

536(075)  
0-76

**О. П. Остапенко**

**ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**  
**Лабораторний практикум**

536(075)  
0-76

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

О. П. Остапенко

# ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Лабораторний практикум



536(075)      0-76      2012

Остапенко О. П. Технічна термодинаміка



Вінниця  
ВНТУ  
2012

УДК 536(075)

ББК 22.317я7

076

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 8 від 24.03.2011 р.)

Рецензенти :

**О. В. Дорошенко**, доктор технічних наук, професор

**М. О. Прядко**, доктор технічних наук, професор

**С. Й. Ткаченко**, доктор технічних наук, професор

**Остапенко, О. П.**

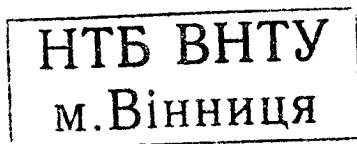
076 Технічна термодинаміка : лабораторний практикум /  
О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.

В практикумі викладено теоретичні основи законів технічної термодинаміки з метою їх застосування для дослідження і аналізу термодинамічних процесів і циклів, подані лабораторні роботи з дослідження термодинамічних процесів на фізичних моделях та передбачено дослідження термодинамічних циклів за допомогою аналітичних програм в середовищі Excel.

УДК 536(075)

ББК 22.317я7

457358



© О. Остапенко, 2012

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Передмова.....  | 5  |
| 1 РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ПАРАМЕТРИ ТА<br>ФУНКЦІЇ СТАНУ. ФОРМИ ЕНЕРГООБМІНУ В ТДС ..... | 6  |
| 1.1 Рівняння стану ідеального газу. Параметри і функції стану.....                              | 6  |
| 1.2 Функції стану. Форми енергообміну.....  | 8  |
| 2 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ. ЗАМКНЕНІ<br>ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ І ЦИКЛИ. ЦИКЛ КАРНО.....     | 16 |
| 2.1 Перший закон термодинаміки.....   | 16 |
| 2.2 Другий закон термодинаміки.....   | 17 |
| 2.3 Перший та другий закони термодинаміки для замкнених<br>процесів.....                        | 18 |
| 2.4 Цикл Карно.....   | 20 |
| 3 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ ТА ЇХ<br>АНАЛІЗ.....                                   | 22 |
| 3.1 Політропний процес.....   | 22 |
| 3.2 Ізохорний процес.....   | 25 |
| 3.3 Ізобарний процес.....   | 26 |
| 3.4 Ізотермічний процес.....  | 28 |
| 3.5 Адіабатний процес.....  | 30 |
| 4 ВОДЯНА ПАРА. ПРОЦЕСИ ПАРОУТВОРЕННЯ .....  | 32 |
| 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ<br>ПРОЦЕСІВ І ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....          | 34 |
| Лабораторна робота № 1. Тарування непроточного калориметра.....                                 | 34 |
| Лабораторна робота № 2. Визначення ізобарної теплоємності<br>повітря.....                       | 37 |
| Лабораторна робота № 3. Визначення газової сталої повітря.....                                  | 40 |
| Лабораторна робота № 4. Визначення зміни ентропії в процесі<br>теплообміну.....                 | 41 |
| Лабораторна робота № 5. Ізохорне нагрівання води і водяної<br>пари.....                         | 45 |
| Лабораторна робота № 6. Визначення параметрів стану<br>вологого повітря.....                    | 48 |
| Лабораторна робота № 7. Дослідження процесів витікання<br>повітря із звуженого сопла.....       | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ<br>МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....                      | 54 |
| Лабораторна робота № 8. Дослідження циклів компресора.....  | 54 |
| Лабораторна робота № 9. Дослідження процесів витікання газів<br>із сопла.....                         | 57 |
| Лабораторна робота № 10. Дослідження циклу газотурбінної<br>установки з регенерацією теплоти.....     | 59 |
| Лабораторна робота № 11. Дослідження впливу параметрів<br>пари на показники роботи циклу Ренкіна..... | 63 |
| Лабораторна робота № 12. Визначення оптимальної<br>температури проміжного перегріву.....              | 66 |
| Лабораторна робота № 13. Дослідження циклу повітряної<br>холодильної машини.....                      | 68 |
| Лабораторна робота № 14. Дослідження роботи теплонасосної<br>установки.....                           | 70 |
| Література.....   | 74 |
| Додатки.....  | 75 |

## ПЕРЕДМОВА

Загальний зміст і спрямованість лабораторних робіт – дослідження термодинамічних властивостей речовин, закономірностей термодинамічних процесів роботи термодинамічних циклів. Перша частина лабораторних робіт виконується на фізичних моделях, а друга – методом математичного моделювання на ЕОМ.

Виконання лабораторної роботи починається з домашньої підготовки, в процесі якої студент з'ясовує мету і зміст роботи, вивчає або повторює необхідний теоретичний матеріал згідно з рекомендованою літературою, вивчає схему установки, методику проведення дослідів і обробки експериментальних даних, готує звіт і відповідає на контрольні запитання.

При виконанні експериментальних робіт звіт має містити: найменування роботи, її мету, короткий опис дослідної установки і методики вимірювань, журнал спостережень, обробку дослідних даних, необхідний графічний матеріал, висновки.

При виконанні лабораторно-розрахункових робіт на ЕОМ звіт повинен містити: найменування і мету роботи, схему установки і зображення циклу на термодинамічних діаграмах з відповідним позначенням параметрів у характерних точках, математичні формули, необхідні для обчислення циклу (теоретичні основи), вхідні дані, графічну обробку результатів і обґрунтовані висновки.

Перед початком роботи викладачем перевіряється міра готовності студента до виконання роботи. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки, підготували звіт і пройшли співбесіду з викладачем.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даного посібника до друку.

# І РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ПАРАМЕТРИ ТА ФУНКЦІЇ СТАНУ. ФОРМИ ЕНЕРГООБМІНУ В ТДС

## 1. 1 Рівняння стану ідеального газу. Параметри стану

**Технічна термодинаміка** (*technical thermodynamics*) вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти й роботи, властивості робочих тіл, що беруть участь у цих перетвореннях.

**Термодинамічною системою (ТДС)** (*thermodynamic system*) називається сукупність тіл, здатних обмінюватись між собою енергією і речовиною. В ТДС існують два способи енергоперетворень: здійснення **роботи** (*work*) та **теплообмін** (*heat exchange*). ТДС, яка не спроможна обмінюватись енергією в формі теплообміну, називається **адіабатною** (*adiabatic*) або **теплоізолюваною**.

Енергоперетворення в термодинамічних системах здійснюються за допомогою **робочого тіла** (*working body*), яке перебуває в газоподібному стані (ідеальний газ). Якщо силами міжмолекулярної взаємодії і об'ємом молекул газу знехтувати, то такий газ називають **ідеальним** (*ideal*). Сукупність фізичних властивостей ТДС за конкретних умов називають її **термодинамічним станом** (*thermodynamic condition*).

Фізичні величини, значення яких однозначно визначає стан системи, називають **параметрами стану** (*parameters of condition*) (можуть бути безпосередньо виміряні на практиці) або **функціями стану** (*functions of condition*) (визначаються за допомогою параметрів стану).

Рівняння стану ідеального газу було отримане в 1834 р. французьким вченим Д. Клапейроном. Це рівняння однозначно пов'язує між собою параметри стану газу і називається **рівнянням стану ідеального газу** (*equation of condition of the ideal gas*) або **рівнянням Клапейрона**

$$Pv = RT, \tag{1.1}$$

де  $P$  – абсолютний тиск (*absolute pressure*),

$v$  – питомий об'єм (*specific volume*),

$R$  – газова стала (*gas constant*),

$T$  – термодинамічна температура (*thermodynamic temperature*).

З рівняння стану ідеального газу  $\frac{Pv}{T} = \text{const} = R$ . Газова стала  $R$

$\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$  – це постійна величина, яка залежить від природи газу, але не залежить від його стану (тиску, температури); тобто вона є фізичною константою речовини. Таким чином, газова стала має фізичний зміст: це робота, яку виконує 1 кг ідеального газу при зміні його температури на 1К в ізобарному процесі.

Універсальна (молярна) газова стала (*universal gas constant*) для нормальних фізичних умов становить  $R_\mu = R \cdot \mu = 8314,4 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}\right)$ , де  $\mu$  – молярна маса газу,  $\left(\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}\right)$ . Фізичний зміст універсальної газової сталої – це робота зміни об'єму, яку виконує 1 кмоль ідеального газу при зміні його температури на 1К в ізобарному процесі.

Реальні гази за властивостями наближаються до ідеальних у разі виконання умов:  $P \rightarrow 0$ ,  $v \rightarrow \infty$ .

Розглянемо три основні параметри робочого тіла.

Тиск  $P$  характеризує силу, що припадає на одиницю площі  $P = \frac{N}{F}$  (Па), де  $N$  – сила за нормаллю до поверхні, за умови рівномірного розподілу по ній,  $F$  – площа поверхні.

