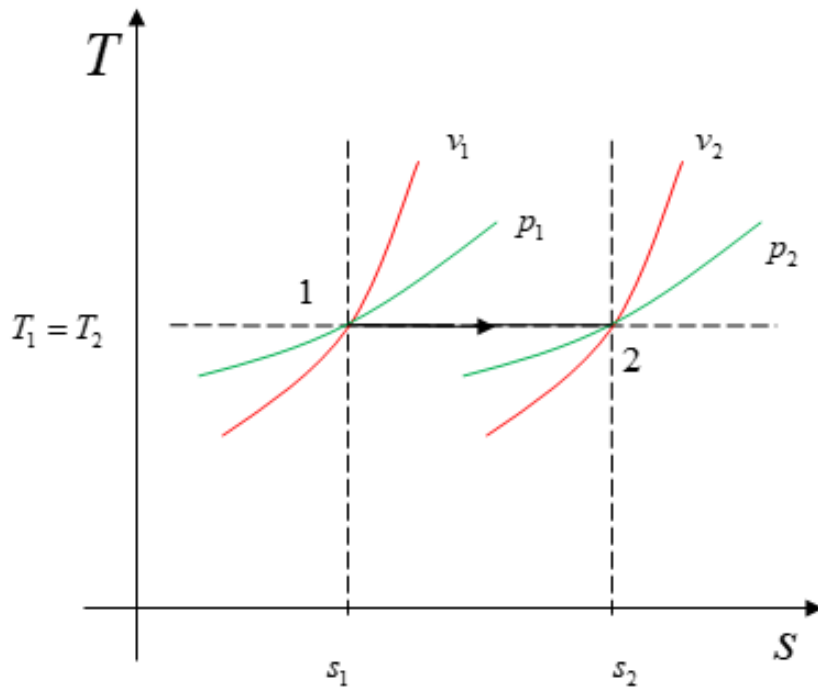


Рисунок 2.7. $T - s$ діаграма ізотермічного процесу для ідеального газу

Частина №2

2. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – реальний газ

2.1. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за допомогою таблиць водяної пари

2.1.1. Визначення параметрів у початковому стані (в т. 1).

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 20 \text{ бар} = 2 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$).

Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в табл. № 2 знаходимо :

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0011766 \text{ м}^3/\text{кг}$;

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,09953 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара, відповідно $v = v_x = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Параметри ВНП знаходимо за допомогою таблиці № 2 і формул змішування.

Ступінь сухості x даної ВНП:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,08 - 0,0011766}{0,09953 - 0,0011766} = 0,8 \text{ кг}_{\text{снп}} / \text{кг}_{\text{внп}}.$$

Питому ентальпію і питому ентропію обчислюємо за формулами змішування; значення необхідних параметрів h' , h'' , s' , s'' знаходимо за тиском $P < P_{\text{кр}}$ у таблиці № 2:

– питома ентальпія

$$h_1 = h_x = h'(1 - x) + h'' \cdot x = 908,6 \cdot (1 - 0,8) + 2797,4 \cdot 0,8 = 2419,64 \text{ кДж / кг};$$

– питома ентропія

$$s_1 = s_x = s'(1 - x) + s'' \cdot x = 2,4468 \cdot (1 - 0,8) + 6,3373 \cdot 0,8 = 5,5592 \text{ кДж / кг}.$$

Питому внутрішню енергію розраховують за формулою:

$$u_1 = h_1 - P v_1 = 2419,64 - 2 \cdot 10^3 \cdot 0,08 = 2259,64 \text{ кДж / кг}.$$

Температура ВНП в точці 1 рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 212,37^\circ \text{C}$.

2.1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані (в т. 2).

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: термодинамічна температура ($t = 212,37^\circ \text{C} = 485,37 \text{K}$) і об'єм ($V_2 = 105 \text{ м}^3$). Ці данні дозволяють знайти всі інші.

Оскільки $m = \text{const}$ то

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{V_2}{v_2}.$$

Отже, маса водяної пари, що бере участь у процесі

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{4,5}{0,08} = 56,25 \text{ кг}.$$

Звідси отримаємо питомий об'єм в точці 2

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{105}{56,25} = 1,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

З метою визначення стану реального газу за температурою $t = t_n(p)$ в таблиці № 1 знаходимо

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0011766 \text{ м}^3/\text{кг};$

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,09953 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Так як при $t = t_n(p)$ і $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара. Її параметри знаходимо за таблицею № 3:

- тиск $p = 0,13 \text{ МПа}$;
- питома ентальпія $h_2 = 2898,3 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питома ентропія $s_2 = 7,7877 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - p v_2 = 2898,3 - 0,13 \cdot 10^3 \cdot 1,87 = 2655,2 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

2.1.3. Зміна калоричних параметрів в процесі

– зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 2898,30 - 2419,64 = 478,66 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– зміна питомої ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7,7877 - 5,5592 = 2,2285 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К});$$

– зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 2655,20 - 2259,64 = 395,56 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 478,66 \cdot 56,25 = 26924,63 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 395,56 \cdot 56,25 = 22250,25 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 2,2285 \cdot 56,25 = 125,35 \text{ кДж} / \text{К}.$$

2.1.4. Характеристики процесу l, L, l_n, L_n, q, Q

Так як даний процес ізотермічний ($T = \text{const}$), тому в відповідності з першим законом термодинаміки знаходимо:

– питома теплота

$$q = T \Delta s = 485,37 \cdot 2,2285 = 1081,65 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома деформаційна робота

$$l = q - \Delta u = 1081,65 - 395,56 = 686,09 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома робота переміщення

$$l_n = q - \Delta h = 1081,65 - 478,66 = 602,99 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

В повних величинах:

$$Q = q \cdot m = 1081,65 \cdot 56,25 = 60842,81 \text{ кДж} = 60,84 \text{ МДж};$$

$$L = l \cdot m = 686,09 \cdot 56,25 = 38592,56 \text{ кДж} = 38,59 \text{ МДж};$$

$$L_n = l_n \cdot m = 602,99 \cdot 56,25 = 33918,19 \text{ кДж} = 33,92 \text{ МДж}.$$

2.2. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за ентропійними діаграмами

2.2.1. Діаграма $t-s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 20 \text{ бар} = 2 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ на діаграмі $t-s$ знаходимо:

- питомий об'єм насиченої рідини: $v' \approx 0,001 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питомий об'єм сухої насиченої пари: $v'' \approx 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як при $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара.

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари. Її параметри:

– питома ентальпія

$$h_1 = 578 \text{ ккал} / \text{кг} = 578 \cdot 4,19 = 2422 \text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома ентропія

$$s_1 = 1,33 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{К}) = 1,33 \cdot 4,19 = 5,58 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

– ступінь сухості

$$x = 0,8 \text{ кг}_{\text{снп}} / \text{кг}_{\text{внп}}.$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - P v_1 = 2422 - 2 \cdot 10^3 \cdot 0,08 = 2262 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Температура ВНП у точці 1 рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 210 \text{ }^\circ\text{C}$.

Маса водяної пари, що бере участь у процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{4,5}{0,08} = 56,25 \text{ кг}.$$

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: термодинамічна температура ($t_2 = 210^\circ\text{C}$) і об'єм ($V_2 = 105 \text{ м}^3/\text{кг}$).

Оскільки $m = \text{const}$ то питомий об'єм в кінцевій точці

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{105}{56,25} = 1,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так як $t_2 = t_s(p)$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара.

Інші параметри визначаємо за діаграмою $t-s$:

– тиск $p = 0,13 \text{ МПа}$;

– питома ентальпія

$$h_2 = 690 \text{ ккал / кг} = 690 \cdot 4,19 = 2895 \text{ кДж / кг};$$

– питома ентропія

$$s_2 = 1,86 \text{ ккал / (кг} \cdot \text{K)} = 1,86 \cdot 4,19 = 7,8 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}.$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P v_2 = 2895 - 0,13 \cdot 10^3 \cdot 1,87 = 2651,9 \text{ кДж / кг}.$$

Діаграма $t-s$

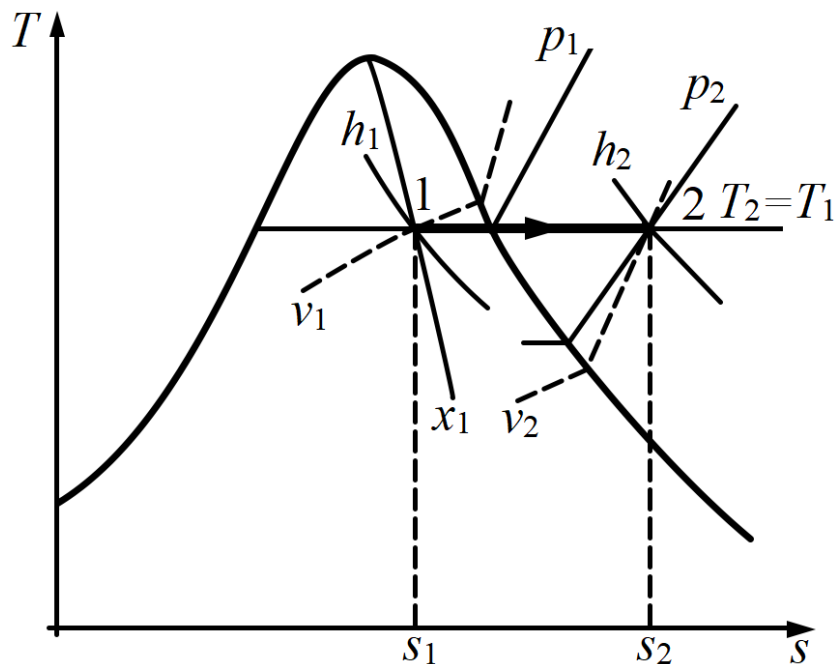


Рисунок 2.8. $T-s$ діаграма ізотермічного процесу для реального газу

2.2.2. Діаграма $h-s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 20 \text{ бар} = 2 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ на діаграма $h-s$ знаходимо:

- питомий об'єм насиченої рідини: $v' \approx 0,001 \text{ м}^3 / \text{кг}$
- питомий об'єм сухої насиченої пари: $v'' = 0,1 \text{ м}^3 / \text{кг}$

Так як при $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара.

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари. Температура ВНП в ній рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 210 \text{ }^\circ\text{C}$ на кривій $x=1$. Параметри в точці 1:

- питома ентальпія $h_1 = 2421 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питома ентропія $s_1 = 5,56 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 2421 - 2 \cdot 10^3 \cdot 0,08 = 2261 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: термодинамічна температура ($t_2 = 210 \text{ }^\circ\text{C}$) і об'єм ($V_2 = 105 \text{ м}^3$). Ці дані дозволяють знайти всі інші.

Оскільки $m = \text{const}$ то

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{V_2}{v_2}.$$

Отже, маса водяної пари, що бере участь у процесі

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{4,5}{0,08} = 56,25 \text{ кг}.$$

Звідси отримаємо питомий об'єм в точці 2

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{105}{56,25} = 1,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

З метою визначення стану реального газу за температурою $t = t_s(p)$

на діаграмі $h-s$ знаходимо:

- питомий об'єм насиченої рідини: $v' \approx 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$
- питомий об'єм сухої насиченої пари: $v'' = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$

Так як $t = t_s(p)$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара.

Інші параметри визначаємо за діаграмою $h-s$:

- тиск $p = 0,13 \text{ МПа}$;
- питома ентальпія $h_2 = 2895 \text{ кДж/кг}$;
- питома ентропія $s_2 = 7,81 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - p v_2 = 2895 - 0,13 \cdot 10^3 \cdot 1,87 = 2651,9 \text{ кДж/кг}.$$

Діаграма $h-s$

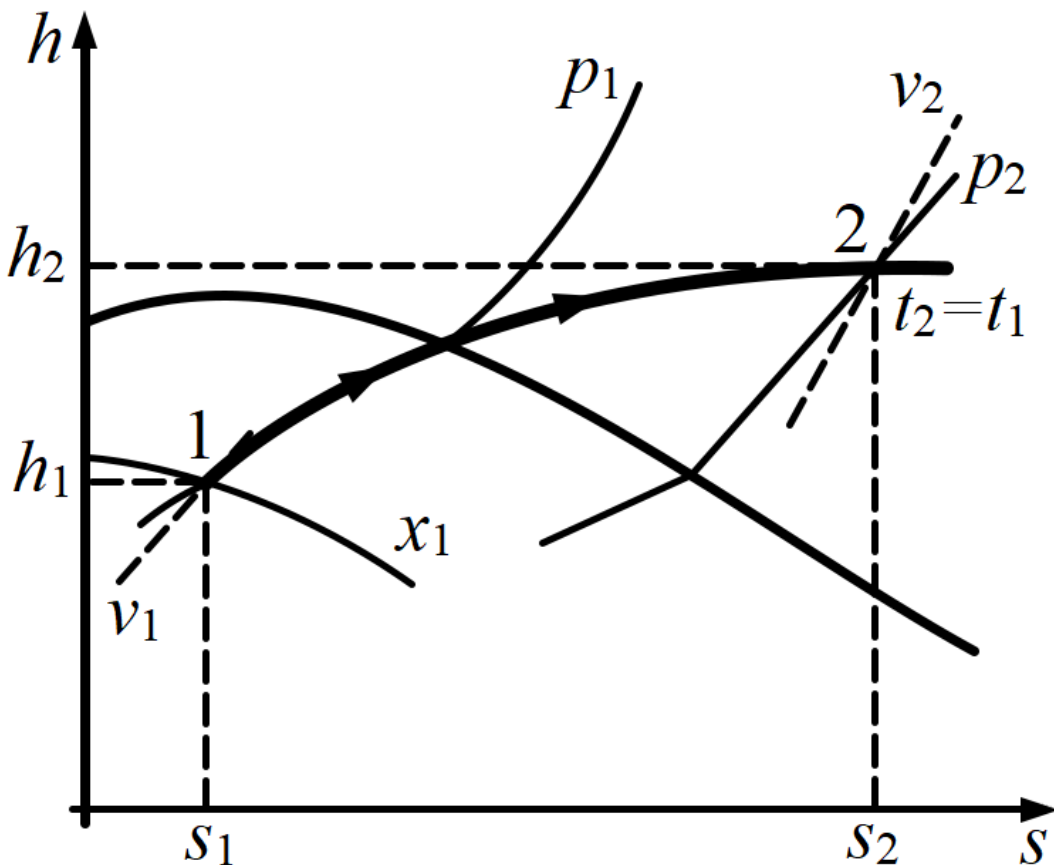


Рисунок 2.9. $h-s$ діаграма ізотермічного процесу для реального газу

2.3. Діаграма $P - v$

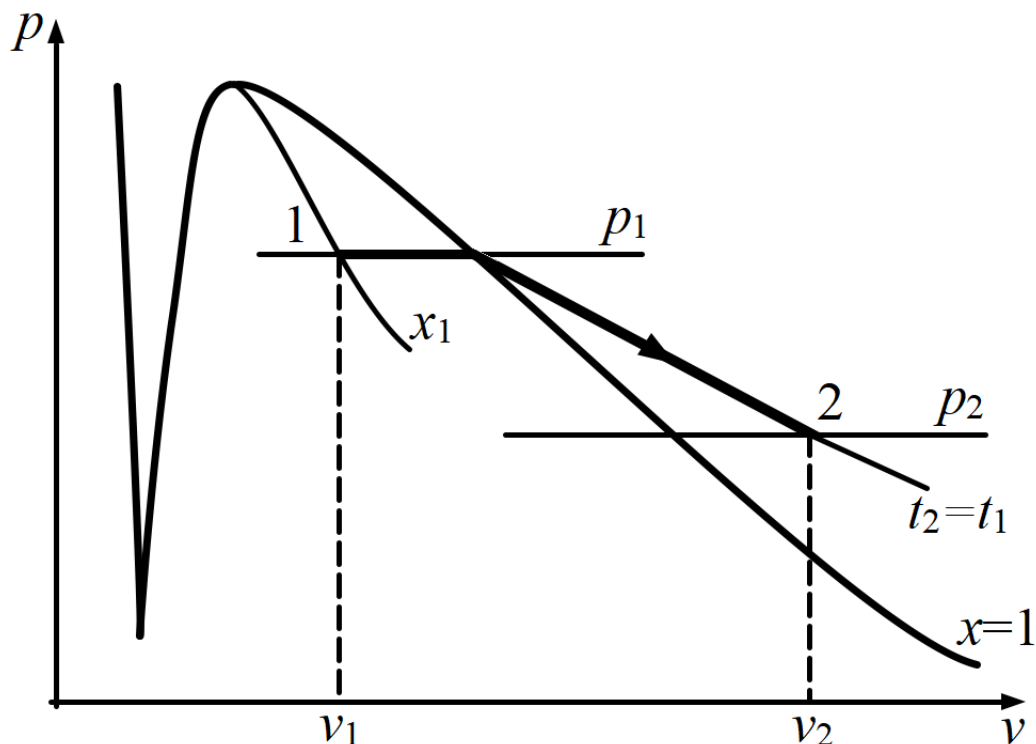


Рисунок 2.10. $P - v$ діаграма ізотермічного процесу для реального газу

2.4. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і діаграмами

Таблиця 2.2. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і ентропійними діаграмами водяної пари для ізобарного процесу

Назва величини, позначання	Таблиці		$t - s$ діаграма		$h - s$ діаграма	
	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2
Абсолютний тиск P , МПа	2	0,13	2	0,14	2	0,13
Питомий об'єм v , $\text{м}^3 / \text{кг}$	0,08	1,87	0,08	1,87	0,08	1,87
Термодинамічна температура t , $^{\circ}\text{C}$	212,37	212,37	210	210	210	210
Питома ентальпія h , $\text{кДж} / \text{кг}$	2419,64	2898,3	2422	2895	2421	2895
Питома ентропія s , $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$	5,5592	7,7877	5,58	7,8	5,56	7,81
Питома внутрішня енергія u , $\text{кДж} / \text{кг}$	2259,64	2655,2	2262,0	2651,9	2261,0	2651,9

2.3. Ізоентропний процес

$V = 2,5 \text{ м}^3$ водяної пари (ІГ, $c = \text{const}$) при тискові $P_1 = 100$ бар і температурі $t_1 = 440^\circ \text{C}$ здійснює ізоентропний процес до тиску $P_2 = 3$ бар. Визначити всі початкові і кінцеві параметри робочого тіла, роботу і кількість теплоти в процесі. Як зміняться результати розрахунку, якщо при тих же вихідних даних цей процес здійснюється з газом H_2O при теплоємностях, що залежать від температури $c = c(T)$?

Задано:

$$V = 2,5 \text{ м}^3$$

$$P_1 = 100 \text{ бар} = 100 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$t_1 = 440^\circ \text{C}; T = 713 \text{ К}$$

$$P_2 = 3 \text{ бар} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$S = \text{const}$$

Визначити:

$$h_1, h_2, s_1, s_2, u_1, u_2,$$

$$\Delta u, \Delta h, \Delta s,$$

$$t_1, t_2, p_2, v_2, l, l_n, q - ?$$

Частина №1

1. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – ідеальний газ.

1.1. Визначення параметрів у початковому стані.