Тиск навколишнього середовища називається **барометричним** (*barometric*)  $P_b$  і вимірюється за показами барометра. Тиск, що перевищує барометричний, називають **надлишковим** або **манометричним** (*manometric*)  $P_m$  і вимірюють за допомогою манометра. Тиск, значення якого менше за барометричний, називається **розрідженням** або **вакуумом** (*vacuum*)  $P_{\text{вак}}$  і вимірюється вакуумметром.

Значення абсолютного тиску визначається із співвідношень:

$$P_{\text{абс}} = P_b + P_m \text{ (Па);} \quad P_{\text{абс}} = P_b - P_{\text{вак}} \text{ (Па).} \quad (1.2)$$

Температура  $T$  практично визначається як міра внутрішньої середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху молекул речовини.



Питомий об'єм  $v$  – це об'єм одиниці маси речовини, який визначається як  $v = \frac{V}{M}$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ). Між питомим об'ємом робочого тіла і його густиною (density)  $\rho$  існує співвідношення:  $v = \frac{1}{\rho}$ .

Якщо всі термодинамічні параметри постійні в часі і однакові в усіх точках системи, то така система називається **рівноважною** (*equilibrium*). Якщо між різними точками в системі існують різниці температур, тисків тощо, то вона називається **нерівноважною** (*nonequilibrium*). Ізольована система з часом завжди приходиться в стан рівноваги і ніколи сама вийти з нього не може.

**Термодинамічним процесом** (*thermodynamic process*) називають сукупність параметрів стану робочого тіла, що змінюються з часом.

## 1.2 Функції стану. Форми енергообміну

### 1.2.1 Внутрішня енергія

Робоче тіло, знаходячись в будь-якому стані, має певний запас внутрішньої енергії. Під **внутрішньою енергією** (*internal energy*)  $U$  розуміють всі види енергії, пов'язані з внутрішнім рухом молекул: кінетичну енергію, енергію поступального і обертального руху молекул, потенціальну енергію молекул. Внутрішня енергія ідеального газу не залежить від характеру процесу, а залежить тільки від температури газу і питомого об'єму, отже, є функцією стану:  $u = f(v, T)$ .

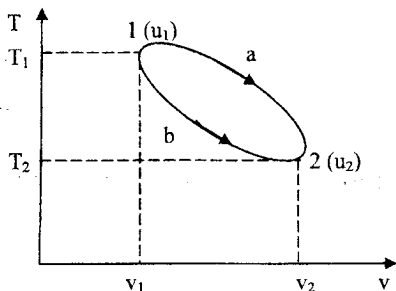


Рисунок 1.1 – Зміна внутрішньої енергії

Кожне тіло має певний запас внутрішньої енергії. В координатах  $T, v$  (рис. 1.1) стан в точці 1 відповідає питомій внутрішній енергії  $u_1$ . Якщо тіло переходить в стан  $u_2$ , тоді зміна внутрішньої енергії становитиме

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (1.3)$$

Зміна внутрішньої енергії в процесах 1–а–2 та 1–b–2 на рис. 1.1 буде однаковою

$$\Delta u = u_2 - u_1 = u(T_2, v_2) - u(T_1, v_1) . \quad (1.4)$$

Якщо робоче тіло повертається в круговому процесі в початковий стан (наприклад, процес 1–а–2–b–1), то зміна внутрішньої енергії дорівнює нулю, тобто

$$\oint du = 0. \quad (1.5)$$

З математичного аналізу відомо, що за умови (1.5) підінтегральний вираз є повним диференціалом функції. Тоді можна записати

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv . \quad (1.6)$$

Для ідеальних газів  $P \rightarrow 0$  або  $v \rightarrow \infty$ , тоді

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT = C_v dT, \quad (1.7)$$

де  $C_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ ,  $\left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$  – питома теплоємність при сталому об'ємі

або **питома ізохорна теплоємність** (*specific isochoric thermal capacity*).

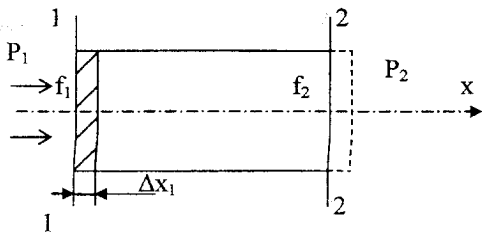
Зміна внутрішньої енергії в будь-якому процесі 1-2

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = \int_1^2 C_v dT . \quad (1.8)$$

### 1.2.2 Ентальпія

Поняття «ентальпія» (*enthalpy*) ввів в термодинаміку Гібс. Воно переважно використовується для характеристики поточних процесів, а його фізичний зміст залежить від конкретних умов.

Розглянемо поняття ентальпії на прикладі найпростішої проточної системи (рис. 1.2). В цій системі зміна кінетичної і потенціальної енергії дорівнює нулю. У вхідний переріз системи з площею  $f_1$  зі сталим тиском  $P_1$  втікає одинична маса речовини. Тоді об'єм повинен зменшуватись на величину  $f_1 \cdot \Delta x_1$ . При цьому повинна бути виконана деформаційна робота  $P_1 \cdot f_1 \cdot \Delta x_1 = P_1 \cdot v_1$ .



Аналогічно для витікання одиничної маси об'єм збільшується на величину  $f_2 \cdot \Delta x_2$ , а робота виштовхування цього об'єму в середовище зі сталим тиском  $P_2$  дорівнюватиме

$$P_2 \cdot f_2 \cdot \Delta x_2 = P_2 \cdot v_2.$$

Рисунок 1.2 – Проточна система

Різницю деформаційних робіт  $l_{np} = P_2 \cdot v_2 - P_1 \cdot v_1$  називають **питомою роботою проштовхування** (*specific work of push*)  $dl_{np} = d(Pv)$ .

Якщо враховувати зміну внутрішньої енергії в системі, то разом з роботою проштовхування зміна енергії в межах системи буде:

$$(u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) = h_2 - h_1 = \Delta h, \quad (1.9)$$

або в диференціальній формі

$$d(u + Pv) = dh. \quad (1.10)$$

Величину  $(u + Pv)$  називають **ентальпією**, яка є сумою внутрішньої енергії системи і потенціальної енергії джерела зовнішнього тиску. Ентальпія є функцією стану  $h = f(P, T)$ . Аналогічно зміні внутрішньої енергії зміна ентальпії в круговому процесі  $\oint dh = 0$ .

Тоді можна записати

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP. \quad (1.11)$$

Для ідеальних газів  $P \rightarrow 0$ , тоді

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT = C_p dT, \quad (1.12)$$

де  $C_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$ ,  $\left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$  – питома теплоємність при сталому тиску

або **питома ізобарна теплоємність** (*specific isobaric thermal capacity*).

Зміна ентальпії в будь-якому процесі 1-2 визначається тільки початковим і кінцевим станом тіла і не залежить від характеру процесу

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = \int_1^2 C_p dT. \quad (1.13)$$

### 1.2.3 Робота

Поняття «робота» запозичене з механіки. Питома робота переміщення  $dl = F \cdot dx$ . Питома робота обертального руху  $dl = M \cdot d\phi$ , де  $M$  – момент сил,  $\phi$  – кутове переміщення. Деформаційна робота  $dl = P \cdot dv$ . Спостерігається ідентичність формул для визначення елементарної роботи.

Лагранж ввів поняття «узагальненої сили» та «узагальненої координати». Узагальнений вираз для елементарної механічної роботи

$$dl = X_k \cdot dx_k, \quad (1.14)$$

де  $X_k$  – узагальнена сила – це рушійна сила процесу;

$x_k$  – узагальнена координата, яка характеризує ефект процесу.

### 1.2.4 Робота зміни об'єму

Розглянемо закриту просту ТДС, в якій під поршнем перебуває 1 кг ідеального газу (рис. 1.3). Початковий стан – переріз 1–1. Коли тиск  $P_1$  більший за тиск зовнішнього середовища, поршень буде рухатись від положення 1 до положення 2.

Узагальнена сила переміщення  $F = P \cdot f$ . В процесі переміщення поршня на  $dx$ , за умови  $f \cdot dx = dv$ , виконується елементарна **робота зміни об'єму** (*work of alteration the volume*)

$$dl_v = F \cdot dx = P \cdot dv. \quad (1.15)$$

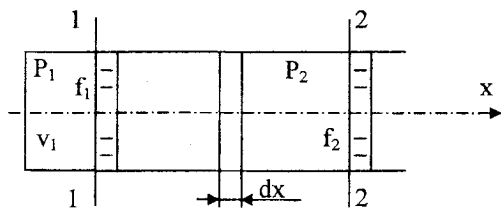


Рисунок 1.3 – Проста ТДС

Сумарна робота газу в процесі 1-2

$$l_v = \int_{v_1}^{v_2} P \cdot v = \int_1^2 P dv. \quad (1.16)$$

Для кругового процесу 1-a-2-b-1 робота зміни об'єму  $\oint dl_v \neq 0$  (рис. 1.4). У випадку розширення газу (процес 1-a-2) виконується робота  $l_1 = l_{1-a-2}$ , яка еквівалентна площі с-1-a-2-d. У випадку стиску газу (процес 2-b-1) виконується робота,  $l_2 = l_{2-b-1}$ , яка еквівалентна площі d-2-b-1-с. Оскільки  $l_1 > l_2$ , то робота зміни об'єму є функцією процесу.