1.1.1. Термічні параметри (P_1, T_1, v_1)

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск $P_1 = 100 \text{ бар} = 100 \cdot 10^5 \text{ Па}$ і термодинамічна температура ($T = 713 \text{ К}$). Третій термічний параметр – питомий об'єм – обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу

$$P_1 v_1 = R T_1 :$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{461,9 \cdot 713}{10^7} = 0,033 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

У цьому рівнянні питома газова стала обчислюється за формулою:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,4619 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) ,$$

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

$\mu = 18 \text{ кг} / \text{кмоль}$ – молярна маса водяної пари.

Маса водяної пари, що бере участь у процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2,5}{0,03} = 83,3 \text{ кг}.$$

1.1.2. Калоричні параметри (u_1, h_1, s_1).

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією).

1) З таблиць молярних теплоємностей, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії, для водяної пари (H_2O), як трьохатомного ідеального газу, знаходимо:

а) молярна ізобарна теплоємність:

$$c_{\mu p} = \frac{9}{2} R_{\mu} = \frac{9 \cdot 8314}{2} = 37413 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{K)} = 37,413 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)};$$

б) молярна ізохорна теплоємність:

$$c_{\mu v} = \frac{7}{2} R_{\mu} = \frac{7 \cdot 8314}{2} = 29099 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{K)} = 29,099 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)}.$$

2) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) Питома ізобарна теплоємність:

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

б) Питома ізохорна теплоємність:

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

3) Питома ентальпія:

$$а) h_1 = c_p \cdot t_1 = 2,08 \cdot 440 = 915,2 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$б) h_1 = c_p \cdot T_1 = 2,08 \cdot 713 = 1483,04 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K};$$

4) Питома внутрішня енергія:

$$а) u_1 = c_v \cdot t_1 = 1,62 \cdot 440 = 712,8 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$б) u_1 = c_v \cdot T_1 = 1,62 \cdot 713 = 1155,06 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K};$$

5) Питома ентропія:

$$s_1 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{713}{273} - 0,4619 \ln \frac{10^7}{10^5} = -0,14 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)} < 0,$$

початок відліку $T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, при $t_1 = 440^\circ C$ знаходимо:

Питома ентальпія $h_1 = 1364,62$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0 K$;

Питома внутрішня енергія $u_1 = 1035,5$ кДж/кг, початок відліку $T_0 = 0 K$;

Питома ентропія розраховується за формулою:

$$s_1 = s^0(T_1) - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 12,1735 - 0,4619 \ln \frac{10^7}{10^5} = 10,047 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot K),$$

де $s^0(T_1) = 12,1735$ кДж/(кг · K), початок відліку $T_0 = 0 K$, $P_0 = 0,1$ МПа.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 440^\circ C$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність $c_{pm}^{t_1} = 1,96$ кДж/(кг · K).

Середня питома ізохорна теплоємність $c_{vm}^{t_1} = 1,498$ кДж/(кг · K).

Питома ентальпія:

$$h_1 = c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,96 \cdot 440 = 862,4 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ C.$$

Питома внутрішня енергія:

$$u_1 = c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,498 \cdot 440 = 659,12 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ C;$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані

1.2.1. Термічні параметри (P_2, T_2, v_2)

Випадок $c = \text{const}$ (по молекулярно-кінетичній теорії):

За умовою задачі в точці 2 задано один параметр: абсолютний тиск ($P_2 = 3 \text{ бар} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$). Другий параметр (якого не вистачає до двох незалежних)

- питомий об'єм (v_2) знайдемо з рівняння зв'язку, що випливає з рівняння ізоентропного процесу для ІГ в змінних p, v .

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ де } k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu v}} = \frac{9}{7} = 1,29 - \text{показник ізоентропи для ІГ у випадку}$$

$c = \text{const}$;

$$\text{звідси } v_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot v_1 = \left(\frac{10^7}{3 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{1,29}} \cdot 0,033 = 0,5 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

Третій термічний параметр - термодинамічну температуру - обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу $P_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2$

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot v_2}{R} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{461,9} = 325 \text{ K}, \quad (t_1 = 52^\circ \text{C});$$

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією)

Термодинамічну температуру визначаємо, використовуючи рівняння зв'язку:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\pi_{02}(T_2)}{\pi_{01}(T_1)}, \text{ де } \pi_{01}(T_1), \pi_{02}(T_2) - \text{функції температури для даного ІГ (див.}$$

додаток ДА.5);

$$\pi_{01}(T_1) = \pi_{01}(440) = 28,56;$$

$$\pi_{02}(T_2) = \pi_{01}(T_1) \cdot \frac{P_2}{P_1} = 28,565 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^6}{10^7} = 0,857.$$

За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O), як ідеального газу при $\pi_{02}(T_2) = 0,857$ знаходимо:

$$T_2 = 311,2 \text{ K}, \quad (t_1 = 38,2^\circ \text{C}).$$

Питомий об'єм знаходимо, використовуючи рівняння зв'язку для параметрів: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{\theta_{02}(T_2)}{\theta_{01}(T_1)}$, де $\theta_{01}(T_1), \theta_{02}(T_2)$ - функції температури для даного ІГ

(див. додаток ДА.5);

$$\theta_{01}(T_1) = \theta_{01}(713) = 1152,1;$$

$$\theta_{02}(T_2) = \theta_{02}(311,2) = 16759,2;$$

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\theta_{02}(T_2)}{\theta_{01}(T_1)} = 0,033 \cdot \frac{16759,2}{1152,1} = 0,48 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Похибка спрощеного підрахунку ($c = \text{const}$) в порівнянні з уточненням ($c = c(T)$) рівна:

$$\Delta = \frac{v(\text{кст}) - v(\text{мкт})}{v(\text{кст})} \cdot 100\% = \frac{|0,48 - 0,5|}{0,48} \cdot 100\% = 4,2\%.$$

1.2.2. Визначення калоричних параметрів (u_2, h_2, s_2)

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією)

З пункту 1.1.2 відомо, що $c_p = 2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $c_v = 1,62 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

1) Питома ентальпія

$$h_2 = c_p \cdot t_2 = 2,08 \cdot 52 = 108,16 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 2,08 \cdot 325 = 676 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{К};$$

2) Питома внутрішня енергія

$$u_2 = c_v \cdot t_2 = 1,62 \cdot 52 = 84,24 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 1,62 \cdot 325 = 526,5 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{К};$$

3) Питома ентропія

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{325}{273} - 0,4619 \ln \frac{3 \cdot 10^5}{10^5} = -0,14 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) < 0 \text{ початок}$$

відліку $T_0 = 273\text{К}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок $c = c(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 38,2^\circ\text{C}$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_2 = 573,62 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{К}$;

Питома внутрішня енергія $u_2 = 430,02 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{К}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_2 = s^0(T_2) - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 10,5544 - 0,4619 \ln \frac{3 \cdot 10^5}{10^5} = 10,047 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $s^0(T_2) = 10,5544$ кДж/(кг · К), початок відліку $T_0 = 0\text{ К}$, $P_0 = 0,1$ МПа.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 38,2^\circ\text{С}$ знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність $c_{pm}^{t_2} = 1,865$ кДж/(кг · К).

Середня питома ізохорна теплоємність $c_{vm}^{t_2} = 1,403$ кДж/(кг · К).

Питома ентальпія

$$h_2 = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 = 1,865 \cdot 38,2 = 71,24 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{С};$$

Питома внутрішня енергія

$$u_2 = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 = 1,403 \cdot 38,2 = 53,59 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{С};$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.3. Зміна калоричних параметрів у процесі.

1.3.1. Обчислення зміни калоричних параметрів за наближеними формулами

(випадок $c = \text{const}$)

Зміна питомої ентальпії:

$$\Delta h = c_p \cdot (t_2 - t_1) = 2,08 \cdot (52 - 440) = -807,04 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{С};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 2,08 \cdot (325 - 713) = -807,04 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{ К};$$

Перевірка:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 108,16 - 915,2 = -807,04 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{С};$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 676 - 1483,04 = -807,04 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{ К};$$

Зміна питомої внутрішньої енергії:

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = 1,62 \cdot (52 - 440) = -628,56 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{С};$$

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,62 \cdot (325 - 713) = -628,56 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{ К};$$

Перевірка:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 84,24 - 712,8 = -628,56 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 526,5 - 1155,06 = -628,56 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

З пунктів 1 і 2 ми бачимо, що зміна параметрів не залежить від початку відліку і шкали, за якою ми вимірюємо температуру (Цельсія чи Кельвіна).

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 2,08 \cdot \ln \frac{325}{713} - 0,4619 \ln \frac{3 \cdot 10^5}{10^7} = 0;$$

Перевірка: $\Delta s = s_2 - s_1 = -0,14 - (-0,14) = 0.$

Зміни калоричних параметрів (ΔU , ΔH , ΔS) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = -807,04 \cdot 83,3 = 67226,4 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = -628,56 \cdot 83,3 = -52359,1 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 0.$$

1.3.2. Обчислення зміни калоричних параметрів за уточненими формулами (випадок $c = c(T)$)

Користуючись значеннями, отриманими з таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 573,62 - 1364,62 = -791 \text{ кДж/кг};$$

Зміну питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 430,02 - 1035,5 = -605,48 \text{ кДж/кг};$$

Перевірка: З рівняння зв'язку

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(pv), \text{ де } \Delta(pv) = \left\{ \text{згідно рівнянню стану } II \right\} = R\Delta T.$$

Зміну питомої ентропії

$$\Delta s = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 10,5544 - 12,1735 - 0,4619 \ln \frac{3 \cdot 10^5}{10^7} = 0;$$

Перевірка: $\Delta s = s_2 - s_1 = 10,047 - 10,047 = 0.$

Зміни калоричних параметрів (ΔU , ΔH , ΔS) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = -791 \cdot 83,3 = -65890,3 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = -605,48 \cdot 83,3 = -50436,5 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 0.$$

2) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць середніх теплоємностей для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 71,24 - 862,4 = -791,16 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 53,59 - 659,12 = -605,53 \text{ кДж/кг}.$$

Питома ентропія (а отже і її зміна) за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

Зміни калоричних параметрів ($\Delta U, \Delta H, \Delta S$) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = -791,16 \cdot 83,3 = -65903,6 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = -605,53 \cdot 83,3 = -50440,6 \text{ кДж}.$$

1.4. Визначення характеристик процесу (q, Q, l, l_n, L, L_n).

Оскільки в ізоентропних процесах згідно 2-му закону ТТД в рівноважних процесах ($\delta q_r = 0$), маємо: $q = 0$. В повних величинах: $Q = q \cdot m = 0$.

Випадок $c = \text{const}$ (по молекулярно-кінетичній теорії):

З рівняння енергобалансу через деформаційну роботу в питомих величинах: $q = \Delta u + l$, у випадку $q = 0$ маємо: $l = -\Delta u$.

1) Питому деформаційну роботу знаходимо з формули:

$$l = -\Delta u = -c_v \cdot (T_2 - T_1) = -c_v \cdot (t_2 - t_1) = 628,56 \text{ кДж/кг} > 0,$$

робота відводиться від робочого тіла.

$$\text{Перевірка: } l_{(s)} = -\Delta u = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{0,4619}{1,29-1} \cdot (713 - 325) = 617,99 \text{ кДж/кг}.$$

У повних величинах:

$$L = l \cdot m = 628,56 \cdot 83,33 = 52377,9 \text{ кДж}.$$

З рівняння першого закону ТТД через роботу переміщення в питомих величинах: $q = \Delta h + l_n$, у випадку ізоентропного процесу ($q = 0$) маємо:

$$l_n = -\Delta h = 807,04 \text{ кДж/кг.}$$

Перевірка: $l_{n(s)} = k \cdot l_{(s)} = 1,29 \cdot 617,99 = 797,2 \text{ кДж/кг.}$

У повних величинах:

$$L_n = l_n \cdot m = 807,04 \cdot 83,33 = 67250,64 \text{ кДж.}$$

Випадок $s = s(T)$ (по квантово-статистичній теорії).

З рівняння енергобалансу через деформаційну роботу в питомих величинах: $q = \Delta u + l$, у випадку $q = 0$ маємо: $l = -\Delta u$.

2) Питому деформаційну роботу знаходимо з формули:

$$l = -\Delta u = 605,48 \text{ кДж/кг}$$

У повних величинах:

$$L = l \cdot m = 605,48 \cdot 83,33 = 50454,65 \text{ кДж.}$$

З рівняння першого закону ТТД через роботу переміщення в питомих величинах: $q = \Delta h + l_n$, у випадку ізоентропного процесу ($q = 0$) маємо:

$$l_n = -\Delta h = 791 \text{ кДж/кг.}$$

У повних величинах:

$$L_n = l_n \cdot m = 791 \cdot 83,33 = 65914,03 \text{ кДж.}$$

1.5. Зображення процесу в $P-v$ і $T-s$ діаграмах

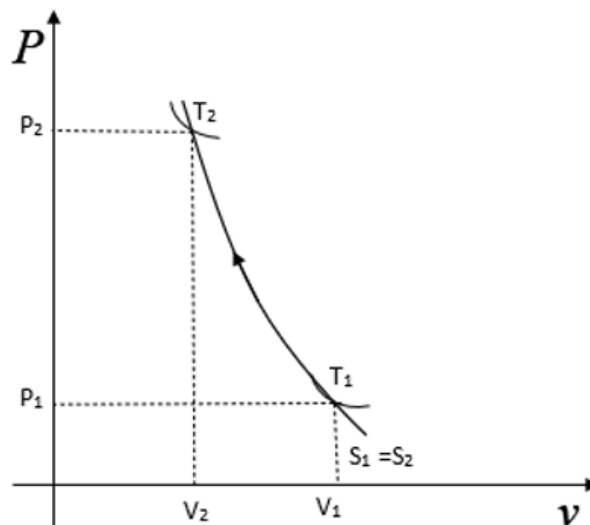


Рисунок 2.11. $P-v$ діаграма ізоентропного процесу для ідеального газу

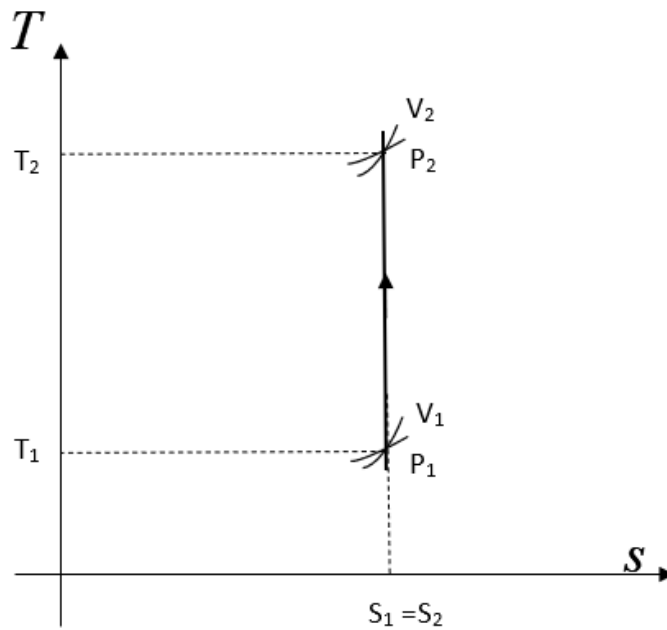


Рисунок 2.12. $T - s$ діаграма ізоентропного процесу для ідеального газу

Частина №2

2. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – реальний газ

2.1. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за допомогою таблиць водяної пари

2.1.1. Термічні параметри (P_1, T_1, v_1) в початковому стані.

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 100 \text{ бар} = 10^7 \text{ Па}$) і термодинамічна температура ($T = 713 \text{ К}$).

1) Для визначення стану робочого тіла за тиском $p_1 < p_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо температуру насичення за даного тиску, оскільки $t > t_n(P_1)$ то даний стан – перегріта пара. Ці параметри визначаємо за таблицею № 3 за даними P_1, t_1 знаходимо:

– питомий об'єм $v_1 = 0,029 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

– ентальпію $h_1 = 3214,8 \text{ кДж} / \text{кг}$;

– ентропію $s_1 = 6,3837 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;

– питома внутрішня енергія

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 3214,8 - 10^7 \cdot 0,0291 \cdot 10^{-3} = 2923,8 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

2.1.2. Термічні параметри (P_2, T_2, v_2) в кінцевому стані.

За умовою задачі в точці 2 задано один параметр: абсолютний тиск ($P_2 = 3 \text{ бар} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$). Другий параметр (якого не вистачає до двох незалежних) знаходимо з рівняння ізоентропного процесу $s = \text{const}$: $s_2 = s_1 = 6,3837 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$. Отже, в точці 2 нам відомо два незалежних параметри, що дає можливість знайти всі інші.

Для визначення стану даного робочого тіла за тиском $p_2 < p_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо:

- питому ентропію насиченої рідини $s' = 1,6717 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;
- питому ентропію сухої насиченої пари $s'' = 6,993 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Так, як при даному $p_2 < p_{кр}$ $s' < s_2 < s''$, то стан робочого тіла – волога насичена пара, тоді $s_2 = s_x$. Параметри вологої насиченої пари знаходимо з таблиці № 2 та формул змішування.

Степінь сухості (x) даної вологої насиченої пари знаходимо з рівняння змішування :

$$x_2 = \frac{s_{x_2} - s'}{s'' - s'} = \frac{6,3837 - 1,6717}{6,993 - 1,6717} = 0,8855 \text{ кг}_{\text{СНП}} / \text{кг}_{\text{ВНП}}.$$

З таблиці №2 за тиском $p_2 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ в таблиці № 2 знаходимо:

- питому ентальпію насиченої рідини $h' = 561,4 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питому ентальпію сухої насиченої пари $h'' = 2725,5 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0010735 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питому об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,60586 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Температура вологої насиченої пари рівна температурі насичення при даному тиску: $t_h(p_2) = 133,54 \text{ }^\circ\text{C}$; $T = 406,54 \text{ К}$.

Питома ентальпія вологої насиченої пари

$$h_2 = h_x = h'(1 - x) + h''x = 561,4(1 - 0,8855) + 2725,5 \cdot 0,8855 = 2477,71 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Питомий об'єм вологої насиченої пари

$$v_2 = v_x = v'(1-x) + v''x = 0,0010735(1-0,8855) + 0,60586 \cdot 0,8855 = 0,537 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Питому внутрішню енергію знаходимо за формулою:

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2477,71 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,5366 \cdot 10^{-3} = 2316,7 \text{ кДж / кг}.$$

2.1.3. Зміна калоричних параметрів в процесі

– зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 2477,71 - 3214,8 = -737,09 \text{ кДж / кг};$$

– зміна питомої внутрішньої енергії:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 2316,723 - 2923,8 = -607,077 \text{ кДж / кг};$$

Зміна питомої ентропії $\Delta s = 0$, оскільки процес ізоентропний.

Маса водяної пари, яка приймає участь в процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2,5}{0,0291} = 85,91 \text{ кг}.$$

Зміни калоричних параметрів ($\Delta U, \Delta H, \Delta S$) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = -737,09 \cdot 85,91 = -63324,2255 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = -607,077 \cdot 85,91 = -52154,3976 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 0.$$

2.1.4. Визначення характеристик процесу (q, Q, l, l_n, L, L_n)

Так, як в ізоентропних процесах згідно 2-му закону ТТД в рівноважних процесах ($\delta q_r = 0$), маємо: $q = 0$. В повних величинах: $Q = q \cdot m = 0$.