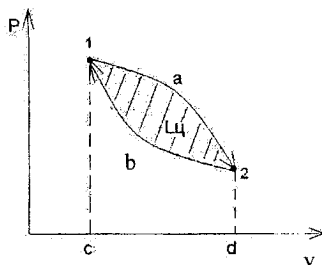


Рисунок 1.4 – Робота зміни об'єму на P-v діаграмі

Для замкненого кругового процесу (циклу) (*cycle*) робота зміни об'єму визначається

$$l_{\text{ц}} = \oint dl_v = \oint P dv \neq 0. \quad (1.17)$$

Графічно ця робота зображується площею, обмеженою замкненою кривою 1-a-2-b-1. Робота циклу додатна, якщо він здійснюється за годинниковою стрілкою (крива роботи розширення розташована вище кривої

стиску). Такий цикл називається **прямим** (*straight cycle*). Якщо цикл здійснюється проти годинникової стрілки, він називається **зворотним** (*reverse cycle*), тоді робота циклу від'ємна (тобто, робота стиску підводиться ззовні).

### 1.2.5 Робота зміни тиску

В поточному процесі потоком речовини переноситься енергія

$$dh = d(u + Pv) = du + Pdv + vdP. \quad (1.18)$$

Звідси  $(-vdP) = du + Pdv - dh = dl_p$  – **робота зміни тиску** (*work of alteration the pressure*). Враховуючи, що зміна ентальпії  $dh = du + d(Pv)$ , для роботи зміни тиску можна записати

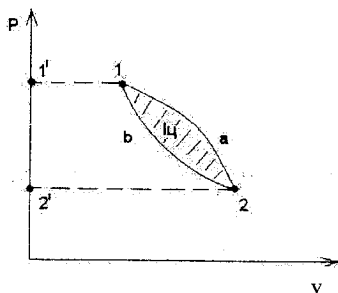
$$dl_p = -vdP = Pdv - d(Pv) = dl_v - d(Pv), \quad (1.19)$$

тобто робота зміни тиску дорівнює різниці робіт зміни об'єму та прогтовхування. Знак «мінус» належить до  $dP$  та показує, що потік рухомий, коли є від'ємний градієнт тиску.

Робота зміни тиску в процесі 1-2

$$l_p = -\int_1^2 vdP = \int_1^2 Pdv - \int_1^2 d(Pv) = P_1v_1 + \int_1^2 Pdv - P_2v_2. \quad (1.20)$$

Робота  $l_p$  не є роботою робочого тіла (на відміну від  $l_v$ ). За аналогією з роботою зміни об'єму  $l_v$ , робота зміни тиску для кругового процесу



$$l_u = \oint dl_p = \oint (-vdP) \neq 0. \quad (1.21)$$

Графічно ця робота зображується площею, обмеженою замкнутою кривою 1-a-2-b-1 (рис. 1.5).

Рисунок 1.5 – Робота зміни тиску на P-v діаграмі

### 1.2.6 Теплота

Теплота (*heat*) – кількісна міра теплообміну. Теплообмін відбувається, коли є різниця температур між ТДС та зовнішнім середовищем. Питома кількісна міра теплообміну – питома теплота – пропорційна різниці температур

$$dq = C \cdot dT, \quad (1.22)$$

де  $C$  – коефіцієнт пропорційності, який називається **істинною питомою теплоємністю** (*true specific thermal capacity*) і характеризує теплоту, необхідну для підвищення температури одиниці тіла на один градус.

Є різні способи вимірювань одиниці тіла. Тому розрізняють масову  $C_m$ ,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ ; об'ємну  $C' \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$  та мольну  $C_\mu$ ,  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right]$  теплоємності; які пов'язані такими співвідношеннями

$$C_m = C_\mu / \mu; \quad C' = C_\mu / 22,4; \quad C' = C_m \cdot \rho. \quad (1.23)$$

Користуються середнім значенням теплоємності в заданому інтервалі температур, оскільки теплоємність залежить від температури.

Питома теплота, яка передається шляхом теплообміну в процесі 1-2

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} C dT = \int_1^2 C dT. \quad (1.24)$$

Елементарна питома теплота може бути визначена через координату термічної взаємодії – **ентропію**  $s$  (*entropy*)

$$dq = T \cdot ds. \quad (1.25)$$

Оскільки  $T > 0$ , то при підведенні теплоти ( $dq > 0$ ) ентропія зростає, при відведенні – зменшується.

Теплота довільного термодинамічного процесу 1-2

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} T ds = \int_1^2 T ds . \quad (1.26)$$

Графічне зображення  $T = f(S)$  називається тепловою або ентропійною діаграмою процесу (рис. 1.6).

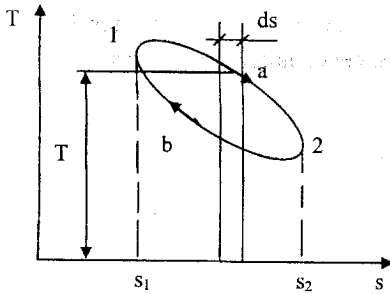


Рисунок 1.6 – Теплова діаграма

Для елементарної зміни  $ds$  можна вважати  $T = \text{const}$ . Елементарна теплота на  $T$ - $s$  діаграмі зображується площею прямокутника з основою  $ds$  і висотою  $T$ . Площа, обмежена кривою 1-2 та віссю абсцис, характеризує підведену або відведену теплоту: підведення теплоти – процес 1-a-2; відведення теплоти – процес 2-b-1.

Різниця між підведеною і відведеною теплою еквівалентна площі циклу 1-a-2-b-1.

Для замкнених процесів  $\oint dq \neq 0$ ;  $\oint dS = 0$ . Елементарна питома теплота з формули (1.22) та (1.25)

$$dq = T ds = C dT . \quad (1.27)$$

Звідси істинна теплоємність визначається як

$$C = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right), \quad (1.28)$$

а також теплоємності конкретних процесів:

– ізохорного

$$C_v = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v, \quad (1.29)$$

– ізобарного

$$C_p = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p . \quad (1.30)$$



## 2 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ. ЗАМКНЕНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ І ЦИКЛИ. ЦИКЛ КАРНО

### 2.1 Перший закон термодинаміки

Зако́ни термодинаміки – це зако́ни перетворення енергії для ТДС. Енергобаланс між ТДС і зовнішнім середовищем має вигляд

$$du = \sum_1^n \Pi_k dx_k, \quad (2.1)$$

де  $\Pi_k$  – потенціал певної взаємодії;

$x_k$  – координата взаємодії;

$n$  – кількість способів взаємодії (кількість степенів свободи) системи.

Рівняння (2.1) – це закон збереження та перетворення енергії для ТДС, який називається **першим законом термодинаміки** (*first law of thermodynamics*). Його можна сформулювати так: зміна внутрішньої енергії ТДС дорівнює алгебраїчній сумі зовнішніх дій (енергообміну).

Для простих ТДС рівняння (2.1) можна записати

$$du = dq + dl, \quad (2.2)$$

де  $dq$  – теплообмін;

$dl$  – будь-яка робота.

Для закритої ТДС рівняння (2.1) приймає вигляд

$$du = dq + dl_v. \quad (2.3)$$

Для проточних (відкритих) ТДС

$$du = dq + dl_p. \quad (2.4)$$

Враховуючи знаки роботи і теплоти, закон збереження енергії для ідеальних газів має вигляд

$$\left. \begin{aligned} dq &= du + dl_v = CdT = C_v dT + PdV \\ dq &= dh + dl_p = CdT = C_p dT - v dP \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

## 2.2 Другий закон термодинаміки

**Другий закон термодинаміки** (*second law of thermodynamics*) по суті сформульований у вигляді принципу необоротності: всі процеси в природі необоротні.

В оборотних процесах і циклах зміна ентропії  $ds = 0$ , а всі необоротні процеси відбуваються зі збільшенням ентропії ( $ds > 0$ ).

Суть другого закону термодинаміки складається з двох принципів:

- 1) принципу існування ентропії;
- 2) принципу зростання ентропії.

За першим принципом: знищення ентропії неможливо, а її зміна в оборотних процесах дорівнює нулю. За другим принципом – “вироблена” в необоротних процесах ентропія завжди додатна.

У разі підведення теплоти ентропія системи зростає на величину

$$ds = \frac{dq}{T}. \quad (2.6)$$

З формули (2.6) видно, що для однакової кількості теплоти значення ентропії буде тим більшим, чим нижча абсолютна температура. Ентропію можна розглядати як показник якості енергії.

Враховуючи вираз (2.6), загальний вираз першого закону термодинаміки (замість виразу 2.1) можна записати

$$du \leq Tds + dl + \sum_{k=1}^i \Pi_k dx_k, \quad (2.7)$$

де  $i$  – кількість взаємодій немеханічного походження.

457358

Для простих ТДС  $i = 0$ . Тому для закритих і відкритих ТДС з ідеальними газами рівняння (2.7) приймає вигляд

$$\left. \begin{aligned} Tds &\geq du + dl_v = C_v dT + Pdv \text{ (закритих)} \\ Tds &\geq dh + dl_p = C_p dT - vdP \text{ (відкритих)} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) називають **основними** або **узагальненими рівняннями термодинаміки** (*generalized equations of thermodynamics*).

У співвідношеннях (2.7) та (2.8) знак рівності стосується оборотних процесів, а знак нерівності – необоротних.

Зростання ентропії в реальних процесах характеризує міру необоротності або міру втрати роботоспроможності  $\Delta l = T \cdot \Delta s$ .

### 2.3 Перший та другий закони термодинаміки для замкнених процесів

Замкнені або кругові процеси характерні для теплових машин, де робоче тіло здійснює певний цикл, повертаючись в початковий стан.

Зобразимо довільний цикл, який складається з чотирьох послідовних процесів на P-v і T-s діаграмах (рис. 2.1 та 2.2)

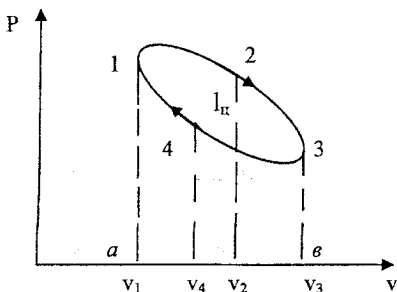


Рисунок 2.1 - Цикл на P-v діаграмі

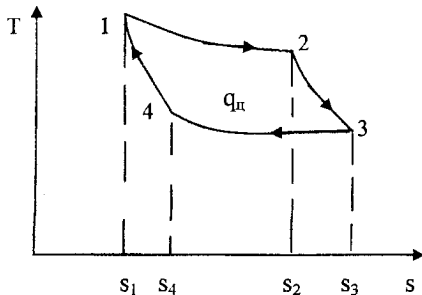


Рисунок 2.2 - Цикл на T-s діаграмі

Із рисунків 2.1 та 2.2 видно, що в процесах 1-2 та 2-3 до робочого тіла підводиться теплота ( $ds > 0$ ) і здійснюється робота розширення ( $dv > 0$ ). В процесах 3-4 і 4-1 теплота відводиться ( $ds < 0$ ) і здійснюється робота стиску ( $dv < 0$ ).

Запишемо перший закон термодинаміки для циклу

$$\left. \begin{aligned} \oint dq &= \oint du + \oint dl_v \\ \oint dq &= \oint dh + \oint dl_p \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Але, для замкнених процесів, як видно з (1.5) та (1.11)  $\oint du = 0$  та  $\oint dh = 0$ . В кругових процесах величина сумарної роботи дорівнює сумарній теплоті, яка підводиться і відводиться від робочого тіла.

Тобто

$$\oint dq = \oint dl. \quad (2.10)$$

Сумарна робота і сумарна теплота циклу складатимуть, відповідно

$$\begin{aligned} q_{\text{ц}} &= (\sum q_{\text{доп}} - \sum q_{\text{від}}) = (q_{1-2} + q_{2-3}) - (q_{3-4} + q_{4-1}) > 0, \\ l_{\text{ц}} &= (\sum l_{\text{доп}} - \sum l_{\text{від}}) = (l_{1-2} + l_{2-3}) - (l_{3-4} + l_{4-1}) > 0. \end{aligned}$$

В прямих циклах додатні теплота і робота більші, ніж від'ємні.

Позначивши додатну підведену теплоту  $q_1$ , а від'ємну відведену теплоту  $q_2$ , одержимо вираз теплоти циклу

$$q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}} = q_1 - q_2, \quad (2.11)$$

де  $l_{\text{ц}}$  – корисна робота, яка виконується в циклі.

В прямих циклах на корисну роботу перетворюється лише певна частина підведеної теплоти.

Ефективність перетворення теплоти на роботу оцінюється **термічним коефіцієнтом корисної дії (ККД) (*thermal efficiency*)**, який являє собою відношення корисної роботи  $l_{\text{ц}}$  до підведеної із зовні теплоти

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (2.12)$$

Розглянутий цикл можна здійснювати в зворотному напрямку. Тоді робота і теплота в процесах 1-4 і 4-3 будуть додатними, а в процесах 3-2 і 2-1 – від’ємними.

Тоді

$$q_1 = (q_{1-4} + q_{4-3}) < q_2 = (q_{3-2} + q_{2-1}).$$

Отже,

$$q_{ц} = (q_1 - q_2) < 0,$$

в зворотних циклах теплота і робота циклу від’ємні.

Для здійснення зворотного циклу (перенесення теплоти від менш нагрітих тіл до більш нагрітих) необхідно витратити роботу із зовнішнього середовища. Цикли, в яких теплота передається від менш нагрітих до більш нагрітих тіл, називаються **холодильними** (*refrigerator*).

Ефективність холодильних циклів оцінюється холодильним коефіцієнтом

$$\varepsilon = \frac{q_1}{l_{ц}} = \frac{q_1}{(q_1 - q_2)} \quad (2.13)$$

## 2.4 Цикл Карно

Проаналізуємо цикл Карно (*Carnot cycle*) за допомогою T-s діаграми (рис. 2.3). Є два джерела теплоти: “холодне” з температурою  $T_2$  і “гаряче” з температурою  $T_1$ . Оборотний цикл Карно складається з двох ізотерм 1-2 і 3-4 і двох адіабат 2-3 і 4-1. Адіабатний – це процес без теплообміну:  $dq = 0$ ;  $T \neq 0$ ; отже,  $ds = 0$ ,  $s = \text{const}$ .

Процес 1-2 — ізотермічне підведення теплоти  $q_1$ . Процес 3-4 — ізотермічне відведення теплоти  $q_2$ . Процес 2-3 — адиабатне розширення (температура від  $T_1$  зменшується до  $T_2$ ). Процес 4-1 — адиабатний стиск (температура від  $T_2$  зростає до  $T_1$ ).

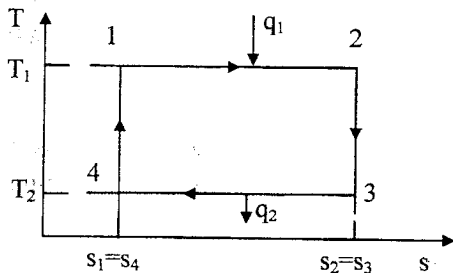


Рисунок 2.3 – Цикл Карно

Термічний ККД циклу Карно

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{T_2 \cdot |\Delta s_{3-4}|}{(T_1 \cdot |\Delta s_{1-2}|)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.14)$$

Із рівняння (2.14) витікає:

- 1) термічний ККД циклу Карно не може дорівнювати одиниці, оскільки  $T_1 \neq \infty$  або  $T_2 \neq 0$ .
- 2) ефективність циклу Карно залежить тільки від температур гарячого і холодного джерела і не залежить від властивостей робочого тіла — це **теорема Карно** (*Carnot theorem*).

Із рівняння (2.14) випливає, що

$$\frac{|q_2|}{|q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.15)$$

Із рівняння (2.15) видно, що температура тіла змінюється пропорційно підведенню теплоти. Термічний ККД циклу Карно є найбільшим з усіх можливих, оскільки цикл Карно складений з найдосконаліших оборотних процесів.

Для зворотного циклу Карно холодильний коефіцієнт визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{q_1}{(|q_2| - q_1)} = \frac{T_2}{(T_1 - T_2)} \quad (2.16)$$

## 2 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Ідеальні гази – це гази, в яких теплоємності сталі (це справедливо лише для одноатомних газів). Теплоємність інших газів  $C = f(T)$ ,  $C \neq f(P, v)$ .

Зв'язок між ізобарною та ізохорною теплоємностями визначається за співвідношеннями:

– з рівняння Майєра

$$C_p = C_v + R, \quad (3.1)$$

або

$$\frac{C_p}{C_v} = k, \quad (3.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт Пуассона або показник адіабати,  $k > 1$ .

Для одноатомних газів  $k = 1,66$ ; для двоатомних газів  $k = 1,4$ ; для трьохатомних газів  $k = 1,33$ ; для чотирьохатомних газів та більше  $k = 1,29$ .

Із цих рівнянь можна визначити теплоємності газів:

$$\text{ізохорну } C_v = \frac{R}{k-1} \text{ та ізобарну } C_p = k \cdot C_v = \frac{k \cdot R}{k-1}.$$

### 3.1 Політропний процес

Політропним (*polytropic*) називається такий процес, в якому теплоємність може приймати довільне, але стале в процесі значення.