З рівняння енергобалансу для закритих систем через деформаційну роботу в питомих величинах: $q = \Delta u + l$, у випадку $q = 0$ маємо: $l = -\Delta u$.

Питома деформаційна робота:

$$l = -\Delta u = 607,08 \text{ кДж / кг}.$$

У повних величинах:

$$L = l \cdot m = 607,08 \cdot 85,91 = 52154,4 \text{ кДж}.$$

З рівняння енергобалансу для закритих систем через роботу переміщення в питомих величинах: $q = \Delta h + l_n$, у випадку $q = 0$ маємо: $l_n = -\Delta h$.

Питома робота переміщення:

$$l_n = -\Delta h = 737,09 \text{ кДж / кг}.$$

У повних величинах:

$$L_n = l_n \cdot m = 737,09 \cdot 85,91 = 63324,2255 \text{ кДж.}$$

2.2 Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за ентропійними діаграмами

2.2.1 Діаграма $t - s$.

За умовою задачі в точці 1 задано два незалежних термічних параметра: абсолютний тиск ($P_1 = 100 \text{ бар} = 10 \text{ МПа}$) и температура ($t_1 = 440 \text{ }^\circ\text{C}$).

Ці дані дозволяють знайти всі інші. З ціллю визначення стану реального газу за тиском $P_1 < P_{кр}$ в $t - s$ діаграмі знаходимо температуру насичення $t_s(P_1) = 310 \text{ }^\circ\text{C}$.

Так, як $t_1 > t_s(P_1)$, то даний стан реального газу – перегріта пара.

Її параметри :

– питома ентальпія

$$h_1 = 772 \text{ ккал / кг} = 772 \cdot 4,19 = 3234,7 \text{ кДж / кг}$$

– питома ентропія

$$s_1 = 1,43 \text{ ккал / (кг} \cdot \text{K)} = 1,43 \cdot 4,19 = 5,99 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)};$$

– питомий об'єм

$$v_1 = 0,028 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

– питома внутрішня енергія

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 3235,14 - 10^7 \cdot 0,028 \cdot 10^{-3} = 2955,14 \text{ кДж / кг.}$$

За умовою задачі в точці 2 заданий один параметр — абсолютний тиск: $P_2 = 3 \text{ бар} = 0,3 \text{ МПа}$. Так як процес ізоентропний, питома ентропія стала: $s_2 = s_1 = 5,99 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші. Для визначення стану за тиском $P_2 < P_{кр}$ по діаграмі $t - s$ знаходимо:

– питому ентропію насиченої рідини $s' = 1,6 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$;

– питому ентропію сухої насиченої пари $s'' = 7 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$.

Оскільки при даному $P_2 < P_{кр}$ $s' < s_2 < s''$, то стан реального газу в цій точці – волога насичена пара. В області волого насиченого пара на перетині ізобари P_2 та ізоентропи s_2 знаходимо точку та її параметри:

– температура вологої насиченої пари $t_2 = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– питомий об'єм $v_2 = 0,5\text{ м}^3 / \text{кг}$;

– питома ентальпія

$$h_2 = 572\text{ ккал} / \text{кг} = 572 \cdot 4,19 = 2396,7\text{ кДж} / \text{кг};$$

– питома ентропія

$$s_2 = s_1 = 1,43\text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{К}) = 1,43 \cdot 4,19 = 5,99\text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P_2 \cdot v_2 = 2396,93 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 2246,93\text{ кДж} / \text{кг}.$$

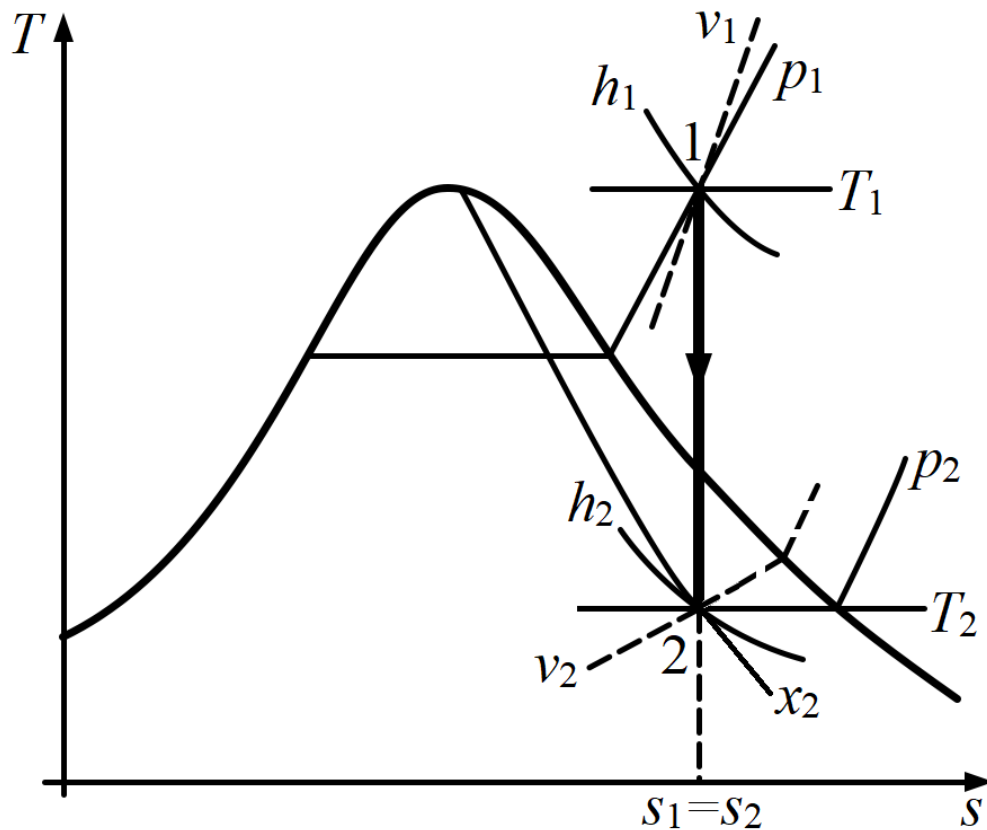


Рисунок 2.13. $T-s$ діаграма ізоентропного процесу для реального газу

2.2.2 Діаграма $h-s$

По умові задачі в точці 1 задано два незалежних термічних параметра: абсолютний тиск ($P_1 = 100\text{ бар} = 10\text{ МПа}$) і температуру ($t_1 = 440\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші. З ціллю визначення стану реального газу за тиском $P_2 < P_{кр}$ в $h-s$ діаграмі знаходимо температуру насичення $t_s(P_2) = 310\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Так, як $t_1 > t_s(P_1)$, то даний стан реального газу – перегріта пара. Інші параметри визначаємо по знайденій точці:

- питомий об'єм $v_1 = 0,023 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питома ентальпія $h_1 = 3219,64 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питома ентропія $s_1 = 6,28 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - P_1 \cdot v_1 = 3219,64 - 10^7 \cdot 0,023 \cdot 10^{-3} = 2989,64 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

За умовою задачі в точці 2 заданий один параметр — абсолютний тиск: $P_2 = 3 \text{ бар} = 0,3 \text{ МПа}$. Так як процес ізоентропний, питома ентропія стала: $s_2 = s_1 = 6,28 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$. Ці дані дозволяють знайти всі інші. Для визначення стану за тиском $P_2 < P_{кр}$ по діаграмі $h - s$ знаходимо:

- питому ентропію насиченої рідини:

$$s' = s_{pf} \approx C_{pf} \cdot \ln \frac{t_n(p_2) + 273}{T_0} = 4,19 \cdot \ln \frac{135 + 273}{273} = 1,6835 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $t_1 = t_n(P_2) = 135 \text{ }^\circ\text{C}$;

- питому ентропію сухої насиченої пари $s'' = 7 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$,

оскільки при даному $P_2 < P_{кр}$ $s' < s_2 < s''$, то стан реального газу в цій точці – волога насичена пара.

В області волого насиченого пара на перетині ізобари P_2 та ізоентропи s_2 знаходимо точку та її параметри:

- питомий об'єм $v_2 = 0,52 \text{ м}^3 / \text{кг}$;
- питома ентальпія $h_2 = 2453,44 \text{ кДж} / \text{кг}$;
- питома ентропія $s_2 = s_1 = 6,28 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P_2 \cdot v_2 = 2453,44 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 2297,44 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

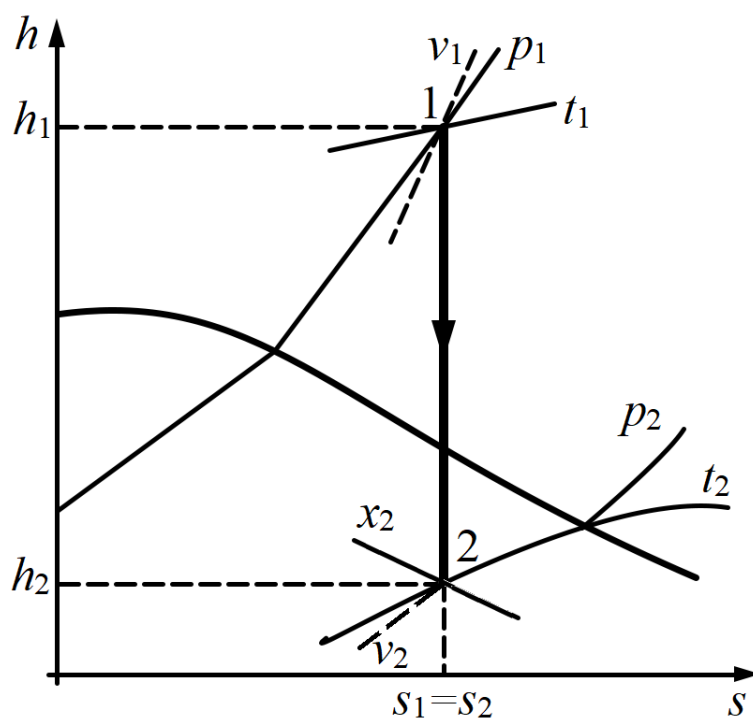


Рисунок 2.14. $h-s$ діаграма ізоентропного процесу для реального газу

2.3. Діаграма $P-v$ (зображення процесу)

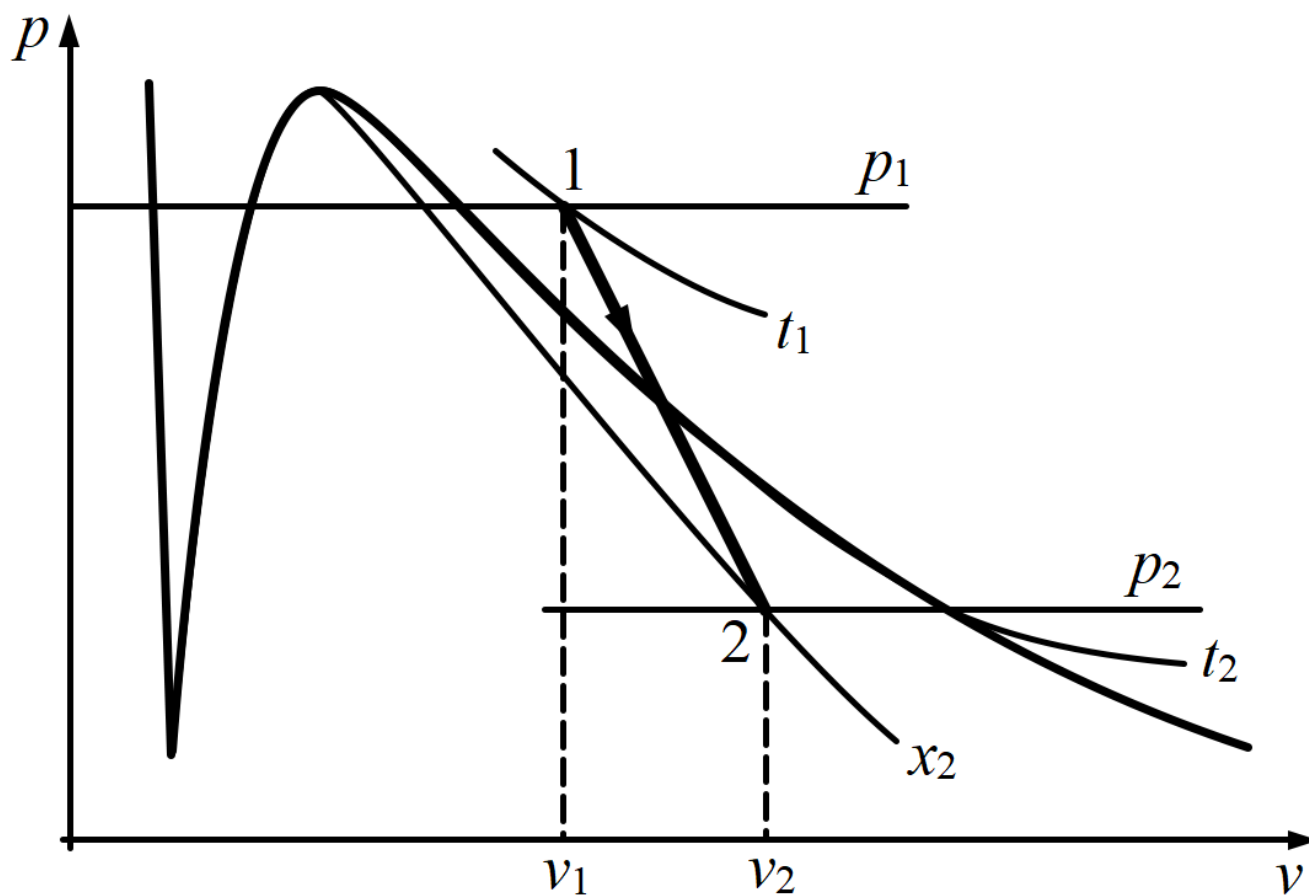


Рисунок 2.15. $P-v$ діаграма ізоентропного процесу для реального газу

2.4 Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і діаграмами

Таблиця 2.3. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і ентродійними діаграмами водяної пари для ізобарного процесу

Назва величини, позначення	Таблиці		$t - s$ діаграма		$h - s$ діаграма	
	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2
Абсолютний тиск P , МПа	10	0,3	10	0,3	10	0,3
Питомий об'єм v , м ³ /кг	0,029	0,537	0,028	0,5	0,023	0,52
Температура t , °C	440	133,54	440	135	440	135
Питома ентальпія h , кДж/кг	3214,8	2477,71	3234,7	2396,93	3219,64	2453,44
Питома ентродія s , кДж/(кг·К)	6,3837	6,3837	5,99	5,99	6,28	6,28
Питома внутрішня енергія u , кДж/кг	2923,8	2316,7	2955,14	2246,93	2989,64	2297,44

4.4. Ізохорний процес

$V_1=2$ м³ водяної пари (ІГ, $c = const$) при тискові $P_1=30$ бар і питомий об'єм $v_1 = 0,06$ м³/кг здійснює ізохорний процес до тиску $P_2=60$ бар. Визначити всі початкові і кінцеві параметри робочого тіла, роботу і кількість теплоти в процесі. Як зміняться результати розрахунку, якщо при тих же вихідних даних цей процес здійснюється з ідеальним газом H_2O при теплоємностях, що залежать від температури?

Задано:

$$V_1=2 \text{ м}^3$$

$$P_1=30 \text{ бар}=30 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$v_1 = 0,06 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Частина №1

1. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – ідеальний газ.

$P_2=60 \text{ бар}=60 \cdot 10^5 \text{ Па}$	1.1. Визначення параметрів у початковому стані.
$V = \text{const}$	1.1.1. Термічні параметри (P_1, T_1, v_1)
Визначено: $h_1, h_2, s_1, s_2, u_1, u_2,$ $\Delta u, \Delta h, \Delta s,$ $t_1, t_2, p_2, v_2, l, l_n, q - ?$	За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P = 30 \text{ бар} = 30 \cdot 10^5 \text{ Па}$) і питомий об'єм ($v = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Третій термічний параметр – термодинамічна температура – обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу:

$$P_1 v_1 = R T_1,$$

$$T_1 = \frac{P_1 v_1}{R} = \frac{30 \cdot 10^5 \cdot 0,06}{461,9} = 390 \text{ К (117 } ^\circ\text{C)}.$$

У цьому рівнянні питома газова стала обчислюється за формулою:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,4619 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

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

$\mu = 18 \text{ кг} / \text{кмоль}$ – молярна маса водяної пари.

Маса водяної пари, що бере участь у процесі:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0,06} = 33,3 \text{ кг}.$$

1.1.2. Калоричні параметри (u_1, h_1, s_1).

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією).

1) З таблиць молярних теплоємностей, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії, для водяної пари (H_2O), як трьохатомного ідеального газу, знаходимо:

а) молярна ізобарна теплоємність

$$c_{\mu p} = \frac{9}{2} R_\mu = \frac{9 \cdot 8314}{2} = 37413 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 37,413 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

б) молярна ізохорна теплоємність

$$c_{\mu\nu} = \frac{7}{2} R_{\mu} = \frac{7 \cdot 8314}{2} = 29099 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 29,099 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

2) Питомі теплоємності обчислюємо за формулами перерахунку:

а) питома ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} = \frac{37,413}{18} = 2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

б) питома ізохорна теплоємність

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,099}{18} = 1,62 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

3) Питома ентальпія

$$h_1 = c_p \cdot t_1 = 2,08 \cdot 117 = 243,36 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$h_1 = c_p \cdot T_1 = 2,08 \cdot 390 = 811,2 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

4) Питома внутрішня енергія

$$u_1 = c_v \cdot t_1 = 1,62 \cdot 117 = 189,54 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$u_1 = c_v \cdot T_1 = 1,62 \cdot 390 = 631,8 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

5) Питома ентропія

$$s_1 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 2,08 \cdot \ln \frac{390}{273} - 0,4619 \ln \frac{30 \cdot 10^5}{10^5} = -0,829 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) < 0,$$

початок відліку $T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок с = с(T) (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, при $t_1 = 117^\circ\text{C}$ знаходимо:

Питома ентальпія $h_1 = 722,24 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома внутрішня енергія $u_1 = 542,18 \text{ кДж}/\text{кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_1 = s^0(T_1) - R \ln \frac{P_1}{P_0} = 10,9798 - 0,4619 \ln \frac{30 \cdot 10^5}{10^5} = 9,409 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $s^0(T_1) = 10,9798 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_1 = 117^\circ\text{C}$, знаходимо:

Середня питома ізобарна теплоємність

$$c_{pm}^{t_1} = 1,876 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

Середня питома ізохорна теплоємність

$$c_{vm}^{t_1} = 1,415 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питома ентальпія

$$h_1 = c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,876 \cdot 117 = 219,49 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

Питома внутрішня енергія

$$u_1 = c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,415 \cdot 117 = 165,55 \text{ кДж}/\text{кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані.

1.2.1. Термічні параметри (P_2, T_2, v_2)

Випадок $c = \text{const}$ (по молекулярно-кінетичній теорії): за умовою задачі в точці 2 задано один параметр: абсолютний тиск ($P_2 = 60 \text{ бар} = 60 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

Другий параметр питомих об'єм

$$v_2 = v_1 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Третій термічний параметр - термодинамічну температуру - обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot v_2}{R} = \frac{60 \cdot 10^5 \cdot 0,06}{461,9} = 780 \text{ К } (t_2 = 507^\circ\text{C}).$$

1.2.2. Визначення калоричних параметрів (u_2, h_2, s_2)

Випадок $c = \text{const}$ (за молекулярно-кінетичною теорією).