Рівняння процесу визначаються з рівнянь першого закону термодинаміки (2.5)

$$\left. \begin{aligned} C_n dT &= C_p dT - v dP \\ C_n dT &= C_v dT - P dv \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Звідси

$$n = \frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} = -\frac{vdP}{Pdv} = \frac{dl_p}{dl_v}, \quad (3.4)$$

(ліву частину позначимо  $n$ , оскільки  $C = \text{const}$ ).

Сталу  $n$  називають **показником політропи** (*coefficient of polytrope*), що характеризує співвідношення робіт зміни тиску і зміни об'єму.

Теплоємність політропного процесу

$$C_n = C_v \frac{n - k}{n - 1}. \quad (3.5)$$

Проінтегрувавши (3.4) одержимо:

$$P \cdot v^n = \text{const} \quad \text{або} \quad P^{1/n} \cdot v = \text{const}. \quad (3.6)$$

Формули (3.6) – це рівняння політропного процесу.

З урахуванням рівняння стану, співвідношення між параметрами в процесі 1-2

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (3.7)$$

Питома теплота процесу

$$q_{1-2} = \int_1^2 C dT = C_n (T_2 - T_1) = C_v \frac{n - k}{n - 1} (T_2 - T_1). \quad (3.8)$$

Зміна питомих внутрішньої енергії та ентальпії

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1); \quad \Delta h = C_p (T_2 - T_1). \quad (3.9)$$

Питома робота зміни об'єму



$$l_v = q - \Delta u = C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) - C_v (T_2 - T_1) = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (3.10)$$

Питома робота зміни тиску

$$l_p = n \cdot l_v = \frac{n \cdot R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{n}{n-1} P_1 \cdot v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (3.11)$$

Питома зміна ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_v \frac{n-k}{n-1} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (3.12)$$

Зображення політропного процесу в T-s та P-v координатах показано на рис. 3.1 та 3.2.

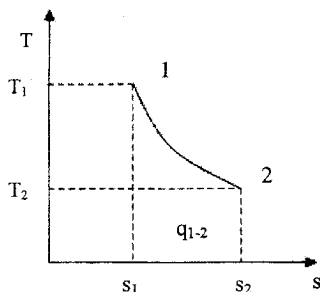


Рисунок 3.1 – Політропний процес в T-s координатах

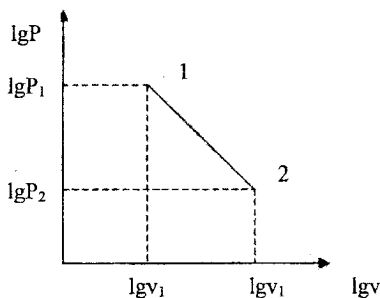


Рисунок 3.2 – Політропний процес в P-v координатах

Позначивши

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q} = \frac{n-1}{n-k} \quad \text{та} \quad \psi = 1 - \varphi = \frac{k-1}{k-n}, \quad (3.13)$$

де  $\varphi$  – частка теплоти, що витрачена на зміну внутрішньої енергії;  
 $\psi$  – частка теплоти, що витрачена на здійснення роботи;  
отримаємо

$$\Delta u = \varphi \cdot q; \quad l_v = \psi \cdot q \quad l_p = n \cdot l_v = n \cdot \psi \cdot q. \quad (3.14)$$

Оскільки показник політропи може приймати довільне значення, то політропний процес – це узагальнений процес, що має окремі випадки.

### 3.2 Ізохорний процес

В ізохорному процесі  $n = \pm\infty$ ;  $v = \text{const}$ ;  $dv = 0$ .

Рівняння процесу

$$v = \frac{R \cdot T}{P} = \text{const}; \quad \frac{T}{P} = \text{const}.$$

або за законом Шарля

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.15)$$

Якщо  $dv = 0$ , то  $Pdv = 0$  і робота зміни об'єму не здійснюється:  $l_v = 0$ .

Питома теплота процесу

$$q_{1-2} = \Delta u = C_v(T_2 - T_1). \quad (3.16)$$

В ізохорному процесі вся теплота витрачається на зміну внутрішньої енергії, тому  $\varphi = 1$ ;  $\psi = 0$ .

Питома робота зміни тиску

$$l_p = \int_1^2 -v dP = -v(P_2 - P_1). \quad (3.17)$$

Якщо значення роботи від'ємне, то це означає, що робота підведена ззовні.

Питома зміна ентальпії

$$\Delta h = C_p(T_2 - T_1) = \Delta u + v(P_2 - P_1) = \Delta u + (-l_p). \quad (3.18)$$

Питома зміна ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right). \quad (3.19)$$

Зображення ізохорного процесу в P-v та T-s координатах показано на рис. 3.3 та 3.4.

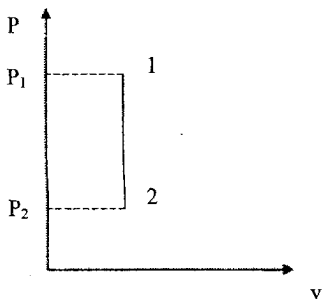


Рисунок 3.3 – Ізохорний процес в P-v координатах

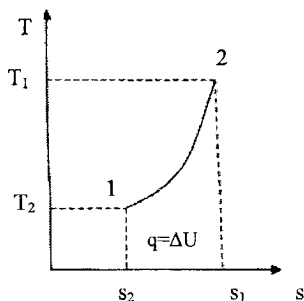


Рисунок 3.4 – Ізохорний процес в T-s координатах

### 3.3 Ізобарний процес

В ізобарному процесі  $n = 0$ ;  $P = \text{const}$ ;  $dP = 0$ ;  $l_p = 0$ .

Рівняння процесу описується законом Гей-Люссака

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (3.20)$$

Питома теплота процесу

$$q_{1-2} = \Delta h = \int_1^2 C_p dT = C_p (T_2 - T_1) = h_2 - h_1 . \quad (3.21)$$

В ізобарному процесі робота зміни тиску не здійснюється

$$dl_p = -vdP = 0 .$$

Питома робота зміни об'єму

$$l_v = \int_1^2 Pdv = P(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) . \quad (3.22)$$

Питома зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) . \quad (3.23)$$

Питома зміна ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) . \quad (3.24)$$

В ізобарному процесі

$$\varphi = \frac{1}{k}; \quad \psi = \frac{k-1}{k} \quad (3.25)$$

Зображення ізобарного процесу в P-v та T-s координатах показано на рис. 3.5 та 3.6.

Оскільки  $C_p > C_v$ , то для однакової зміни температури ізобара 1-2 розташована нижче ізохори 1-2а на T-s діаграмі (рис. 3.6).

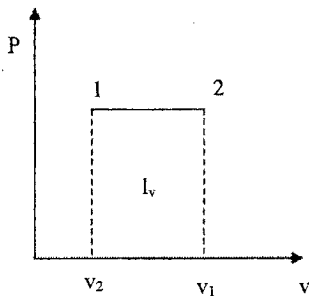


Рисунок 3.5 – Ізобарний процес в P-v координатах

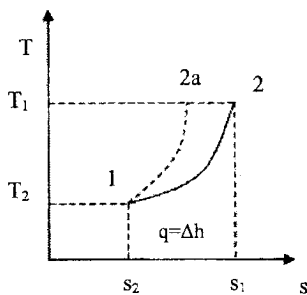


Рисунок 3.6 – Ізобарний процес в T-s координатах

### 3.4 Ізотермічний процес

В *ізотермічному (isothermal)* процесі  $n = 1$ ;  $T = \text{const}$ ;  $dT = 0$ ;  $Pv = RT = \text{const}$ . Рівняння процесу  $Pv = \text{const}$  або для процесу 1-2 визначається із закону Бойля-Маріотта

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.26)$$

Зміна питомих внутрішньої енергії та ентальпії

$$\Delta u = C_v \cdot \Delta T = 0; \quad \Delta h = C_p \cdot \Delta T = 0. \quad (3.27)$$

З першого закону термодинаміки, в ізотермічному процесі теплота витрачається на виконання роботи

$$dq = dl_v = dl_p. \quad (3.28)$$

Питома теплота процесу

$$q = l_p = l_v = \int_1^2 P dv = \int_1^2 P v \frac{dv}{v} = P v \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = RT \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \quad (3.29)$$

або

$$q = l_p = -\int_1^2 v dP = -\int_1^2 v P \frac{dP}{P} = P v \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = RT \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right). \quad (3.30)$$

З урахуванням (3.29) та (3.30) можна записати значення питомої теплоти процесу

$$q = RT \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = RT \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = T \cdot (s_2 - s_1). \quad (3.31)$$

Зміна питомої ентропії в процесі

$$\Delta s = \frac{q}{T} = R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right). \quad (3.32)$$

Зображення ізотермічного процесу в P-v та T-s координатах показано на рис. 3.7 та 3.8.

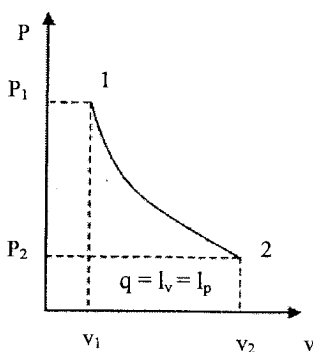


Рисунок 3.7 – Ізотермічний процес в P-v координатах

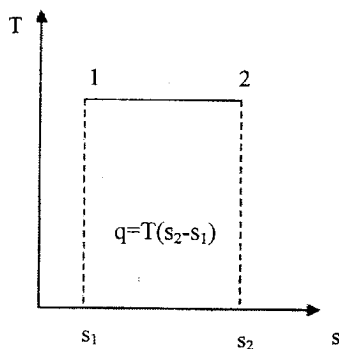


Рисунок 3.8 – Ізотермічний процес в T-s координатах

В ізотермічному процесі

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q} = 0; \quad \psi = 1 - \varphi = 1. \quad (3.33)$$

### 3.5 Адіабатний процес

**Адіабатний** (*adiabatic*) процес відбувається в теплоізолюваній системі, в якій  $dq = Tds = 0$ . Оскільки  $T \neq 0$ ,  $ds = 0$ ;  $s = \text{const}$  (процес відбувається ізентропійно). Умова  $s = \text{const}$  виконується тільки в адіабатних оборотних процесах. Процес відбувається при  $n = k$ , тоді  $C_n = 0$  за (3.4).

Рівняння процесу

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.34)$$

Якщо  $dq = 0$ , то з рівняння першого закону термодинаміки отримаємо

$$\begin{aligned} dl_v &= -du = -C_v \cdot dT \\ dl_p &= -dh = -C_p \cdot dT \end{aligned} \quad (3.35)$$

Питома робота зміни об'єму

$$l_v = -\Delta u = -\int_1^2 C_v dT = C_v \cdot (T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2). \quad (3.36)$$

Питома робота зміни тиску

$$l_p = k \cdot l_v = \frac{k \cdot R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2). \quad (3.37)$$

Питома робота зміни тиску в адіабатному процесі

$$l_p^{ad} = -\Delta h = h_1 - h_2 = C_p \cdot (T_1 - T_2) . \quad (3.38)$$

Зображення адіабатного процесу в P-v та T-s координатах показано на рис. 3.9 та 3.10.

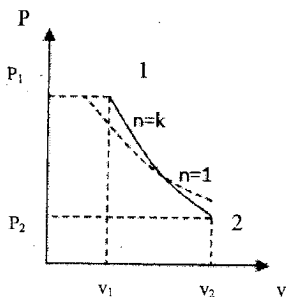


Рисунок 3.9 – Адіабатний процес в P-v координатах

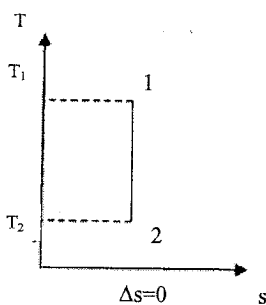


Рисунок 3.10 – Адіабатний процес в T-s координатах

На P-v діаграмі (рис. 3.9) адіабата  $n = k$  проходить крутіше ізотерми  $n = 1$ , оскільки  $k > 1$ . Для оборотних адіабатних процесів  $\Delta s = 0$ , для необоротних адіабатних процесів  $\Delta s > 0$ . За умови  $n = k$  значення  $\varphi = \infty$ ,  $\psi = -\infty$ .



## 4 ВОДЯНА ПАРА. ПРОЦЕСИ ПАРОУТВОРЕННЯ

Речовина, в залежності від тиску і температури, може існувати в трьох агрегатних станах : твердому, рідкому та газоподібному.

Різні форми існування речовини, які відділені одна від одної поверхнею поділу, називаються **фазами** (*phases*). Речовина також може бути одночасно в двох або трьох станах. Стан, в якому знаходиться в рівновазі тверда, рідка і парова фаза називається потрійною точкою. Перехід речовини з однієї фази в іншу називається фазовим переходом або фазовим перетворенням. Фазовий перехід з твердого стану в рідкий називається плавленням, (зворотний – називається твердінням). Фазовий перехід з твердого в газоподібний стан називається сублімацією, зворотний – десублімацією. Фазовий перехід з рідкого стану в газоподібний називається пароутворенням, зворотний – конденсацією.

Термодинамічні діаграми (P-v, T-s) для реального газу, на відміну від ідеального газу, називаються **фазовими діаграмами** (*phase diagrams*). Процес кипіння починається, коли рідина досягає певної температури, яка називається **температурою кипіння** або **насичення** (*temperature of saturation*). При кипінні  $T_n = \text{const}$ , оскільки вся теплота, що підводиться, витрачається на випаровування рідини. Тиск, який відповідає температурі насичення, називається **тиском насичення** (*pressure of saturation*).

Двофазна система, яка складається із сухої насиченої пари та рідини, називається **вологою насиченою парою** (*humid saturated steam*). Якщо існує тільки парова фаза, така пара називається **сухою насиченою парою** (*dry saturated steam*). Під час ізобарного підведення теплоти до сухої насиченої пари температура пари перевищує температуру насичення  $T > T_n$  і така пара називається **перегрітою** (*superheating*). Фазові переходи здійснюються з виділенням або поглинанням теплоти, яка називається **теплотою фазових перетворень** (*heat of phase transformations*).

Робочим тілом в багатьох теплосилових установках є пара різних речовин. В техніці для здобування пари використовують процес випаровування, який складається з таких ізобарних процесів: підігрівання рідини до температури кипіння (насичення); пароутворення; перегрів пари.

Індексом «'» будемо позначати величини, які відносяться до рідкої фази. Індексом «"» позначаються величини, які відносяться до сухої насиченої пари. Індексом «n» – величини, які відносять до перегрітої пари.

1.1. Теплота фазового переходу або теплота пароутворення

$$r = T_n(s'' - s') = h'' - h' = (u'' - u') + P_1(v'' - v'). \quad (4.1)$$

Для обчислення параметрів вологої пари необхідно визначити масові частки рідини і пари в суміші. Маса суміші (вологої пари)  $m_x$  складається із маси рідини  $m'$  і маси сухої насиченої пари  $m''$ .

Відношення

$$\frac{m''}{m_x} = \frac{m''}{m' + m''} = x \quad (4.2)$$

називається **мірою сухості пари** і характеризує частку, яку складає маса сухої насиченої пари в суміші. Зрозуміло, що для киплячої рідини  $x = 0$ , а для сухої насиченої пари  $x = 1$ .

Параметри вологої пари адитивно складаються з параметрів рідини і сухої насиченої пари

$$\begin{aligned} v_x &= v'(1-x) + v''x = v' + x(v'' - v'), \\ u_x &= u' + x(u'' - u'), \\ h_x &= h' + x(h'' - h') = h' + rx, \\ s_x &= s' + x(s'' - s') = s' + \left(\frac{r}{T_n}\right)x. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Теплота, що витрачається на перегрів пари

$$q_n = \bar{C}_{pn}(T_n - T_n) = h_n - h'', \quad (4.4)$$

де  $\bar{C}_{pn}$  – середня ізобарна теплоємність пари в процесі.

Зміна ентропії в процесі перегріву пари

$$\Delta s_n = s_n - s'' = \bar{C}_{pn} \ln\left(\frac{T_n}{T_n}\right). \quad (4.5)$$

Внутрішню енергію перегрітої пари можна обчислити за формулою

$$u_n = u'' + q_n - P_1(v_n - v''). \quad (4.6)$$

# 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### ТАРУВАННЯ НЕПРОТОЧНОГО КАЛОРИМЕТРА

**Мета:** визначити теплові втрати і сталу непроточного калориметра.

Схема непроточного калориметра показана на рис. 5.1. Він складається з двох посудин. У внутрішню посудину 1 залита рідина з відомою теплосмністю  $C_p$  і масою  $m_p$ . В ній розташовані електронагрівник 2 і електромішалка 3. У зовнішню посудину 4 залита вода, маса якої  $m_v$  значно більша, ніж маса рідини. Ця посудина відіграє роль своєрідного теплового ізолятора, який призначений для зменшення теплових втрат у навколишнє середовище. При вмиканні нагрівника 2 більша частина теплоти витрачається на нагрів рідини, а менша – на нагрів матеріалу калориметра і втрати в навколишнє середовище.