З пункту 1.1.2 відомо, що $c_p = 2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $c_v = 1,62 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

1) Питома ентальпія

$$h_2 = c_p \cdot t_2 = 2,08 \cdot 507 = 1054,56 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$h_2 = c_p \cdot T_2 = 2,08 \cdot 780 = 1622,4 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

2) Питома внутрішня енергія

$$u_2 = c_v \cdot t_2 = 1,62 \cdot 507 = 821,34 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$u_2 = c_v \cdot T_2 = 1,62 \cdot 780 = 1263,6 \text{ кДж/кг, початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

3) Питома ентропія

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 2,0785 \cdot \ln \frac{780}{273} - 0,4619 \cdot \ln \frac{60 \cdot 10^5}{10^5} = 0,289 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)} > 0,$$

початок відліку $T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Випадок $s = s(T)$ (за квантово-статистичною теорією).

1) За допомогою таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = 507^\circ\text{C}$, знаходимо:

Питома ентальпія $h_2 = 1506,29 \text{ кДж/кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома внутрішня енергія $u_2 = 1146,25 \text{ кДж/кг}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$;

Питома ентропія розраховується за формулою

$$s_2 = s^0(T_2) - R \ln \frac{P_2}{P_0} = 12,3633 - 0,4619 \ln \frac{60 \cdot 10^5}{10^5} = 10,472 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)},$$

де $s^0(T_2) = 12,3633 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$, початок відліку $T_0 = 0\text{K}$, $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

2) За допомогою таблиць середніх теплоємностей (див. додаток ДА.9) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу при $t_2 = 507^\circ\text{C}$, знаходимо:

$$\text{Середня питома ізобарна теплоємність } c_{pm}^{t_2} = 1,98 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

$$\text{Середня питома ізохорна теплоємність } c_{vm}^{t_2} = 1,518 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Питома ентальпія

$$h_2 = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 = 1,98 \cdot 507 = 1003,86 \text{ кДж/кг, початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C}.$$

Питома внутрішня енергія

$$u_2 = c_{vm} \cdot t_2 = 1,518 \cdot 507 = 769,63 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C}.$$

5) Питома ентропія за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

1.3. Зміна калоричних параметрів у процесі

1.3.1. Обчислення зміни калоричних параметрів за наближеними формулами (випадок $c = \text{const}$)

Зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = c_p \cdot (t_2 - t_1) = 2,08 \cdot (507 - 117) = 811,2 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 2,08 \cdot (780 - 390) = 811,2 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1054,56 - 243,36 = 811,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1622,4 - 811,2 = 811,2 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = 1,62 \cdot (507 - 117) = 631,8 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,62 \cdot (780 - 390) = 631,8 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K};$$

Перевірка:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 821,34 - 189,54 = 631,8 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } t_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 1263,6 - 631,8 = 631,8 \text{ кДж/кг}, \text{ початок відліку } T_0 = 0\text{K}.$$

З пунктів 1 і 2 ми бачимо, що зміна параметрів не залежить від початку відліку і шкали, за якою ми вимірюємо температуру (Цельсія чи Кельвіна).

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 2,08 \cdot \ln \frac{780}{390} - 0,4619 \ln \frac{60 \cdot 10^5}{30 \cdot 10^5} = 1,12 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)} > 0,$$

$$\text{Перевірка: } \Delta s = s_2 - s_1 = 0,289 - (-0,829) = 1,12.$$

Зміни калоричних параметрів ($\Delta U, \Delta H, \Delta S$) в повних величинах.

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 811,2 \cdot 33,3 = 27012,96 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 631,8 \cdot 33,3 = 21038,94 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,12 \cdot 33,3 = 37,3 \text{ кДж / К}.$$

1.3.2. Обчислення зміни калоричних параметрів за уточненими формулами (випадок $c = c(T)$).

1) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць (див. додаток ДА.5) для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1506,29 - 722,24 = 784,05 \text{ кДж/кг};$$

Зміну питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 1146,25 - 542,18 = 604,07 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка: З рівняння зв'язку

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(pv), \text{ де } \Delta(pv) = \left\{ \text{згідно рівнянню стану ІІ} \right\} = R\Delta T$$

$$\Delta h = 604,07 + 0,4619(780 - 390) = 784,2 \text{ кДж/кг}.$$

Зміна питомої ентропії

$$\Delta s = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \frac{P_2}{P_1} = 12,3633 - 10,9798 - 0,4619 \ln \frac{60 \cdot 10^5}{30 \cdot 10^5} = 1,063 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Зміни калоричних параметрів ($\Delta U, \Delta H, \Delta S$) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 784,05 \cdot 33,3 = 26108,9 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 604,07 \cdot 33,3 = 20115,5 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,063 \cdot 33,3 = 35,4 \text{ кДж/К}.$$

2) Користуючись значеннями, отриманими з таблиць середніх теплоємностей для водяної пари (H_2O) як ідеального газу, знаходимо:

Зміну питомої ентальпії

$$\Delta h = c_{pm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,98 \cdot 507 - 1,876 \cdot 117 = 784,37 \text{ кДж/кг},$$

Зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_{vm}^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}^{t_1} \cdot t_1 = 1,518 \cdot 507 - 1,415 \cdot 117 = 604,07 \text{ кДж/кг}.$$

Питома ентропія (а отже і її зміна) за допомогою середніх теплоємностей точно не обчислюється.

Зміни калоричних параметрів ($\Delta U, \Delta H, \Delta S$) в повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 784,37 \cdot 33,3 = 26119,52 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 604,07 \cdot 33,3 = 20115,53 \text{ кДж}.$$

1.4. Визначення характеристик процесу (q, Q, l, l_n, L, L_n).

Кількість теплоти знайдемо за першим законом термодинаміки через деформаційну роботу:

1) При $c = \text{const}$.

$$q = \Delta u = 631,8 \text{ кДж/кг},$$

$$Q = q \cdot m = 631,8 \cdot 33,3 = 21038,94 \text{ кДж}.$$

Користуючись значеннями, отриманими за допомогою таблиць додаток ДА.5 для водяної пари (H_2O) як ідеального газу

$$q = \Delta u = 604,07 \text{ кДж/кг},$$

$$Q = q \cdot m = 604,07 \cdot 33,3 = 20115,53 \text{ кДж}.$$

Користуючись значеннями, отриманими з таблиць середніх теплоємностей для водяної пари (H_2O) як ідеального газу:

$$q = \Delta u = 604,07 \text{ кДж/кг},$$

$$Q = q \cdot m = 604,07 \cdot 33,3 = 20115,53 \text{ кДж}$$

Питома деформаційна робота до ізохорного процесу дорівнює нулю, з

формули:

$$l = \int_1^2 P dv, \text{ де } dv = 0.$$

Питома робота переміщення для ізохорного процесу знаходиться за формулою:

$$l_n = - \int_1^2 v dP = -v(P_2 - P_1) = v(P_1 - P_2) = 0,06 \cdot (30 \cdot 10^5 - 60 \cdot 10^5) = -180 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} = -180 \text{ кДж/кг}.$$

У повних величинах

$$L_n = l_n \cdot m = -180 \cdot 33,3 = -5994 \text{ кДж}.$$

1.5. Зображення процесу в $P-v$ і $T-s$ діаграмах

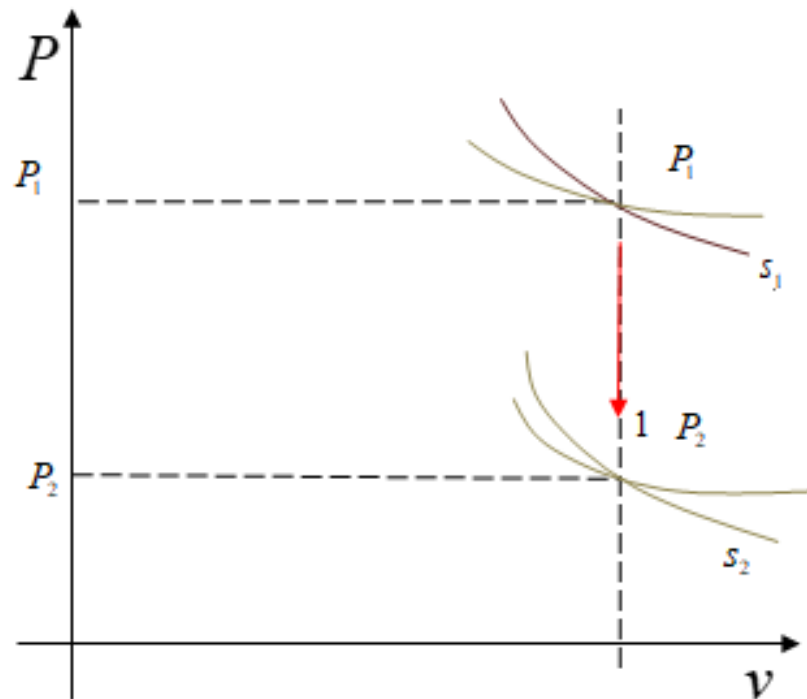


Рисунок 2.16. $P-v$ діаграма ізохорного процесу для ідеального газу

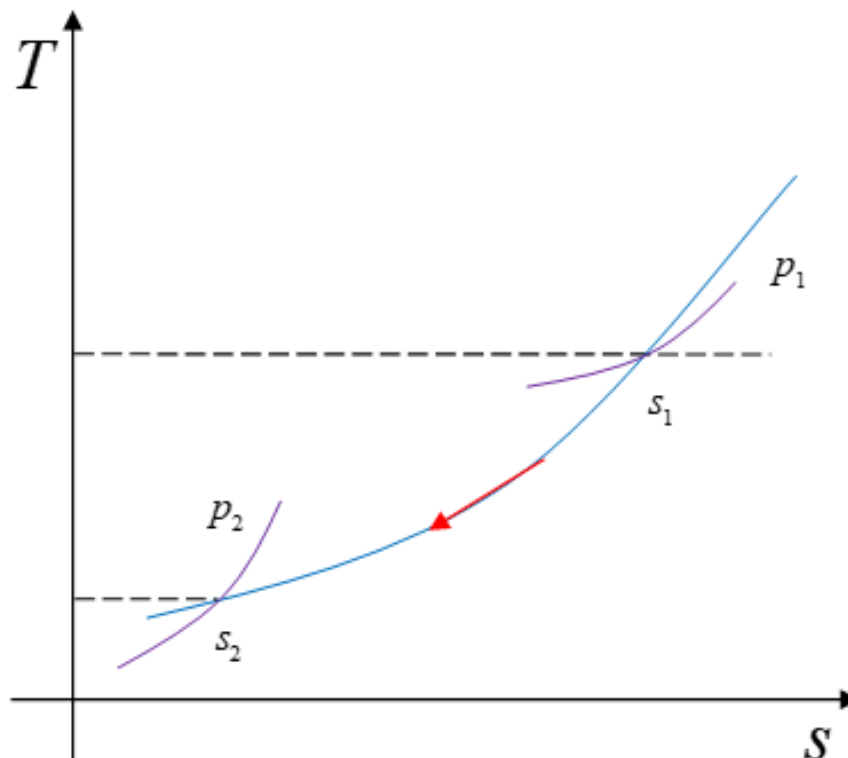


Рисунок 2.17. $T-s$ діаграма ізохорного процесу для ідеального газу

Частина №2

2. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – реальний газ

2.1 Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за допомогою таблиць водяної пари

2.1.1 Визначення параметрів у початковому стані (в т. 1).

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P_1 = 30 \text{ бар} = 3 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Ці дані дозволяють знайти всі інші.

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в таблиці № 2 знаходимо :

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0012163 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,06662 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v < v''$, то даний стан реального газу – волога насичена пара, відповідно $v = v_x = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Параметри ВНП знаходимо за допомогою таблиці № 2 і формул змішування.

Ступінь сухості x даної ВНП:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,06 - 0,0012163}{0,06662 - 0,0012163} = 0,899 \text{ кг}_{\text{СНП}} / \text{кг}_{\text{ВНП}}.$$

Питому ентальпію і питому ентропію обчислюємо за формулами змішування; значення необхідних параметрів h' , h'' , s' , s'' знаходимо за тиском $P < P_{кр}$ у таблиці №2:

– питома ентальпія

$$h_1 = h_x = h'(1 - x) + h'' \cdot x = 1008,4 \cdot (1 - 0,899) + 2801,9 \cdot 0,899 = 2620,76 \text{ кДж} / \text{кг}$$

– питома ентропія

$$s_1 = s_x = s'(1 - x) + s'' \cdot x = 2,6455 \cdot (1 - 0,899) + 6,1882 \cdot 0,899 = 5,8304 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Питому внутрішню енергію розраховують за формулою:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 2620,76 - 3 \cdot 10^3 \cdot 0,06 = 2440,76 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Температура ВНП в точці 1 рівна температурі насичення $t_1 = t_s(P) = 233,34 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1.2 Визначення параметрів у кінцевому стані (в т. 2).

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P_2 = 60 \text{ бар} = 6 \text{ МПа}$) і питомий об'єм ($v_1 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$). Ці данні дозволяють знайти всі інші.

Оскільки $m = \text{const}$ то:

$$m = \frac{V_1}{v_1}.$$

Отже, маса водяної пари, що бере участь у процесі

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0,06} = 33,3, \text{ кг}.$$

З метою визначення стану реального газу за тиском $P < P_{кр}$ в таблиці №2 знаходимо :

– питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0013187 \text{ м}^3 / \text{кг}$;

– питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,03241 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу –перегріта пара, відповідно $v = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$. По таблиці № 3

– температура $t_2 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$;

– питома ентальпія $h_2 = 3516,50 \text{ кДж} / \text{кг}$;

– питома ентропія $s_2 = 7,0003 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P v_2 = 3516,50 - 6 \cdot 10^3 \cdot 0,06 = 3156,5 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

2.1.3 Зміна калоричних параметрів в процесі

– зміна питомої ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 3516,5 - 2620,76 = 895,74 \text{ кДж} / \text{кг} ;$$

– зміна питомої ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7,0003 - 5,8304 = 1,1699 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K}) ;$$

– зміна питомої внутрішньої енергії

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 3156,5 - 2440,76 = 715,74 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

В повних величинах:

$$\Delta H = \Delta h \cdot m = 895,74 \cdot 33,3 = 29828,142 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot m = 715,74 \cdot 33,3 = 23834,142 \text{ кДж};$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot m = 1,1699 \cdot 33,3 = 38,9577 \text{ кДж/К}.$$

2.1.4 Характеристики процесу l, L, l_n, L_n, q, Q

Згідно 1-му закону ТТД в ізохорних процесах робота не виконується, маємо:
 $l = 0$. В повних величинах: $L = l \cdot m = 0$.

З рівняння енергобалансу в питомих величинах: $q = \Delta u + l$, у випадку $l = 0$ маємо: $q = \Delta u$.

Кількість теплоти знаходимо з формули:

$$q = \Delta u = 715,74 \text{ кДж / кг}$$

У повних величинах:

$$Q = q \cdot m = 715,74 \cdot 33,3 = 23,83 \text{ МДж}.$$

2.2. Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за ентродійними діаграмами (T-s і h-s)

2.2.1 Діаграма $t - s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск $P = 30$ бар і питомий об'єм $v_1 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші.

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари:

– температура вологої насиченої пари $t_1 = t_s(P_1) = 233 \text{ }^\circ\text{C}$;

– питома ентальпія

$$h_1 = 625 \text{ ккал / кг} = 625 \cdot 4,19 = 2618,8 \text{ кДж / кг}$$

– питома ентропія

$$s_1 = 1,39 \text{ ккал / (кг} \cdot \text{К)} = 1,39 \cdot 4,19 = 5,82 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}.$$

Питома внутрішня енергія:

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v = 2620,76 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6 \cdot 0,06 = 2440,76 \text{ кДж / кг}.$$

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P_2 = 60 \text{ бар} = 6 \cdot 10^6 \text{ Па}$) і питомий об'єм ($v = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$).

Так як $P < P_{кр}$ $v' < v'' < v$, то даний стан реального газу – перегріта пара. Інші параметри визначаємо за діаграмою $t-s$:

– температура перегрітої пари $t_2 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$;

– питома ентальпія:

$$h_2 = 839 \text{ ккал / кг} = 839 \cdot 4,19 = 3515,4 \text{ кДж / кг};$$

– питома ентропія:

$$s_2 = 1,67 \text{ ккал / (кг} \cdot \text{K)} = 1,67 \cdot 4,19 = 7 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}.$$

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P_2 \cdot v = 3516,50 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^6 \cdot 0,06 = 3156,50 \text{ кДж / кг}.$$

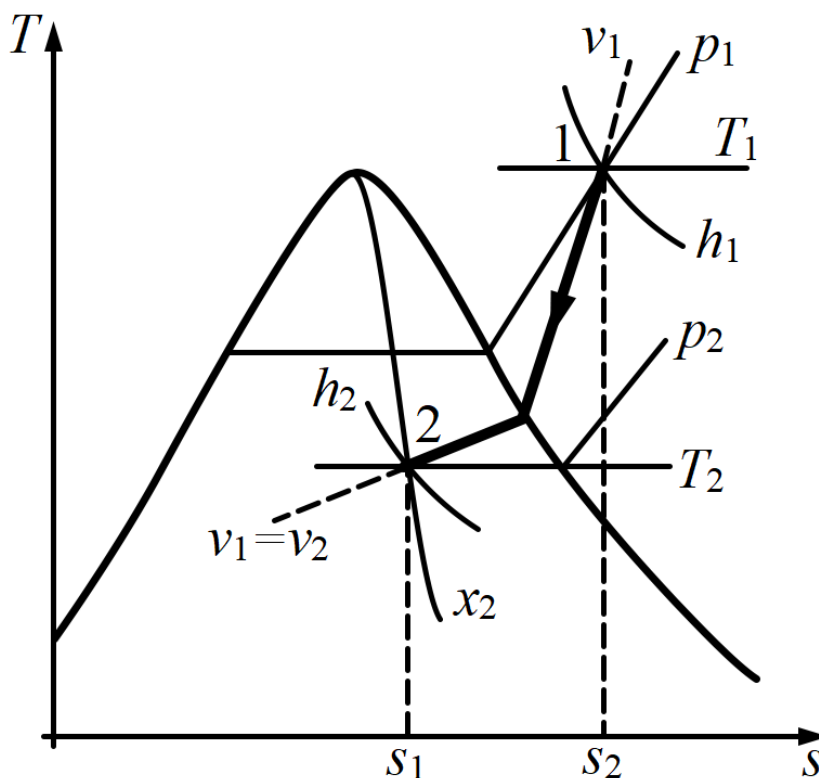


Рисунок 2.18. $T-s$ діаграма ізохорного процесу для реального газу

2.2.2 Діаграма $h-s$

За умовою задачі в точці 1 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск $P = 30 \text{ бар}$ і питомий об'єм $v_1 = 0,06 \text{ м}^3 / \text{кг}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші.

Точка перетину ізобари й ізохори знаходиться в області вологої насиченої пари:

- температура ВНП $t_1 = t_s(P_1) = 233\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- питома ентальпія $h_1 = 2620,76\text{ кДж / кг}$;
- питома ентропія $s_1 = 5,83\text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v = 2620,76 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6 \cdot 0,06 = 2440,76\text{ кДж / кг}.$$

За умовою задачі в точці 2 задані два незалежних термічних параметри: абсолютний тиск ($P_2 = 60\text{ бар} = 6 \cdot 10^6\text{ Па}$) і питомий об'єм ($v = 0,06\text{ м}^3 / \text{кг}$). Ці дані дозволяють знайти всі інші:

- температура перегрітої пари: $t_2 = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- питома ентальпія $h_2 = 3516,50\text{ кДж / кг}$;
- питома ентропія $s_2 = 7,00\text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою:

$$u_2 = h_2 - P_2 \cdot v = 3516,50 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^6 \cdot 0,06 = 3156,50\text{ кДж / кг}.$$

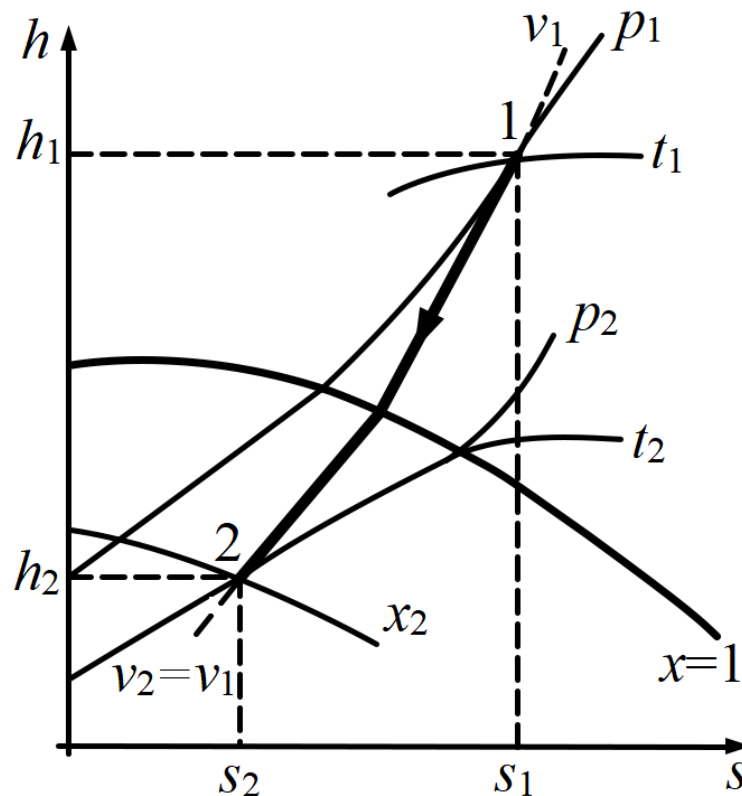


Рисунок 2.19. $h-s$ діаграма ізохорного процесу для реального газу

2.3. Діаграма $P - v$ (зображення процесу)

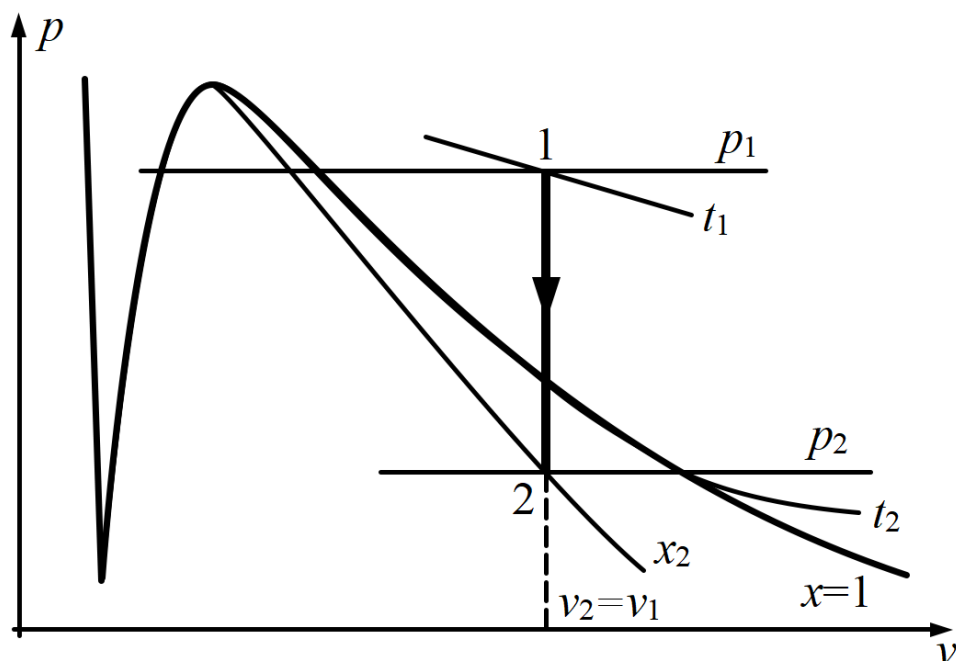


Рисунок 2.20. $P - v$ діаграма ізохорного процесу для реального газу

2.4. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і діаграмами

Таблиця 2.4. Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і ентальпійними діаграмами водяної пари для ізобарного процесу

Назва величини, позначення	Таблиці		$t - s$ діаграма		$h - s$ діаграма	
	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2
Абсолютний тиск P , МПа	3	6	3	6	3	6
Питомий об'єм v , м ³ / кг	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Температура t , °C	233,34	540	233	540	233	540
Питома ентальпія h , кДж / кг	2620,76	3516,50	2618,8	3515,4	2620,76	3516,50
Питома ентропія s , кДж / (кг · К)	5,8304	7,0003	5,82	7,00	5,83	7,00
Питома внутрішня енергія u , кДж / кг	2440,76	3156,5	2440,76	3156,50	2440,76	3156,50

3. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Розрахунково-графічну роботу оформлюють на аркушах формату А4 (210х297 мм) на одному боці аркушу білого паперу шрифтом Times New Roman 14 пунктів, міжрядковий інтервал 1,5 Lines. Текст розрахункової роботи слід друкувати, дотримуючись таких розмірів берегів: верхній, лівий і нижній — не менше 20 мм, правий — не менше 10 мм.

Першим аркушем розрахункової роботи є титульний аркуш (Додаток Б), другим – зміст (Додаток В), третім – завдання на розрахункову роботу, а далі розділи і підрозділи, що наведені в змісті, а останнім аркушем – список використаної літератури.

Номери сторінок проставляють внизу аркуша по центру без крапки в кінці. Титульний аркуш включають в загальну нумерацію сторінок, але номер сторінки на цьому аркуші не проставляють, тобто перша цифра номеру сторінки (2) буде проставлена на змісті.

Текст розрахункової роботи поділяють на розділи, підрозділи, пункти та підпункти [4].

Розділи бажано і підрозділи повинні мати заголовки. Пункти, як правило, заголовків не мають.

Заголовки розділів слід розташовувати посередині рядка і друкувати великими жирними літерами без крапки в кінці та без підкреслення.

Заголовки підрозділів слід починати з абзацного відступу і друкувати маленькими літерами, крім першої великої, не підкреслюючи, без крапки в кінці.

Пункти та підпункти також починають з абзацного відступу.

Формули розташовують безпосередньо після тексту, в якому вони згадуються, посередині сторінки. Вище і нижче кожної формули або рівняння повинно бути залишено не менше одного вільного рядка.

В формулах слід застосовувати позначення та символи, що встановлені відповідними стандартами. Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів, що входять до формули, слід наводити безпосередньо під ними у тій послідовності,

в якій вони наведені у формулі. Пояснення значення кожного символу та числового коефіцієнта слід давати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають з абзацу словом «де» без двокрапки.

Слід мати на увазі, що в формулах і поясненнях до них літери латинського алфавіту позначаються курсивом, грецькі символи і літери кирилиці та безрозмірні критерії і числа – прямі.

Рисунки (графіки) в розрахунково-графічній роботі слід розміщувати безпосередньо після тексту, де вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. На всі ілюстрації мають бути посилання у тексті.

Ілюстрації нумерують арабськими цифрами порядковою нумерацією в межах розділу. Номер ілюстрації складається з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, відокремлених крапкою.

Діаграми необхідно малювати наближено до їх дійсного вигляду (дотримуватись кутів нахилу пограничних кривих, ізопараметричних ліній тощо).

Таблиці розташовують безпосередньо після тексту, у якому вони згадуються вперше, або на наступній сторінці. На всі таблиці мають бути посилання в тексті розрахункової роботи. Таблиці нумеруються арабськими цифрами в межах розділу, при цьому її номер складається з номера розділу та порядкового номеру таблиці, які розділяються крапками.

Титульний аркуш. Першою сторінкою розрахунково-графічної роботи є титульний аркуш, який враховується в загальній кількості аркушів, але на титульному аркуші номер сторінки не ставлять. Приклад оформлення титульного аркушу наведений в Додатку Б.

Завдання. Заповнюється згідно з другим розділом даних методичних вказівок та отриманим варіантом індивідуального завдання.

Зміст. Зміст є третьою сторінкою пояснювальної записки РГР після титульного аркушу та завдання. Він містить найменування та номери початкових сторінок усіх розділів, підрозділів основної частини, а також висновків та списку використаної літератури. Слово “Зміст” пишеться у вигляді заголовку з прописної букви (по центру, симетрично до тексту). Назви, які додані до змісту, записують

строчними літерами, починаючи з прописної літери. Порядковий номер змісту не присвоюють. Сам зміст включають в загальну кількість аркушів документу.

Основна частина. Основна частина РГР складається з розділів, підрозділів, пунктів та підпунктів. Заголовки підрозділів та пунктів друкують маленькими літерами (крім першої) з абзацу. Крапку в кінці заголовка не ставиться.

Розділи основної частини РГР можуть містити пояснення, розрахунки, таблиці та ілюстрації.

Пояснення. Всі виконані в РГР розрахунки необхідно супроводжувати короткими поясненнями.

Розрахунки. При веденні розрахунків, необхідно навести повну назву величини, яка розраховується, формулу, підставити числові значення відповідно до формули, записати результат розрахунку та одиниці виміру величини. Якщо в формулі присутні символи та числові коефіцієнти, які не були пояснені в тексті раніше, то необхідно їх пояснити під формулою в тій послідовності, в якій вони в ній стоять.

Приклад:

Питома газова стала обчислюється за формулою:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{18} = 461,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) = 0,4619 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

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

$\mu = 18 \text{ кг/кмоль}$ – молярна маса водяної пари.

Висновки. На основі виконаних розрахунків в двох частинах роботи робиться висновок про особливості отриманих результатів, їх точність, про можливість застосування теорії ідеального газу для розрахунку процесу з водяною парою та ін.

Список використаних джерел. Наводиться список використаної при виконанні роботи літератури. Література розташовується по порядку зустрічі джерел в тексті.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трокоз Я. Є. Текст лекцій з дисципліни «Технічна термодинаміка» для напряму бакалаврської підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» Технічна термодинаміка-1. Термодинаміка нерухомих систем [Електронне видання] / Я. Є. Трокоз, П. П. Куделя ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові данні (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 161 с. – Назва з екрана.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/12359>

2. Мінаковський В. М. Технічна термодинаміка: приклади, задачі та типові розрахунки. Частина перша [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», кваліфікація 3113 Енергетик, освітній ступінь – бакалавр / В. М. Мінаковський, А. С. Соломаха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського ; за заг. ред. В. М. Мінаковського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,56 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 173 с. – Назва з екрана.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21545>

3. Moran M.J., Shapiro H.N. Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version / Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. — 8th ed.

4. Cengel Y.A. Boles M.A. Thermodynamics (An Engineering Approach). — 4th.ed. — New York: Mc Graw-Hill, 2002, — 930p.

5. <http://pyromat.org/live/>

6. Moran M.J., Shapiro H.N. Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version / Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. — 8th ed.

7. Костенко Г.М. Технічна термодинаміка. — К.: Держтехвидав, 1958. — 419с.

8. Cengel Y.A. Boles M.A. Thermodynamics (An Engineering Approach). — 4th.ed. — New York: Mc Graw-Hill, 2002, — 930p.

9. John W.Daily. Statistical thermodynamics. An engineering approach. University of Colorado Boulder, Published 2018

10. John R.Howell. Fundamentals of engineering thermodynamics, 2nd ed., 1992

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Трокоз Я. Є. Текст лекцій з дисципліни «Технічна термодинаміка» для напряму бакалаврської підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» Технічна термодинаміка-1. Термодинаміка нерухомих систем [Електронне видання] / Я. Є. Трокоз, П. П. Куделя ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 161 с. – Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/12359>
2. Куделя П.П. Технічна термодинаміка. Ідеальний газ і газові процеси [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спец. 144 Теплоенергетика / П. П. Куделя, А.С. Соломаха, Н. О. Притула ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 140 с.
3. Мінаковський В. М. Технічна термодинаміка: приклади, задачі та типові розрахунки. Частина перша [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», кваліфікація 3113 Енергетик, освітній ступінь – бакалавр / В. М. Мінаковський, А. С. Соломаха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського ; за заг. ред. В. М. Мінаковського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,56 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 173 с. – Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21545>
4. ДСТУ 3008-95. Документація, Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.
5. John R.Howell. Fundamentals of engineering thermodynamics, 2nd ed., 1992
6. Moran M.J., Shapiro H.N. Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version / Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. — 8th ed.

ДОДАТОК А. ДОВІДКОВІ ТАБЛИЦІ ТА ДІАГРАМИ

Таблиця ДА.1. Властивості повітря як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	k
-200	52.32	73.33	5.2906	0.0101	20488.0	1.0025	0.7152	1.4016
-150	88.09	123.46	5.8128	0.0624	5592.1	1.0025	0.7153	1.4015
-100	123.85	173.58	6.1544	0.2051	2391.5	1.0026	0.7153	1.4015
-50	159.65	223.74	6.4090	0.4979	1269.6	1.0030	0.7158	1.4013
0	195.46	273.92	6.6119	1.0095	766.52	1.0041	0.7169	1.4007
25	213.40	299.03	6.6999	1.3715	615.80	1.0051	0.7179	1.4001
50	231.36	324.18	6.7808	1.8186	503.36	1.0065	0.7193	1.3993
100	267.42	374.60	6.9259	3.0147	350.63	1.0107	0.7235	1.3970
150	303.74	425.28	7.0533	4.6998	255.05	1.0169	0.7296	1.3937
200	340.42	476.32	7.1673	6.9913	191.71	1.0249	0.7376	1.3894
250	377.54	527.80	7.2707	10.024	147.85	1.0345	0.7472	1.3844
300	415.17	579.79	7.3656	13.952	116.37	1.0452	0.7580	1.3789
350	453.36	632.34	7.4535	18.950	93.152	1.0568	0.7695	1.3732
400	492.13	685.48	7.5356	25.218	75.617	1.0687	0.7815	1.3675
450	531.51	739.22	7.6126	32.977	62.120	1.0808	0.7935	1.3620
500	571.49	793.56	7.6852	42.475	51.563	1.0927	0.8054	1.3566
550	612.06	848.49	7.7540	53.987	43.192	1.1042	0.8170	1.3516
600	653.19	903.98	7.8195	67.812	36.475	1.1154	0.8281	1.3468
650	694.87	960.02	7.8819	84.280	31.028	1.1260	0.8388	1.3424
700	737.07	1016.6	7.9415	103.75	26.571	1.1360	0.8488	1.3384
750	779.75	1073.6	7.9987	126.61	22.892	1.1455	0.8583	1.3346
800	822.89	1131.1	8.0536	153.28	19.883	1.1544	0.8672	1.3312
850	866.47	1189.1	8.1063	184.21	17.271	1.1628	0.8756	1.3280
900	910.45	1247.4	8.1571	219.89	15.113	1.1706	0.8834	1.3251
950	954.81	1306.1	8.2062	260.84	13.284	1.1779	0.8907	1.3225
1000	999.52	1365.2	8.2535	307.60	11.725	1.1848	0.8976	1.3200
1100	1088.6	1483.0	8.3436	420.98	9.2400	1.1973	0.9101	1.3156
1200	1181.5	1604.6	8.4281	565.19	7.3836	1.2083	0.9210	1.3118
1300	1274.1	1726.0	8.5078	746.01	5.9736	1.2180	0.9308	1.3086
1400	1367.7	1848.2	8.5831	969.91	4.8867	1.2267	0.9395	1.3057
1500	1462.0	1971.3	8.6546	1244.0	4.0377	1.2345	0.9473	1.3032
1600	1557.1	2095.1	8.7225	1576.1	3.3666	1.2416	0.9544	1.3010
1700	1652.9	2219.6	8.7872	1974.9	2.8302	1.2480	0.9608	1.2989
1800	1749.3	2344.7	8.8491	2449.8	2.3972	1.2539	0.9667	1.2971
1900	1846.2	2470.4	8.9083	3011.0	2.0446	1.2593	0.9721	1.2955
2000	1943.7	2596.6	8.9650	3669.4	1.7549	1.2644	0.9771	1.2939
2100	2041.7	2723.3	9.0196	4437.2	1.5150	1.2690	0.9818	1.2925
2200	2140.1	2850.5	9.0720	5327.2	1.3151	1.2734	0.9862	1.2913
2300	2239.0	2978.0	9.1226	6353.2	1.1473	1.2775	0.9902	1.2901
2400	2338.2	3106.0	9.1714	7530.1	1.0056	1.2813	0.9940	1.2889
2500	2437.8	3234.3	9.2185	8873.5	0.8853	1.2848	0.9976	1.2879
2600	2537.7	3363.0	9.2641	10401	0.7826	1.2882	1.0010	1.2869
2700	2638.0	3492.0	9.3082	12129	0.6944	1.2914	1.0042	1.2860
2800	2738.6	3621.3	9.3510	14078	0.6184	1.2944	1.0071	1.2852
2900	2839.5	3750.9	9.3925	16267	0.5526	1.2972	1.0100	1.2844
3000	2940.6	3880.8	9.4328	18719	0.4953	1.2999	1.0126	1.2836