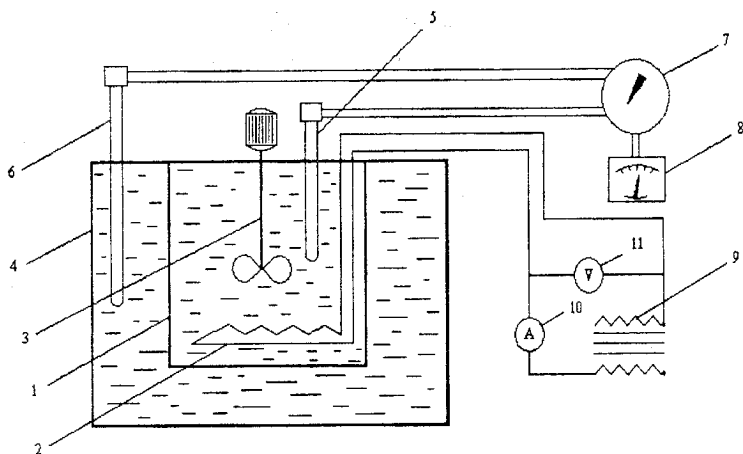


Рисунок 5.1 – Схема непроточного калориметра

Температури рідини і води в посудинах вимірюються термометрами опору 5 і 6, які за допомогою перемикача 7 з'єднані з логометром 8. Поту-

жність нагрівника регулюється трансформатором 9 і контролюється електроприладами 10 і 11.

Експерименти проводять в такій послідовності. До вмикання електронагрівника вимірюються температури рідин в калориметрі, які мають бути однаковими і дорівнювати температурі навколишнього середовища  $t_{nc}$  (точка А на рис. 5.2). Після цього вмикають електронагрівник і за допомогою трансформатора 9 встановлюють і підтримують задану сталу потужність  $N_{ен}$ . Значення температур рідин в процесі нагрівання через рівні проміжки часу записують в журнал спостережень (табл. 5.1).

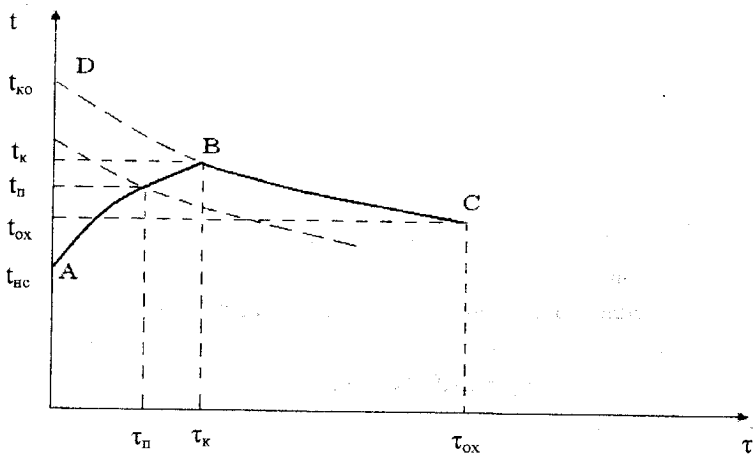


Рисунок 5.2 – Графіки зміни температури рідини в калориметрі

Таблиця 5.1 – Журнал спостережень

| Номер досліджу | Величина вимірювань |                 |                 |        |        |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
|                | $\tau, c$           | $t_p, ^\circ C$ | $t_b, ^\circ C$ | $I, A$ | $U, B$ |
| Нагрівання     |                     |                 |                 |        |        |
| 1              |                     |                 |                 |        |        |
| 2              |                     |                 |                 |        |        |
| 3              |                     |                 |                 |        |        |
| Охолодження    |                     |                 |                 |        |        |
| 1              |                     |                 |                 |        |        |
| 2              |                     |                 |                 |        |        |
| 3              |                     |                 |                 |        |        |

Після досягнення заданої кінцевої температури рідини  $t_k$  електронагрівник вимикається і починається процес охолодження калориметра. Зменшення температури рідини в калориметрі через рівні проміжки часу також записують в журнал спостережень до певного її кінцевого значення  $t_{ох}$ .

За даними спостережень будують графіки зміни температур рідини при нагріванні та охолодженні (рис. 5.2). Якщо б тепло підводилося миттєво, то калориметр не мав би теплових втрат, а температура рідини в калориметрі дорівнювала  $t_{ко}$ , тобто процес нагрівання відбувався б по лінії AD з подальшим охолодженням рідини по лінії DC. Положення точки D і значення температури  $t_{ко}$  визначають за допомогою екстраполяції кривої BC до значення при  $\tau = 0$ , або за формулою:

$$t_{ко} - t_{нс} = \exp(k \cdot \tau_k), \quad (5.1)$$

де сталу  $k$  визначають з цього ж рівняння для будь-якої точки на кривій BC з відомою температурою.

Ясно, що теплові втрати калориметра будуть складати, кДж

$$Q_{вт} = m_p C_p (t_{ко} - t_k) \quad (5.2)$$

Теплота, яка витрачена на підігрівання рідини і води в калориметрі, відповідно, кДж

$$Q_p = m_p C_p (t_k - t_{нс}); \quad (5.3)$$

$$Q_v = m_v C_v (t_{вк} - t_{нс}).$$

де  $t_{вк}$  – кінцева температура води.

Теплота електронагрівника за час  $\tau_k$ , кДж

$$Q_{ен} = N_{ен} \cdot \tau_k = I \cdot U \cdot \tau_k \cdot 10^{-3} \quad (5.4)$$

Стала калориметра, що характеризує витрату теплоти на його нагрівання на один градус,  $\frac{\text{кДж}}{\text{К}}$

$$A = \frac{Q_{\text{сн}} - Q_p - Q_v - Q_{\text{вт}}}{t_k - t_{\text{нс}}} \quad (5.5)$$

Аналогічно до викладеного виконують три-чотири обчислення для проміжних температур рідини  $t_{\text{п}}$  (див. рис. 5.2) і будують залежності  $Q_{\text{вт}} = f(t_p)$ ,  $A = f_1(t_p)$ .

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення калориметрів?
2. Для чого здійснюють тарування калориметрів?
3. Яка природа теплових втрат в калориметрі?
4. Що являє собою стала калориметра?
5. Що розуміють під теплоємністю речовини?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ІЗОБАРНОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОВІТРЯ

**Мета:** скласти методику експерименту і визначити ізобарну теплоємність повітря.

Для визначення теплосмності повітря використовують проточний калориметр 3 (рис. 5.3). Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище калориметр ретельно теплоізолюваний.

Усередині калориметра розташований електронагрівник 1, за допомогою якого здійснюється підведення теплоти до потоку повітря. Потужність нагрівника регулюється трансформатором 4 і контролюється електроприладами 5 і 6. Витрата повітря через калориметр забезпечується вентилятором 9. Температури повітря на вході в калориметр і на виході з нього вимірюються за допомогою термопар 10 і 11, які підключені до потенціометра 2.

Витрата повітря вимірюється за допомогою діафрагми 8, яка створює перепад  $\Delta h$  у дифманометрі 7.

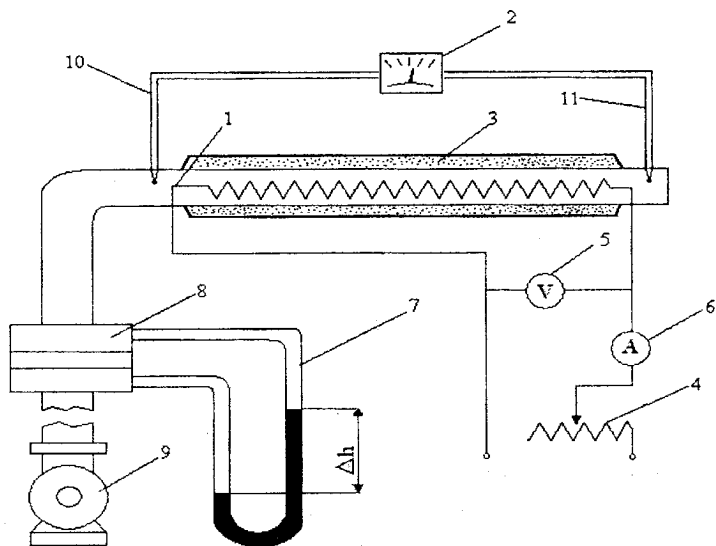


Рисунок 5.3 – Схема проточного калориметра

Об'ємна витрата повітря обчислюється за формулою,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ :

$$V = 0,0135 \cdot \alpha \cdot d^2 (\Delta h \cdot v_d)^{0,5}, \quad (5.6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати діафрагми;

$d$  – діаметр діафрагми, мм;

$\Delta h$  – перепад тиску на діафрагмі, мм вод. ст.;

$v_d$  – питомий об'єм повітря за умовами досліду, який дорівнює,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$v_d = 0,7734 \cdot \frac{760 \cdot T_d}{293 \cdot B}, \quad (5.7)$$

де  $V$  – барометричний тиск, мм рт. ст.;

$T_d$  – абсолютна температура повітря на вході в калориметр, К.

Досліди виконують таким чином. Вмикають вентилятор і встановлюють за допомогою трансформатора вказану викладачем потужність електронагрівника. Показання всіх приладів записують в журнал спостережень (табл. 5.2) лише після досягнення усталеного режиму, який визначається при незмінних показаннях термопар 11. Експерименти проводяться при різних потужностях електронагрівника і різних витратах повітря.

За методикою обробки результатів, розробленою в процесі домашньої підготовки, визначають об'ємну, масову і мольну теплоємність повітря і будують графіки їх залежності від температури. Дослідні дані порівнюють з табличними значеннями теплоємностей і визначають похибку експерименту.