Таблиця ДА.2. Властивості аргону як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг·К)	c_v , кДж/(кг·К)	k
-200	22.85	38.09	3.1444	0.3641	412.66	0.5207	0.3124	1.667
-150	38.47	64.12	3.4156	1.3402	188.75	0.5207	0.3124	1.667
-100	54.09	90.15	3.5930	3.1433	113.15	0.5207	0.3124	1.667
-50	69.71	116.19	3.7251	5.9294	77.305	0.5207	0.3124	1.667
0	85.33	142.22	3.8304	9.8325	57.063	0.5207	0.3124	1.667
25	93.14	155.24	3.8760	12.241	50.031	0.5207	0.3124	1.667
50	100.95	168.26	3.9179	14.973	44.333	0.5207	0.3124	1.667
100	116.57	194.29	3.9928	21.458	35.719	0.5207	0.3124	1.667
150	132.19	220.32	4.0583	29.391	29.573	0.5207	0.3124	1.667
200	147.81	246.36	4.1165	38.865	25.007	0.5207	0.3124	1.667
250	163.43	272.39	4.1688	49.969	21.505	0.5207	0.3124	1.667
300	179.05	298.42	4.2163	62.787	18.751	0.5207	0.3124	1.667
350	194.68	324.46	4.2598	77.400	16.538	0.5207	0.3124	1.667
400	210.30	350.49	4.3000	93.885	14.728	0.5207	0.3124	1.667
450	225.92	376.53	4.3373	112.32	13.225	0.5207	0.3124	1.667
500	241.54	402.56	4.3721	132.76	11.962	0.5207	0.3124	1.667
550	257.16	428.59	4.4048	155.20	10.888	0.5207	0.3124	1.667
600	272.78	454.63	4.4355	179.98	9.9651	0.5207	0.3124	1.667
650	288.40	480.66	4.4645	206.88	9.1657	0.5207	0.3124	1.667
700	304.02	506.69	4.4919	236.07	8.4677	0.5207	0.3124	1.667
750	319.64	532.73	4.5180	267.59	7.8540	0.5207	0.3124	1.667
800	335.26	558.76	4.5429	301.51	7.3109	0.5207	0.3124	1.667
850	350.88	584.80	4.5666	337.90	6.8277	0.5207	0.3124	1.667
900	366.50	610.83	4.5892	376.79	6.3954	0.5207	0.3124	1.667
950	382.12	636.86	4.6110	418.26	6.0069	0.5207	0.3124	1.667
1000	397.74	662.90	4.6318	462.36	5.6562	0.5207	0.3124	1.667
1100	428.98	714.96	4.6712	558.64	5.0490	0.5207	0.3124	1.667
1200	460.22	767.03	4.7078	666.04	4.5432	0.5207	0.3124	1.667
1300	491.46	819.10	4.7420	784.98	4.1165	0.5207	0.3124	1.667
1400	522.70	871.17	4.7741	915.83	3.7526	0.5207	0.3124	1.667
1500	553.94	923.23	4.8043	1059.0	3.4394	0.5207	0.3124	1.667
1600	585.18	975.30	4.8329	1214.8	3.1674	0.5207	0.3124	1.667
1700	616.42	1027.4	4.8600	1383.6	2.9294	0.5207	0.3124	1.667
1800	647.66	1079.4	4.8857	1565.7	2.7198	0.5207	0.3124	1.667
1900	678.90	1131.5	4.9102	1761.5	2.5341	0.5207	0.3124	1.667
2000	710.14	1183.6	4.9337	1971.4	2.3685	0.5207	0.3124	1.667
2100	741.38	1235.6	4.9561	2195.6	2.2202	0.5207	0.3124	1.667
2200	772.62	1287.7	4.9776	2434.4	2.0868	0.5207	0.3124	1.667
2300	803.86	1339.8	4.9982	2688.1	1.9662	0.5207	0.3124	1.667
2400	835.11	1391.8	5.0181	2957.2	1.8568	0.5207	0.3124	1.667
2500	866.35	1443.9	5.0372	3241.7	1.7572	0.5207	0.3124	1.667
2600	897.59	1496.0	5.0556	3542.2	1.6661	0.5207	0.3124	1.667
2700	928.83	1548.0	5.0734	3858.7	1.5827	0.5207	0.3124	1.667
2800	960.07	1600.1	5.0907	4191.6	1.5060	0.5207	0.3124	1.667
2900	991.31	1652.2	5.1073	4541.2	1.4353	0.5207	0.3124	1.667
3000	1022.6	1704.3	5.1235	4907.7	1.3700	0.5207	0.3124	1.667

Таблиця ДА.3. Властивості азоту як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	k
-200	54.31	76.04	5.3795	0.0074	28801	1.0395	0.7425	1.4000
-150	91.44	128.01	5.9210	0.0461	7822.2	1.0395	0.7425	1.4000
-100	128.56	179.99	6.2752	0.1521	3334.4	1.0395	0.7425	1.4000
-50	165.72	231.99	6.5392	0.3702	1765.7	1.0398	0.7428	1.3998
0	202.86	283.99	6.7494	0.7517	1064.4	1.0400	0.7430	1.3997
25	221.44	309.99	6.8405	1.0218	854.74	1.0403	0.7433	1.3996
50	240.03	336.01	6.9243	1.3550	698.56	1.0409	0.7439	1.3993
100	277.27	388.10	7.0742	2.2452	486.83	1.0430	0.7460	1.3981
150	314.66	440.34	7.2055	3.4953	354.62	1.0468	0.7498	1.3961
200	352.29	492.82	7.3227	5.1880	267.15	1.0527	0.7557	1.3930
250	390.26	545.64	7.4289	7.4179	206.58	1.0605	0.7635	1.3890
300	428.67	598.89	7.5261	10.293	163.11	1.0699	0.7729	1.3842
350	467.58	652.65	7.6160	13.935	130.99	1.0806	0.7836	1.3790
400	507.05	706.97	7.6998	18.484	106.68	1.0922	0.7952	1.3735
450	547.10	761.88	7.7785	24.094	87.916	1.1042	0.8072	1.3679
500	587.77	817.39	7.8527	30.940	73.197	1.1163	0.8193	1.3625
550	629.03	873.51	7.9231	39.213	61.489	1.1284	0.8314	1.3572
600	670.90	930.22	7.9900	49.124	52.064	1.1401	0.8431	1.3523
650	713.34	987.52	8.0538	60.906	44.398	1.1515	0.8545	1.3476
700	756.34	1045.4	8.1148	74.808	38.105	1.1623	0.8653	1.3432
750	799.86	1103.7	8.1733	91.104	32.897	1.1726	0.8756	1.3392
800	843.89	1162.6	8.2294	110.09	28.554	1.1824	0.8854	1.3355
850	888.39	1222.0	8.2835	132.08	24.909	1.1915	0.8945	1.3320
900	933.34	1281.8	8.3356	157.42	21.830	1.2002	0.9032	1.3288
950	978.70	1342.0	8.3859	186.47	19.215	1.2082	0.9112	1.3259
1000	1024.5	1402.6	8.4344	219.61	16.982	1.2158	0.9188	1.3232
1100	1117.0	1524.9	8.5269	299.87	13.413	1.2295	0.9325	1.3185
1200	1210.9	1648.4	8.6137	401.81	10.739	1.2415	0.9445	1.3145
1300	1305.9	1773.1	8.6956	529.47	8.7032	1.2520	0.9550	1.3110
1400	1401.8	1898.8	8.7730	687.32	7.1306	1.2612	0.9642	1.3080
1500	1498.7	2025.3	8.8465	880.31	5.9001	1.2693	0.9723	1.3055
1600	1596.3	2152.6	8.9163	1113.9	4.9260	1.2765	0.9795	1.3032
1700	1694.6	2280.6	8.9827	1393.9	4.1466	1.2829	0.9859	1.3013
1800	1793.4	2409.2	9.0465	1726.8	3.5168	1.2886	0.9916	1.2995
1900	1892.9	2538.3	9.1073	2119.5	3.0033	1.2937	0.9967	1.2980
2000	1992.8	2667.9	9.1656	2579.6	2.5812	1.2983	1.0013	1.2966
2100	2093.1	2797.9	9.2216	3115.0	2.2315	1.3025	1.0055	1.2954
2200	2193.8	2928.4	9.2754	3734.6	1.9398	1.3062	1.0092	1.2943
2300	2294.9	3059.2	9.3273	4447.4	1.6947	1.3097	1.0127	1.2933
2400	2396.4	3190.3	9.3773	5263.4	1.4877	1.3129	1.0159	1.2924
2500	2498.1	3321.7	9.4255	6193.0	1.3117	1.3158	1.0188	1.2915
2600	2600.1	3453.4	9.4722	7247.3	1.1613	1.3184	1.0214	1.2908
2700	2702.4	3585.4	9.5173	8438.0	1.0321	1.3209	1.0239	1.2901
2800	2804.9	3717.6	9.5611	9777.7	0.9207	1.3232	1.0262	1.2894
2900	2907.6	3850.0	9.6035	11279	0.8241	1.3254	1.0284	1.2888
3000	3010.6	3982.7	9.6446	12957	0.7400	1.3274	1.0304	1.2882

Таблиця ДА.4. Властивості кисню як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	k
-200	47.55	66.57	5.1302	0.0376	4993.6	0.9100	0.6500	1.4000
-150	80.06	112.08	5.6045	0.2330	1355.1	0.9102	0.6502	1.3999
-100	112.58	157.60	5.9147	0.7689	577.44	0.9104	0.6504	1.3998
-50	145.12	203.14	6.1457	1.8711	305.83	0.9116	0.6516	1.3991
0	177.78	248.80	6.3303	3.8077	183.96	0.9154	0.6554	1.3967
25	194.20	271.72	6.4107	5.1865	147.41	0.9187	0.6587	1.3947
50	210.72	294.74	6.4848	6.8990	120.12	0.9230	0.6630	1.3922
100	244.14	341.16	6.6183	11.534	82.963	0.9342	0.6742	1.3856
150	278.19	388.21	6.7366	18.186	59.668	0.9482	0.6882	1.3778
200	312.98	436.01	6.8434	27.425	44.241	0.9637	0.7037	1.3695
250	348.57	484.59	6.9410	39.928	33.599	0.9797	0.7197	1.3613
300	384.95	533.97	7.0311	56.485	26.021	0.9954	0.7354	1.3536
350	422.09	584.12	7.1150	78.005	20.486	1.0103	0.7503	1.3465
400	459.96	634.99	7.1935	105.53	16.358	1.0243	0.7643	1.3402
450	498.50	686.53	7.2673	140.22	13.226	1.0372	0.7772	1.3345
500	537.66	738.69	7.3371	183.39	10.811	1.0490	0.7890	1.3295
550	577.39	791.41	7.4032	236.48	8.9260	1.0597	0.7997	1.3251
600	617.62	844.65	7.4659	301.12	7.4359	1.0695	0.8095	1.3212
650	658.32	898.34	7.5257	379.04	6.2455	1.0783	0.8183	1.3177
700	699.44	952.47	7.5828	472.19	5.2850	1.0864	0.8264	1.3146
750	740.94	1007.0	7.6374	582.64	4.5031	1.0937	0.8337	1.3119
800	782.80	1061.8	7.6898	712.68	3.8614	1.1005	0.8404	1.3094
850	824.98	1117.0	7.7400	864.76	3.3306	1.1066	0.8466	1.3071
900	867.46	1172.5	7.7884	1041.5	2.8885	1.1124	0.8524	1.3050
950	910.21	1228.2	7.8349	1245.8	2.5177	1.1177	0.8577	1.3032
1000	953.22	1284.3	7.8798	1480.7	2.2049	1.1227	0.8627	1.3014
1100	1040.0	1397.0	7.9650	2055.6	1.7130	1.1319	0.8719	1.2982
1200	1127.6	1510.6	8.0449	2795.2	1.3515	1.1403	0.8803	1.2954
1300	1216.0	1625.0	8.1200	3732.7	1.0808	1.1481	0.8881	1.2928
1400	1305.2	1740.2	8.1910	4905.3	0.8747	1.1556	0.8956	1.2903
1500	1395.1	1856.1	8.2583	6355.3	0.7155	1.1629	0.9028	1.2880
1600	1485.7	1972.8	8.3223	8130.1	0.5908	1.1699	0.9099	1.2857
1700	1577.1	2090.1	8.3833	10283	0.4921	1.1769	0.9169	1.2836
1800	1669.1	2208.2	8.4417	12872	0.4130	1.1838	0.9238	1.2815
1900	1761.8	2326.9	8.4976	15963	0.3491	1.1906	0.9306	1.2794
2000	1855.2	2446.3	8.5513	19629	0.2970	1.1973	0.9373	1.2774
2100	1949.3	2566.3	8.6030	23949	0.2541	1.2039	0.9438	1.2755
2200	2044.0	2687.0	8.6528	29010	0.2186	1.2103	0.9503	1.2736
2300	2139.4	2808.4	8.7009	34910	0.1890	1.2166	0.9566	1.2718
2400	2235.3	2930.4	8.7474	41752	0.1642	1.2228	0.9628	1.2701
2500	2331.9	3052.9	8.7925	49650	0.1432	1.2288	0.9688	1.2684
2600	2429.1	3176.1	8.8361	58728	0.1255	1.2346	0.9746	1.2668
2700	2526.8	3299.9	8.8784	69121	0.1103	1.2402	0.9802	1.2653
2800	2625.1	3424.1	8.9195	80971	0.0973	1.2456	0.9856	1.2638
2900	2723.9	3549.0	8.9595	94435	0.0862	1.2508	0.9908	1.2624
3000	2823.2	3674.3	8.9984	109680	0.0765	1.2557	0.9957	1.2611

Таблиця ДА.5. Властивості водяної пари як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	k
0	377.07	503.22	10.310	0.0503	24725	1.8590	1.3972	1.3305
25	412.05	549.75	10.423	0.0643	21130	1.8644	1.4026	1.3292
50	477.22	596.46	10.470	0.0712	20660	1.8713	1.4095	1.3277
100	518.11	690.45	10.751	0.1309	12988	1.8897	1.4279	1.3234
150	590.08	785.51	11.135	0.3009	6405.3	1.9132	1.4514	1.3182
200	663.32	881.84	11.350	0.4795	4494.2	1.9401	1.4782	1.3124
250	737.94	979.55	11.547	0.7338	3247.2	1.9691	1.5073	1.3064
300	814.07	1078.8	11.728	1.0864	2403.1	1.9995	1.5377	1.3003
350	891.69	1179.5	11.896	1.5650	1813.6	2.0311	1.5693	1.2943
400	971.00	1281.9	12.054	2.2036	1391.4	2.0636	1.6018	1.2883
450	1051.9	1385.9	12.203	3.0441	1082.0	2.0969	1.6351	1.2825
500	1134.5	1491.6	12.345	4.1338	851.91	2.1308	1.6689	1.2767
550	1218.8	1599.0	12.479	5.5338	677.53	2.1654	1.7035	1.2711
600	1304.9	1708.1	12.608	7.3140	543.76	2.2006	1.7388	1.2656
650	1392.7	1819.0	12.731	9.5579	439.93	2.2361	1.7743	1.2603
700	1482.3	1931.7	12.850	12.367	358.43	2.2717	1.8099	1.2552
750	1573.7	2046.2	12.965	15.860	293.84	2.3072	1.8454	1.2503
800	1666.8	2162.5	13.076	20.161	242.46	2.3424	1.8806	1.2456
850	1761.7	2280.4	13.183	25.446	201.04	2.3772	1.9154	1.2411
900	1858.3	2400.1	13.288	31.904	167.49	2.4114	1.9496	1.2369
950	1956.7	2521.6	13.389	39.729	140.23	2.4448	1.9830	1.2329
1000	2056.7	2644.6	13.488	49.192	117.89	2.4777	2.0159	1.2291
1100	2261.4	2895.6	13.677	74.225	84.264	2.5402	2.0784	1.2222
1200	2472.2	3152.5	13.858	109.78	61.122	2.5988	2.1370	1.2161
1300	2688.6	3415.2	14.030	159.48	44.931	2.6533	2.1915	1.2107
1400	2910.3	3683.1	14.195	228.04	33.419	2.7034	2.2416	1.2060
1500	3136.8	3955.7	14.354	321.26	25.140	2.7498	2.2880	1.2018
1600	3367.8	4232.9	14.503	444.36	19.201	2.7923	2.3304	1.1982
1700	3602.8	4514.0	14.619	570.41	15.756	2.8310	2.3692	1.1949
1800	3841.5	4799.0	14.793	832.17	11.347	2.8667	2.4048	1.1920
1900	4083.7	5087.3	14.929	1116.9	8.8623	2.8996	2.4378	1.1894
2000	4329.0	5378.8	15.060	1483.8	6.9780	2.9299	2.4681	1.1871
2100	4577.2	5673.2	15.187	1952.8	5.5353	2.9577	2.4959	1.1850
2200	4828.2	5970.3	15.309	2547.2	4.4225	2.9837	2.5218	1.1831
2300	5081.6	6269.9	15.428	3294.7	3.5574	3.0080	2.5461	1.1814
2400	5337.3	6571.9	15.543	4227.8	2.8799	3.0306	2.5687	1.1798
2500	5595.3	6876.0	15.655	5384.9	2.3457	3.0519	2.5901	1.1783
2600	5855.3	7182.2	15.763	6814.4	1.9205	3.0721	2.6103	1.1769
2700	6117.3	7490.4	15.869	8560.8	1.5819	3.0911	2.6293	1.1756
2800	6383.9	7803.1	15.971	10674	1.3114	3.1095	2.6477	1.1744
2900	6651.2	8116.7	16.069	13213	1.0939	3.1271	2.6653	1.1733
3000	6918.7	8430.2	16.164	16247	0.9176	--	--	--

Таблиця ДА.6. Властивості вуглекислого газу як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг · К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	k
-200	34.56	48.39	3.8607	0.0075	18191	0.6618	0.4728	1.3999
-150	58.63	81.91	4.2065	0.0468	4911	0.6712	0.4821	1.3921
-100	73.96	106.69	4.4403	0.1612	2002.4	0.7078	0.5188	1.3644
-50	110.29	152.47	4.6262	0.4313	964.6	0.7616	0.5725	1.3302
0	140.51	192.15	4.7857	1.0033	507.6	0.8176	0.6286	1.3008
25	156.57	212.93	4.8585	1.4747	376.97	0.8443	0.6553	1.2884
50	173.27	234.36	4.9275	2.1249	283.55	0.8697	0.6807	1.2777
100	208.50	279.04	5.0560	4.1943	165.8	0.9166	0.7275	1.2599
150	245.94	325.94	5.1738	7.8275	100.79	0.9584	0.7694	1.2457
200	285.37	374.82	5.2830	13.948	63.25	0.9960	0.8070	1.2343
250	326.58	425.48	5.3847	23.903	40.80	1.0299	0.8409	1.2248
300	369.40	477.75	5.4801	39.606	26.98	1.0606	0.8716	1.2169
350	413.69	531.50	5.5700	63.737	18.23	1.0886	0.8996	1.2102
400	459.32	586.57	5.6550	99.962	12.55	1.1141	0.9251	1.2044
450	506.16	642.87	5.7357	153.20	8.8011	1.1375	0.9484	1.1993
500	554.12	700.29	5.8125	230.00	6.2676	1.1588	0.9697	1.1949
550	603.10	758.72	5.8857	338.87	4.5292	1.1782	0.9892	1.1911
600	653.02	818.08	5.9557	490.89	3.3164	1.1961	1.0071	1.1877
650	703.78	878.30	6.0228	700.12	2.4585	1.2124	1.0234	1.1847
700	755.33	939.30	6.0871	984.37	1.8433	1.2273	1.0383	1.1821
750	807.58	1001.0	6.1472	1352.6	1.4103	1.2410	1.0520	1.1797
800	860.48	1063.4	6.2153	1939.5	1.0317	1.2535	1.0645	1.1776
850	913.99	1126.3	6.2345	2147.4	0.9752	1.2650	1.0760	1.1757
900	968.07	1189.9	6.2842	2794.0	0.7829	1.2756	1.0866	1.1740
950	1022.7	1253.9	6.3821	4689.7	0.4863	1.2855	1.0964	1.1724
1000	1077.7	1318.4	6.4243	5865.1	0.4047	1.2946	1.1055	1.1710
1100	1189.1	1448.6	6.5248	9983.1	0.2565	1.3105	1.1214	1.1686
1200	1301.9	1580.4	6.6174	16299	0.1685	1.3240	1.1349	1.1666
1300	1416.0	1713.4	6.7047	25872	0.1134	1.3359	1.1469	1.1648
1400	1531.3	1847.6	6.7873	40053	0.0779	1.3462	1.1571	1.1634
1500	1647.4	1982.6	6.8657	60656	0.0545	1.3551	1.1661	1.1621
1600	1764.8	2118.9	6.9403	90050	0.0388	1.3633	1.1742	1.1610
1700	1882.5	2255.5	7.0114	131170	0.0280	1.3704	1.1813	1.1600
1800	1999.7	2391.6	7.0793	187920	0.0206	1.3767	1.1877	1.1592
1900	2122.2	2533.0	7.1443	265110	0.0153	1.3824	1.1934	1.1584
2000	2223.2	2653.0	7.2067	368730	0.0115	1.3876	1.1986	1.1577
2100	2354.0	2802.6	7.2665	506000	0.0087	1.3923	1.2033	1.1571
2200	2481.3	2948.9	7.3241	686580	0.0067	1.3965	1.2075	1.1566
2300	2600.5	3087.0	7.3795	920640	0.0052	1.4006	1.2115	1.1560
2400	2722.4	3227.7	7.4329	1221400	0.0041	1.4043	1.2152	1.1556
2500	2843.9	3368.2	7.4846	1605700	0.0032	1.4077	1.2187	1.1551
2600	2966.0	3509.1	7.5346	2092100	0.0026	1.4110	1.2219	1.1547
2700	3088.3	3650.4	7.5829	2701300	0.0021	1.4140	1.2250	1.1543
2800	3211.0	3792.0	7.6296	3458500	0.0017	1.4169	1.2279	1.1540
2900	3333.9	3933.8	7.6751	4399900	0.0013	1.4196	1.2306	1.1536
3000	3457.1	4075.9	7.7193	5561300	0.0011	1.4222	1.2331	1.1533

Таблиця ДА.7. Властивості чадного газу як ідеального газу [5]

T , °C	u , кДж/кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	π_{01}	θ_{01}	c_p , кДж/(кг·К)	c_v , кДж/(кг·К)	k
-200	54.32	76.05	5.5948	0.0153	13973	1.0396	0.7426	1.4000
-150	91.45	128.03	6.1363	0.0951	3794.9	1.0396	0.7426	1.4000
-100	128.60	180.03	6.4908	0.3138	1616.4	1.0398	0.7428	1.3999
-50	165.74	232.02	6.7546	0.7632	856.52	1.0400	0.7429	1.3998
0	202.90	284.03	6.9649	1.5500	516.25	1.0405	0.7434	1.3995
25	221.49	310.05	7.0561	2.1071	414.52	1.0411	0.7440	1.3992
50	240.10	336.09	7.1399	2.7950	338.70	1.0421	0.7450	1.3987
100	277.43	388.27	7.2901	4.6350	235.85	1.0455	0.7485	1.3968
150	314.99	440.68	7.4219	7.2258	171.55	1.0514	0.7543	1.3938
200	352.91	493.45	7.5397	10.748	128.97	1.0596	0.7626	1.3895
250	391.28	546.68	7.6467	15.409	99.460	1.0699	0.7729	1.3843
300	430.22	600.46	7.7448	21.450	78.278	1.0818	0.7847	1.3785
350	469.78	654.87	7.8359	29.146	62.634	1.0947	0.7976	1.3724
400	509.99	709.94	7.9208	38.809	50.813	1.1081	0.8111	1.3662
450	550.88	765.68	8.0007	50.792	41.709	1.1216	0.8246	1.3602
500	592.45	822.10	8.0762	65.488	34.586	1.1350	0.8380	1.3545
550	634.68	879.18	8.1477	83.333	28.937	1.1480	0.8509	1.3491
600	677.54	936.89	8.2157	104.81	24.405	1.1604	0.8634	1.3440
650	721.00	995.21	8.2807	130.44	20.732	1.1722	0.8752	1.3394
700	765.04	1054.1	8.3428	160.81	17.728	1.1834	0.8863	1.3351
750	809.62	1113.5	8.4024	196.54	15.251	1.1938	0.8968	1.3312
800	854.71	1173.5	8.4596	238.30	13.193	1.2036	0.9066	1.3276
850	900.27	1233.9	8.5146	286.83	11.471	1.2128	0.9157	1.3244
900	946.28	1294.7	8.5676	342.91	10.022	1.2213	0.9243	1.3214
950	992.69	1356.0	8.6187	407.39	8.7957	1.2293	0.9322	1.3186
1000	1039.5	1417.7	8.6681	481.15	7.7516	1.2367	0.9396	1.3161
1100	1134.1	1542.0	8.7621	660.45	6.0908	1.2500	0.9530	1.3117
1200	1230.0	1667.6	8.8504	889.22	4.8533	1.2616	0.9646	1.3079
1300	1327.0	1794.3	8.9336	1176.9	3.9159	1.2718	0.9748	1.3047
1400	1424.9	1921.9	9.0123	1534.0	3.1953	1.2807	0.9837	1.3019
1500	1523.7	2050.4	9.0869	1972.1	2.6340	1.2886	0.9916	1.2995
1600	1623.2	2179.6	9.1578	2504.1	2.1913	1.2957	0.9986	1.2974
1700	1723.4	2309.5	9.2253	3144.1	1.8385	1.3019	1.0049	1.2956
1800	1824.2	2440.0	9.2898	3907.3	1.5544	1.3076	1.0106	1.2939
1900	1925.5	2571.0	9.3515	4810.3	1.3235	1.3127	1.0157	1.2924
2000	2027.3	2702.5	9.4107	5871.3	1.1342	1.3174	1.0203	1.2911
2100	2129.6	2834.5	9.4675	7109.7	0.9778	1.3216	1.0246	1.2899
2200	2232.2	2966.8	9.5221	8546.3	0.8477	1.3255	1.0285	1.2888
2300	2335.3	3099.6	9.5748	10204	0.7388	1.3291	1.0321	1.2878
2400	2438.6	3232.6	9.6255	12106	0.6469	1.3325	1.0354	1.2869
2500	2542.3	3366.1	9.6745	14278	0.5690	1.3356	1.0386	1.2860
2600	2646.3	3499.8	9.7219	16749	0.5025	1.3385	1.0415	1.2852
2700	2750.6	3633.8	9.7677	19546	0.4456	1.3413	1.0442	1.2844
2800	2855.2	3768.0	9.8121	22700	0.3966	1.3439	1.0468	1.2837
2900	2960.0	3902.5	9.8552	26245	0.3542	1.3463	1.0493	1.2831
3000	3065.0	4037.3	9.8970	30215	0.3174	1.3487	1.0516	1.2824

Таблиця ДА.8. Середня масова теплоємність газів, кДж/(кг·К) [5]

Темпера тура газів	Окис вуглецю, CO		Кисень, O ₂		Азот, N ₂		Водень, H ₂	
t °C	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}
0	1,0336	0,7427	0,9148	0,6548	1,0392	0,7423	14,195	10,071
25	1,0356	0,7432	0,9169	0,6569	1,0395	0,7424	14,235	10,11
50	1,0376	0,7438	0,9190	0,6590	1,0398	0,7425	14,274	10,15
75	1,0396	0,7443	0,9211	0,6611	1,0401	0,7426	14,314	10,189
100	1,0417	0,7448	0,9232	0,6632	1,0404	0,7427	14,353	10,228
150	1,0440	0,7471	0,9295	0,6693	1,0419	0,7446	14,387	10,263
200	1,0463	0,7494	0,9358	0,6753	1,0434	0,7465	14,421	10,297
250	1,0500	0,7532	0,9429	0,6827	1,0461	0,7492	14,434	10,31
300	1,0538	0,7570	0,9500	0,6900	1,0488	0,7519	14,446	10,322
350	1,0586	0,7618	0,9576	0,6976	1,0528	0,7559	14,462	10,338
400	1,0634	0,7666	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599	14,477	10,353
450	1,0691	0,7721	0,9722	0,7122	1,0614	0,7645	14,493	10,369
500	1,0748	0,7775	0,9793	0,7193	1,066	0,7691	14,509	10,384
550	1,0804	0,7834	0,9860	0,7260	1,071	0,7742	14,526	10,401
600	1,0861	0,7892	0,9927	0,7327	1,076	0,7792	14,542	10,417
650	1,0919	0,7951	0,9988	0,7388	1,0815	0,7846	14,565	10,45
700	1,0978	0,8009	1,0048	0,7448	1,0869	0,79	14,587	10,483
750	1,1034	0,8066	1,0103	0,7503	1,0922	0,7953	14,614	10,5
800	1,1091	0,8122	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005	14,641	10,517
850	1,1145	0,8177	1,0208	0,7608	1,1026	0,8058	14,674	10,549
900	1,1200	0,8231	1,0258	0,7658	1,1078	0,811	14,706	10,581
950	1,1252	0,8284	1,0304	0,7704	1,1129	0,816	14,741	10,617
1000	1,1304	0,8336	1,0350	0,7750	1,1179	0,821	14,776	10,652
1100	1,1401	0,8432	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302	14,853	10,727
1200	1,1493	0,8566	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395	14,934	10,809

Таблиця ДА.9. Середня масова теплоємність газів, кДж/(кг·К) [5]

Темпера- тура	Водяна пара, H ₂ O		Сірчистий газ, SO ₂		Повітря		Вуглекислий газ, CO ₂	
t °C	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c_{pm}	c_{vm}
0	1,8594	1,398	0,607	0,477	1,0036	0,7164	0,8148	0,6259
25	1,8628	1,4014	0,6143	0,4845	1,0042	0,7171	0,8276	0,6387
50	1,8661	1,4047	0,6215	0,492	1,0049	0,7179	0,8403	0,6515
75	1,8695	1,4081	0,6288	0,4995	1,0055	0,7186	0,8531	0,6642
100	1,8728	1,4114	0,636	0,507	1,0061	0,7193	0,8658	0,677
150	1,8833	1,4219	0,649	0,5195	1,0088	0,7218	0,888	0,6992
200	1,8937	1,4323	0,662	0,532	1,0115	0,7243	0,9102	0,7214
250	1,9065	1,4449	0,6745	0,5445	1,0153	0,7281	0,9295	0,7407
300	1,9192	1,4574	0,687	0,557	1,0191	0,7319	0,9487	0,7599
350	1,9335	1,4719	0,6975	0,5675	1,0237	0,7367	0,9657	0,7769
400	1,9477	1,4863	0,708	0,578	1,0283	0,7415	0,9826	0,7938
450	1,9628	1,5012	0,716	0,5865	1,0335	0,7467	0,9977	0,8089
500	1,9778	1,516	0,724	0,595	1,0387	0,7519	1,0128	0,824
550	1,9935	1,5317	0,7305	0,601	1,0442	0,7572	1,0262	0,8374
600	2,0092	1,5474	0,737	0,607	1,0496	0,7624	1,0396	0,8508
650	2,0256	1,564	0,7455	0,6155	1,0551	0,7679	1,0518	0,8627
700	2,0419	1,5805	0,754	0,624	1,0605	0,7733	1,0639	0,8746
750	2,0587	1,5973	0,758	0,628	1,0658	0,7788	1,0746	0,8855
800	2,0754	1,614	0,762	0,632	1,071	0,7842	1,0852	0,8964
850	2,0926	1,6312	0,7685	0,6385	1,0763	0,7892	1,0949	0,9061
900	2,1097	1,6483	0,775	0,645	1,0815	0,7942	1,1045	0,9157
950	2,1267	1,6653	0,779	0,649	1,0861	0,7991	1,1135	0,9245
1000	2,1436	1,6823	0,783	0,653	1,0907	0,8039	1,1225	0,9332
1100	2,1771	1,7158	0,791	0,662	1,0999	0,8127	1,1384	0,9496
1200	2,2106	1,7488	0,795	0,666	1,1082	0,8215	1,153	0,9638

Таблиця ДА.10. Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення (за температурою) [6]

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	Питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{кг}$		Питома внутрішня енергія, $\text{кДж}/\text{кг}$		Питома ентальпія, $\text{кДж}/\text{кг}$			Питома ентропія, $\text{кДж}/(\text{кг К})$		$t, ^\circ\text{C}$
		$v' \cdot 10^3$	v''	u'	u''	h'	$h'' - h'$	h''	s'	s''	
0.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	0.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

Продовження таблиці ДА.10

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	Питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{кг}$		Питома внутрішня енергія, кДж/кг		Питома ентальпія, кДж/кг			Питома ентропія, кДж/(кг К)		$t, ^\circ\text{C}$
		$v' \cdot 10^3$	v''	u'	u''	h'	$h'' - h'$	h''	s'	s''	
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	8.0763	50
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.9913	55
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.9096	60
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	7.8310	65
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	7.7553	70
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	0.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14

Таблиця ДА.11. Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення (за тиском) [6]

P, бар	t, °C	Питомий об'єм, м³/кг		Питома внутрішня енергія, кДж/кг		Питома ентальпія, кДж/кг			Питома ентропія, кДж/(кг К)		t, °C
		$v' \cdot 10^3$	v''	u'	u''	h'	$h'' - h'$	h''	s'	s''	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0

Продовження таблиці ДА.11

80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100
110	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110
120	324.8	1.5267	0.01426	1473.0	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	5.4924	120
130	330.9	1.5671	0.01278	1511.1	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	5.4323	130
140	336.8	1.6107	0.01149	1548.6	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	5.3717	140
150	342.2	1.6581	0.01034	1585.6	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	5.3098	150
160	347.4	1.7107	0.009306	1622.7	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	5.2455	160
170	352.4	1.7702	0.008364	1660.2	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	5.1777	170
180	357.1	1.8397	0.007489	1698.9	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	5.1044	180
190	361.5	1.9243	0.006657	1739.9	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	5.0228	190
200	365.8	2.036	0.005834	1785.6	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	4.9269	200
220.9	374.1	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	220.9

Таблиця ДА.12. Термодинамічні властивості води і перегрітої пари [6]

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 0,06 \text{ бар} = 0,006 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 36,16 ^\circ\text{C})$					$p = 0,35 \text{ бар} = 0,035 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 72,69 ^\circ\text{C})$			
СНП	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 0,70 \text{ бар} = 0,07 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 89,95 ^\circ\text{C})$				
СНП	2.365	2494.5	2660.0	7.4797
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 1,0 \text{ бар} = 0,10 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 99,63 ^\circ\text{C})$			
1.694	2506.1	2675.5	7.3594
1.696	2506.7	2676.2	7.3614
1.793	2537.3	2716.6	7.4668
1.984	2597.8	2796.2	7.6597
2.172	2658.1	2875.3	7.8343
2.359	2718.5	2954.5	7.9949
2.546	2779.6	3034.2	8.1445
2.732	2841.5	3114.6	8.2849
2.917	2904.2	3195.9	8.4175
3.103	2967.9	3278.2	8.5435
3.288	3032.6	3361.4	8.6636
3.565	3131.6	3488.1	8.8342

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 1,5 \text{ бар} = 0,15 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 111,37 ^\circ\text{C})$				
СНП	1.159	2519.7	2693.6	7.2233
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 3,0 \text{ бар} = 0,30 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 133,55 ^\circ\text{C})$			
0.606	2543.6	2725.3	6.9919
0.651	2587.1	2782.3	7.1276
0.716	2650.7	2865.5	7.3115
0.781	2713.1	2947.3	7.4774
0.844	2775.4	3028.6	7.6299
0.907	2838.1	3110.1	7.7722
0.969	2901.4	3192.2	7.9061
1.032	2965.6	3275.0	8.0330
1.094	3030.6	3358.7	8.1538
1.187	3130.0	3486.0	8.3251
1.341	3300.8	3703.2	8.5892

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг К)}$
$p = 5,0 \text{ бар} = 0,50 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 151,86 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952

$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг К)}$
$p = 7,0 \text{ бар} = 0,70 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 164,97 ^\circ\text{C})$			
0.2729	2572.5	2763.5	6.7080
0.2847	2599.8	2799.1	6.7880
0.2999	2634.8	2844.8	6.8865
0.3292	2701.8	2932.2	7.0641
0.3574	2766.9	3017.1	7.2233
0.3852	2831.3	3100.9	7.3697
0.4126	2895.8	3184.7	7.5063
0.4397	2960.9	3268.7	7.6350
0.4667	3026.6	3353.3	7.7571
0.5070	3126.8	3481.7	7.9299
0.5738	3298.5	3700.2	8.1956
0.6403	3476.6	3924.8	8.4391

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг К)}$
$p = 10,0 \text{ бар} = 1,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 179,91 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290

$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг К)}$
$p = 15,0 \text{ бар} = 1,5 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 198,32 ^\circ\text{C})$			
0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
0.2793	3364.8	3783.8	7.9391

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 20,0 \text{ бар} = 2,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 212,42 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487

$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 30,0 \text{ бар} = 3,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 233,90 ^\circ\text{C})$			
0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
0.0850	2788.4	3043.4	6.6245
0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 40 \text{ бар} = 4,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 250,4 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141

$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 60 \text{ бар} = 6,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 275,64 ^\circ\text{C})$			
0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
0.07677	3528.3	3989.2	7.5190

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 80 \text{ бар} = 8,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 295,06 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 100 \text{ бар} = 10,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 311,06 ^\circ\text{C})$			
0.01803	2544.4	2724.7	5.6141
0.01925	2588.8	2781.3	5.7103
0.02331	2729.1	2962.1	6.0060
0.02641	2832.4	3096.5	6.2120
0.02911	2922.1	3213.2	6.3805
0.03160	3005.4	3321.4	6.5282
0.03394	3085.6	3425.1	6.6622
0.03619	3164.1	3526.0	6.7864
0.03837	3241.7	3625.3	6.9029
0.04048	3318.9	3723.7	7.0131
0.04358	3434.7	3870.5	7.1687
0.04560	3512.1	3968.1	7.2670

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 120 \text{ бар} = 12,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 324,75 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 140 \text{ бар} = 14,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 336,75 ^\circ\text{C})$			
0.01149	2476.8	2637.6	5.3717
0.01422	2617.4	2816.5	5.6602
0.01722	2760.9	3001.9	5.9448
0.01954	2868.6	3142.2	6.1474
0.02157	2962.5	3264.5	6.3143
0.02343	3049.8	3377.8	6.4610
0.02517	3133.6	3486.0	6.5941
0.02683	3215.4	3591.1	6.7172
0.02843	3296.0	3694.1	6.8326
0.03075	3415.7	3846.2	6.9939
0.03225	3495.2	3946.7	7.0952

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 160 \text{ бар} = 16,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 347,44 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.00931	2431.7	2580.6	5.2455
360	0.01105	2539.0	2715.8	5.4614
400	0.01426	2719.4	2947.6	5.8175
440	0.01652	2839.4	3103.7	6.0429
480	0.01842	2939.7	3234.4	6.2215
520	0.02013	3031.1	3353.3	6.3752
560	0.02172	3117.8	3465.4	6.5132
600	0.02323	3201.8	3573.5	6.6399
640	0.02467	3284.2	3678.9	6.7580
700	0.02674	3406.0	3833.9	6.9224
740	0.02808	3486.7	3935.9	7.0251

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 180 \text{ бар} = 18,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 357,06 ^\circ\text{C})$			
0.00749	2374.3	2509.1	5.1044
0.00809	2418.9	2564.5	5.1922
0.01190	2672.8	2887.0	5.6887
0.01414	2808.2	3062.8	5.9428
0.01596	2915.9	3203.2	6.1345
0.01757	3011.8	3378.0	6.2960
0.01904	3101.7	3444.4	6.4392
0.02042	3188.0	3555.6	6.5696
0.02174	3272.3	3663.6	6.6905
0.02362	3396.3	3821.5	6.8580
0.02483	3478.0	3925.0	6.9623

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 200 \text{ бар} = 20,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 365,81 ^\circ\text{C})$				
СНП	0.00583	2293.0	2409.7	4.9269
400	0.00994	2619.3	2818.1	5.5540
440	0.01222	2774.9	3019.4	5.8450
480	0.01399	2891.2	3170.8	6.0518
520	0.01551	2992.0	3302.2	6.2218
560	0.01689	3085.2	3423.0	6.3705
600	0.01818	3174.0	3537.6	6.5048
640	0.01940	3260.2	3648.1	6.6286
700	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993
740	0.02224	3469.3	3914.1	6.9052
800	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг К})$
$p = 240 \text{ бар} = 24,0 \text{ МПа}$			
0.00673	2477.8	2639.4	5.2393
0.00929	2700.6	2923.4	5.6506
0.01100	2838.3	3102.3	5.8950
0.01241	2950.5	3248.5	6.0842
0.01366	3051.1	3379.0	6.2448
0.01481	3145.2	3500.7	6.3875
0.01588	3235.5	3616.7	6.5174
0.01739	3366.4	3783.8	6.6947
0.01835	3451.7	3892.1	6.8038
0.01974	3578.0	4051.6	6.9567

Продовження таблиці ДА.12.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 280 \text{ бар} = 28,0 \text{ МПа}$				
400	0.00383	2223.5	2330.7	4.7494
440	0.00712	2613.2	2812.6	5.4494
480	0.00885	2780.8	3028.5	5.7446
520	0.01020	2906.8	3192.3	5.9566
560	0.01136	3015.7	3333.7	6.1307
600	0.01241	3115.6	3463.0	6.2823
640	0.01338	3210.3	3584.8	6.4187
700	0.01473	3346.1	3758.4	6.6029
740	0.01558	3433.9	3870.0	6.7153
800	0.01680	3563.1	4033.4	6.8720
900	0.01873	3774.3	4298.8	7.1084

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 320 \text{ бар} = 32,0 \text{ МПа}$			
0.00236	1980.4	2055.9	4.3239
0.00544	2509.0	2683.0	5.2327
0.00722	2718.1	2949.2	5.5968
0.00853	2860.7	3133.7	5.8357
0.00963	2979.0	3287.2	6.0246
0.01061	3085.3	3424.6	6.1858
0.01150	3184.5	3552.5	6.3290
0.01273	3325.4	3732.8	6.5203
0.01350	3415.9	3847.8	6.6361
0.01460	3548.0	4015.1	6.7966
0.01633	3762.7	4285.1	7.0372

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 25 \text{ бар} = 2,5 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 223,99 ^\circ\text{C})$				
20	1.0006	83.80	86.30	0.2961
40	1.0067	167.25	169.77	0.5715
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174
СНП	1.1973	959.1	962.1	2.5546

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 50 \text{ бар} = 5,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 263,99 ^\circ\text{C})$			
0.9995	83.65	88.65	0.2956
1.0056	166.95	171.97	0.5705
1.0268	333.72	338.85	1.0720
1.0410	417.52	422.72	1.3030
1.0768	586.76	592.15	1.7343
1.1240	759.63	765.25	2.1341
1.1530	848.1	853.9	2.3255
1.1866	938.4	944.4	2.5128
1.2859	1147.8	1154.2	2.9202

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 75 \text{ бар} = 7,5 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 290,59 ^\circ\text{C})$				
20	0.9984	83.50	90.99	0.2950
40	1.0045	166.64	174.18	0.5696
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763
СНП	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649

$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг К)}$
$p = 100 \text{ бар} = 10,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 311,06 ^\circ\text{C})$			
0.9972	83.36	93.33	0.2945
1.0034	166.35	176.38	0.5686
1.0245	332.59	342.83	1.0688
1.0385	416.12	426.50	1.2992
1.0737	584.68	595.42	1.7292
1.1199	756.65	767.84	2.1275
1.1805	934.1	945.9	2.5039
1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
1.4524	1393.0	1407.6	3.3596

Продовження таблиці ДА.12.

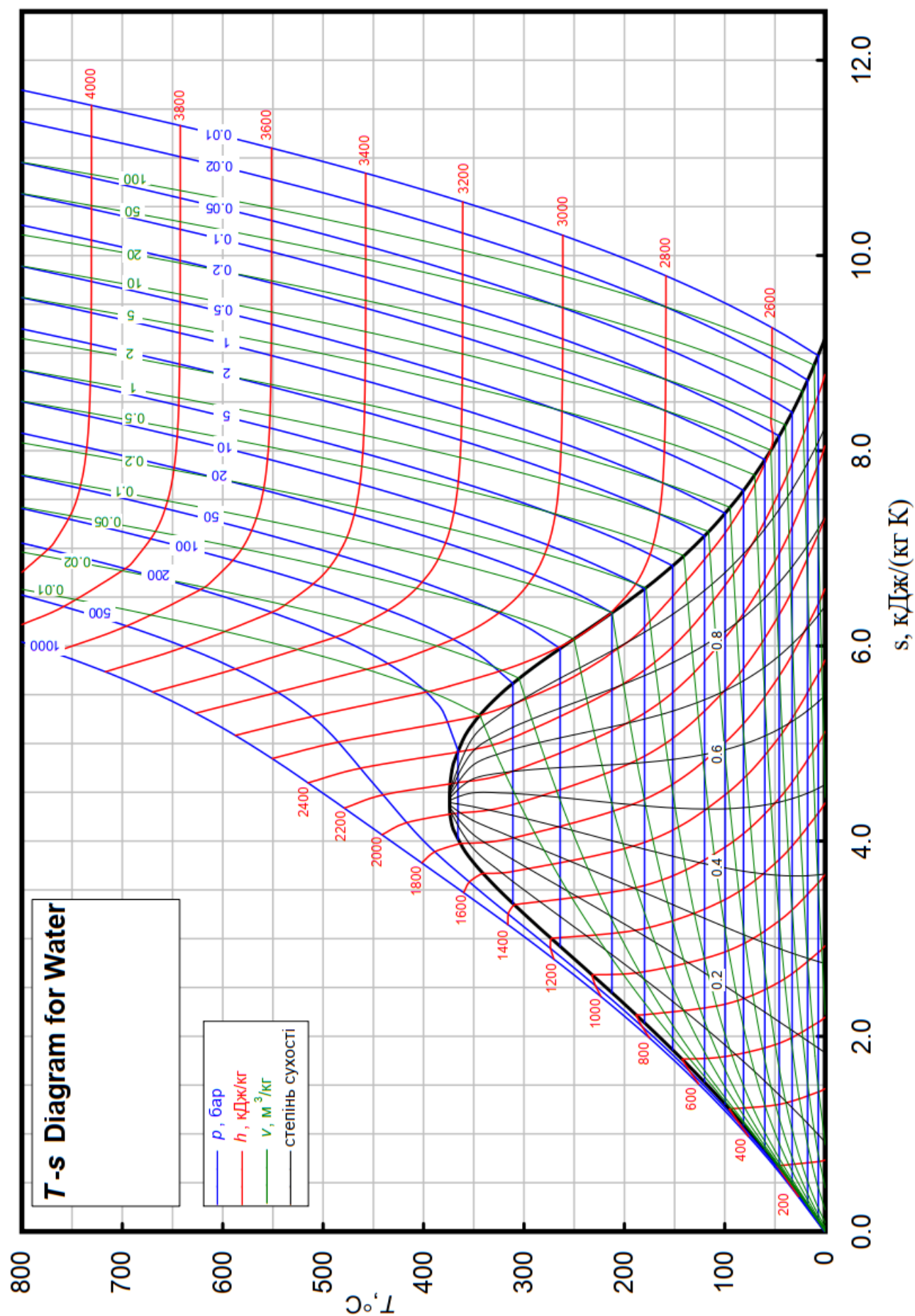
$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг К})$
$p = 150 \text{ бар} = 15,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 342,24 ^\circ\text{C})$				
20	0.9950	83.06	97.99	0.2934
40	1.0013	165.76	180.78	0.5666
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260
CHП	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848

$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг К})$
$p = 200 \text{ бар} = 20,0 \text{ МПа} \quad (t_{\text{н}} = 365,81 ^\circ\text{C})$			
0.9928	82.77	102.62	0.2923
0.9992	165.17	185.16	0.5646
1.0199	330.40	350.80	1.0624
1.0337	413.39	434.06	1.2917
1.0678	580.69	602.04	1.7193
1.1120	750.95	773.20	2.1147
1.1693	925.9	949.3	2.4870
1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
2.036	1785.6	1826.3	4.0139

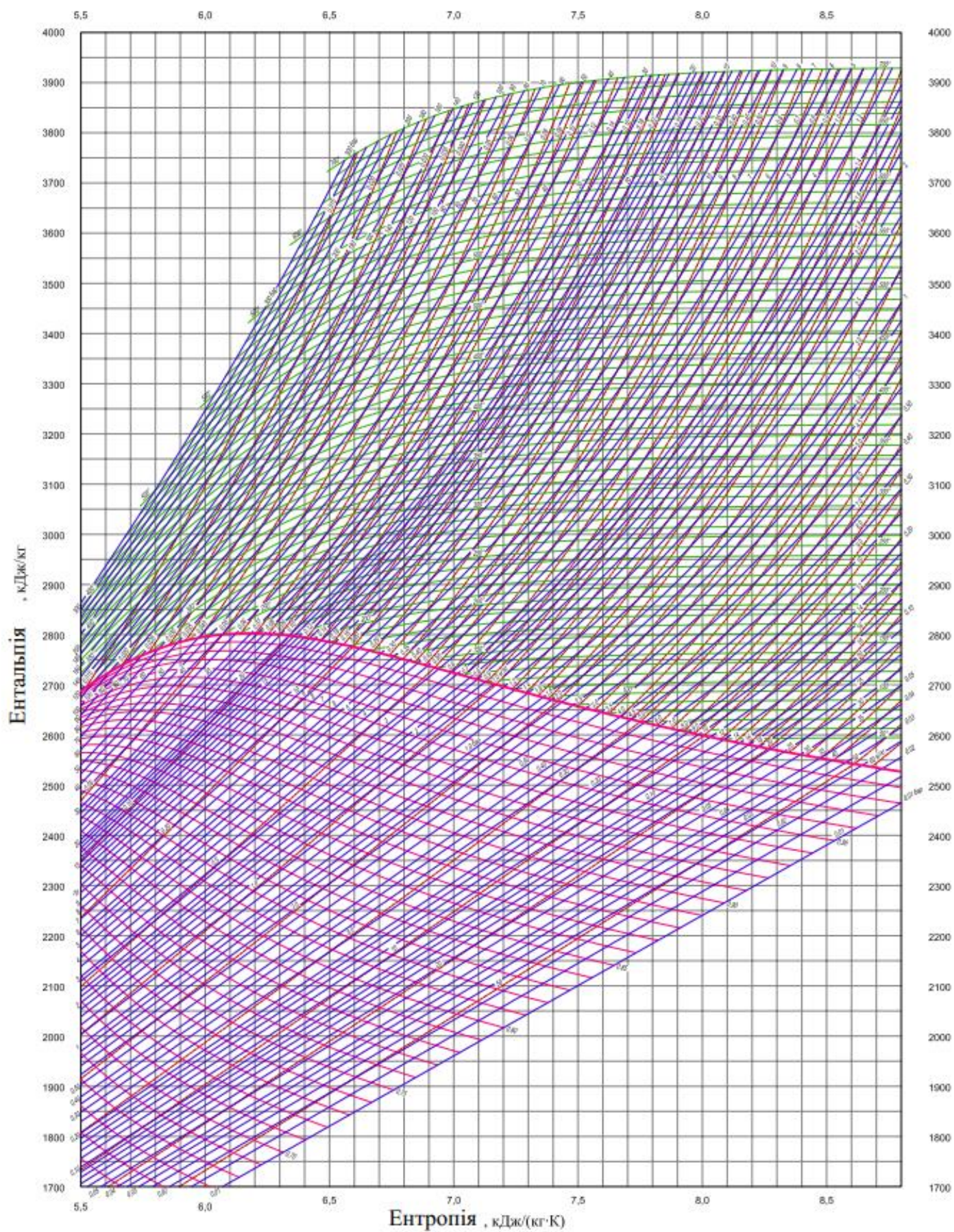
$t, ^\circ\text{C}$	$v \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг К})$
$p = 250 \text{ бар} = 25 \text{ МПа}$				
20	0.9907	82.47	107.24	0.2911
40	0.9971	164.60	189.52	0.5626
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900

$v \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$u, \text{ кДж/кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж}/(\text{кг К})$
$p = 300 \text{ бар} = 30,0 \text{ МПа}$			
0.9886	82.17	111.84	0.2899
0.9951	164.04	193.89	0.5607
1.0290	410.78	441.66	1.2844
1.1302	831.4	865.3	2.2893
1.3304	1287.9	1327.8	3.1741

Ентропійна діаграма T - s



Ентропійна діаграма h - s



ДОДАТОК Б. ТИТУЛЬНИЙ АРКУШ РОЗРАХУНКОВОЇ-ГРАФІЧНОЇ
РОБОТИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кафедра теплової та альтернативної енергетики

РОЗРАХУНКОВА-ГРАФІЧНА РОБОТА

з освітнього компонента

«Технічна термодинаміка»

на тему:

**«Розрахунок та аналіз термодинамічних процесів з ідеальним газом
і водяною парою»**

Студента (ки) II курсу групи ТУ – ____

Спеціальності 144 Теплоенергетика
ОПП «Теплоенергетика та теплоенергетичні
установки електростанцій»

Керівник _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Київ – 20__

ДОДАТОК В. ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

ЗМІСТ

Завдання на розрахункову роботу

1. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – ідеальний газ
 - 1.1.Визначення параметрів у початковому стані
 - 1.1.1. Термічні параметри
 - 1.1.2. Калоричні параметри
 - 1.2.Визначення параметрів у кінцевому стані
 - 1.2.1. Термічні параметри
 - 1.2.2. Калоричні параметри
 - 1.3.Зміна калоричних параметрів у процесі $\Delta u, \Delta h, \Delta s$; $\Delta U, \Delta H, \Delta S$
 - 1.3.1. Обчислення зміни калоричних параметрів за наближеними формулами
 - 1.3.2. Обчислення зміни калоричних параметрів за уточненими формулами
 - 1.4.Визначення характеристик процесу l, L, l_n, L_n, q, Q .
 - 1.5.Зображення процесу в $p-v$ і $T-s$ діаграмах.
2. Розрахунок в припущенні, що водяна пара – реальний газ
 - 2.1.Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах та характеристик процесу за допомогою таблиць водяної пари.
 - 2.1.1. Визначення параметрів у початковому стані (в т. 1).
 - 2.1.2. Визначення параметрів у кінцевому стані (в т. 2).
 - 2.1.3. Зміна калоричних параметрів в процесі $\Delta u, \Delta h, \Delta s$; $\Delta U, \Delta H, \Delta S$.
 - 2.1.4. Характеристики процесу l, L, l_n, L_n, q, Q .
 - 2.2.Визначення параметрів у початковому та кінцевому станах за ентропійними діаграмами ($T-s$ і $h-s$).
 - 2.2.1. Діаграма $T-s$
 - 2.2.2. Діаграма $h-s$
 - 2.3.Діаграма $p-v$ (зображення процесу).
 - 2.4.Порівняння параметрів, знайдених за таблицями і діаграмами.
3. Порівняння характеристики процесу l, l_n, q , знайдених при обчисленні параметрів за уточненими формулами (водяна пара - ідеальний газ) та за таблицями (водяна пара – реальний газ).
4. Висновки.
5. Список використаних джерел

ДОДАТОК Г. ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

<i>Ізохорний процес</i>				
№ п/п	$V_1 \text{ м}^3$	$p_1 \text{ бар}$	$t_1 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 \text{ бар}$
1.	0,5	2,0	150	1,6
2.	2,0	4,0	170	3
3.	2,8	100	450	60
4.	4,0	50	330	30
5.	5,0	20	500	10
6.	6,0	40	400	22
7.	4,0	7	190	5
8.	7,0	4	200	3
№ п/п	$V_1 \text{ м}^3$	$p_1 \text{ бар}$	$v_1 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 \text{ бар}$
9.	5	10	0,18	20
10.	1,5	5	0,35	10
11.	1,5	20	0,08	40
12.	3,5	12	0,14	25
13.	1	50	0,035	100
14.	2	30	0,06	60
15.	3,5	6	0,3	12
16.	6	8	0,2	18
<i>Ізотермічний процес</i>				
№ п/п	$V_1 \text{ м}^3$	$p_1 \text{ бар}$	$t_1 \text{ }^\circ\text{C}$	$V_2 \text{ м}^3$
17.	72	0,5	150	5,4
18.	80	1,2	180	7
19.	68	2	200	6
20.	55	3	330	0,6
21.	9,6	5	250	0,8
22.	12	6	300	0,44
23.	12,1	10	260	1,8
24.	11	20	300	1,5
№ п/п	$V_1 \text{ м}^3$	$p_1 \text{ бар}$	$v_1 \text{ м}^3/\text{кг}$	$V_2 \text{ м}^3$
25.	4,5	50	0,035	120
26.	6	22	0,08	75
27.	12,5	5	0,3	420
28.	8	40	0,04	400
29.	5,5	35	0,05	65
30.	3,5	40	0,045	35
31.	4,2	20	0,08	105
32.	2	12	0,12	30
<i>Ізоентропний процес</i>				
№ п/п	$V_1 \text{ м}^3$	$p_1 \text{ бар}$	$t_1 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 \text{ бар}$
33.	4	2	160	0,2
34.	8	4	200	0,4
35.	0,95	30	400	1,5
36.	12	50	500	1
37.	0,75	50	410	3
38.	1,5	80	400	2

Продовження таблиці

39.	2,5	100	440	3
40.	2	120	460	2
№ п/п	V_1 м³	p_1 бар	v_1 м³/кг	p_2 бар
41.	7,8	2	0,8	40
42.	4,5	3	0,55	50
43.	55	1	1,6	2,0
44.	40	2	0,8	40
45.	4,7	22	0,08	200
46.	7,4	26	0,11	160
47.	6,5	10	0,18	100
48.	4	6	0,3	60
Ізобарний процес				
№ п/п	V_1 м³	p_1 бар	t_1 °C	V_2 м³
49.	5	3	370	2,5
50.	10	6	300	6
51.	1	30	400	0,6
52.	2	60	400	1,2
53.	8,4	1,6	140	5,6
54.	4,2	3,2	180	3,2
55.	4,5	5	180	3,0
56.	12	16	230	8,5
№ п/п	V_1 м³	p_1 бар	v_1 м³/кг	V_2 м³
57.	0,6	35	0,05	1,2
58.	0,4	25	0,07	0,9
59.	2	8,0	0,2	4,2
60.	3	16	0,1	6,5
61.	3,3	60	0,03	5,5
62.	6,0	30	0,06	9,0
63.	1	100	0,02	2,0
64.	1,2	80	0,02	2,2