Таблиця 5.2 - Журнал спостережень

| Но-<br>мер<br>дос-<br>ліду | Показання<br>електро-<br>приладів |      | Перепад<br>тиску $\Delta h$ ,<br>мм вод. ст. | Баромет-<br>ричний<br>тиск $V$ ,<br>мм рт. ст. | Показання<br>термопар, °С |                | Різниця<br>темпера-<br>тур<br>$\Delta t$ , °С |
|----------------------------|-----------------------------------|------|--|--|---------------------------|----------------|---|
|                            | I, A                              | U, B |  |  | на<br>вході               | на ви-<br>ході |   |
| 1                          |                                   |      |  |  |                           |                |   |
| 2                          |                                   |      |  |  |                           |                |   |
| 3                          |                                   |      |  |  |                           |                |   |
| 4                          |                                   |      |  |  |                           |                |   |
| 5                          |                                   |      |  |  |                           |                |   |

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

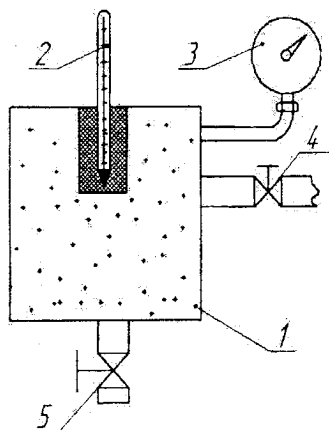
1. Що розуміють під істинною і середньою теплоємностями?
2. Які співвідношення між масовою, об'ємною і мольною теплоємностями?
3. Як відрізняються ізобарна та ізохорна теплоємності?
4. Як теплоємність тіл залежить від температури?
5. Як визначити теплоємність політропного процесу?
6. Яка різниця між ізохорною і об'ємною теплоємностями?
7. В яких випадках політропна теплоємність може бути від'ємною?



## ВИЗНАЧЕННЯ ГАЗОВОЇ СТАЛОЇ ПОВІТРЯ

**Мета:** скласти методику експерименту і визначити газову сталу повітря.

Експериментальна установка складається із циліндричної посудини 1 (рис. 5.4), об'єм якої  $V$  визначений попереднім таруванням. В установку може надходити холодне і підігріте повітря від компресора. Температура і тиск повітря вимірюються термометром 2 і манометром 3.



Перед початком досліду закривають випускний вентиль 5. Відкривають впускний вентиль 4 і очікують, доки тиск повітря в посудині не зросте до заданого викладачем значення. Після цього вентиль 4 закривають і записують в журнал спостережень (табл. 5.3) показання термометра і манометра.

Зауважимо, що термометр більш інерційний прилад, ніж манометр. Тому показання термометра треба записувати через певний проміжок часу після встановлення певного тиску в посудині. Виконують кілька дослідів при різних тисках повітря.

Рисунок 5.4 – Схема установки

Таблиця 5.3 – Журнал спостережень

| Номер дослідів | Об'єм посудини $V$ , м <sup>3</sup> | Тиск $P$ , кгс/см <sup>2</sup> | Температура $T$ , К | Питомий об'єм $v$ , м <sup>3</sup> /кг | Газова стала $R$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ |
|----------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--|--|
| 1              |                                     |                                |                     |  |  |
| 2              |                                     |                                |                     |  |  |
| 3              |                                     |                                |                     |  |  |
| 4              |                                     |                                |                     |  |  |
| 5              |                                     |                                |                     |  |  |

Питомий об'єм повітря в посудині визначають за (5.7), після чого обчислюють газову сталу.

Середнє значення газової сталої в досліді порівнюють із значенням  $R$ , обчисленим за формулою Клапейрона, і визначають похибку.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як записується рівняння стану ідеального газу?
2. За яких умов термодинамічні властивості реальних газів наближаються до властивостей ідеальних газів?
3. Що характеризує газова стала?
4. Чому дорівнює універсальна газова стала?
5. Як визначити теплоємності за допомогою газової сталої?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ЕНТРОПІЇ В ПРОЦЕСІ ТЕПЛООБМІНУ

**Мета:** дослідити закономірності зміни ентропії в процесі теплообміну.

Експериментальна установка являє собою тонкостінну металеву посудину 1 (рис. 5.5), яка містить рідину масою  $m_p$  з теплоємністю  $C_p$ . Вона обладнана електронагрівником 2 і лабораторним термометром 3. Дослід проводять таким чином. Вмикають електронагрівник і нагрівають рідину до заданої температури  $T_b$ , яка є вхідною для дослідів. Після цього електронагрівник вимикають і починають фіксувати поточні значення температур рідини  $T_p(\tau)$  через певні проміжки часу. Зауважимо, що на першому етапі охолодження рідини її температура змінюється більш інтенсивно, оскільки різниця температур між рідиною і навколишнім середовищем  $\Delta T = T_p(\tau) - T_0$  має більші значення (рис. 5.6). Відповідно до цього в навколишнє середовище передається більша кількість теплоти, що зумовлює більш швидкий темп остигання рідини на початку дослідів. У міру остигання температура рідини асимптотично наближається до температури навколишнього середовища  $T_0$ .

Термічна рівновага досягається за великий період часу ( $\tau \rightarrow \infty$ ). Тому на початковій стадії вимірювань температури рідини  $T_p(\tau)$  інтервал вимірювань має бути значно меншим, ніж на кінцевій. Результати вимірювань заносять в журнал спостережень (табл. 5.4).

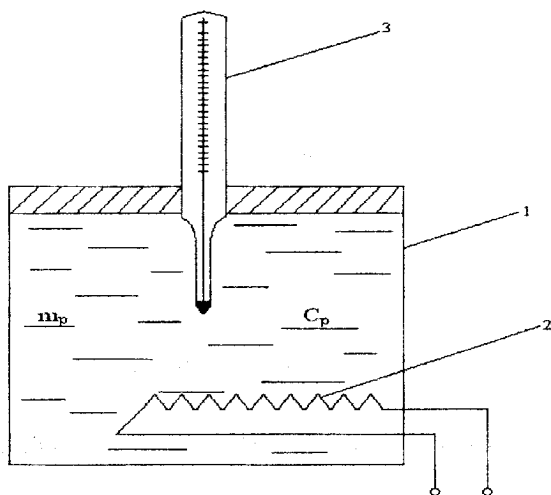


Рисунок 5.5 – Схема експериментальної установки

Таблиця 5.4 – Журнал спостережень

|              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $\tau$ , хв. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T_p$ , К    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Обробка результатів

За даними вимірювань будують температурний графік остигання рідини  $T_p = f(\tau)$  (рис. 5.6). Обчислення змін ентропії рідини і навколишнього середовища здійснюється на підставі узагальненого рівняння термодинаміки

$$TdS = dQ = dU + dL. \quad (5.8)$$

Оскільки в даній системі робота не виконується, то разом з теплою в навколишнє середовище переноситься ентропія, значення якої відповідає зменшенню внутрішньої енергії рідини, тобто

$$dS_p = \frac{dQ_p}{T_p} = -\frac{dU_p}{T_p} = m_p C_p \frac{dT_p}{T_p}. \quad (5.9)$$

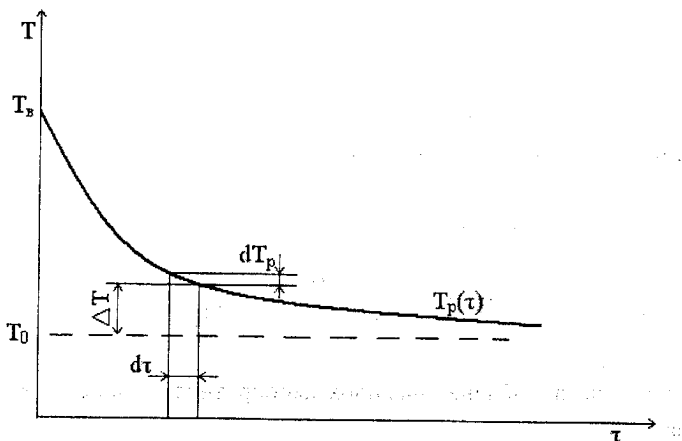


Рисунок 5.6 – Залежність температури рідини від часу

При цьому ентропія навколишнього середовища має зростати на величину

$$dS_0 = \frac{dU_0}{T_0} = \frac{dQ_p}{T_0} = m_p C_p \frac{dT_p}{T_0}. \quad (5.10)$$

Відзначимо, що зміна ентропії навколишнього середовища враховує також перенесення ентропії, виробленої в стінках посудини. Інтегрування (5.9) і (5.10) в межах від  $\tau = 0$  при  $T = T_b$  до  $\tau$  при  $T = T_p(\tau)$  дає:

$$S_p(\tau) = S_p(0) + m_p C_p \ln \left[ \frac{T(\tau)}{T_b} \right], \quad (5.11)$$

$$S_0(\tau) = S_0(0) + m_p C_p \left[ \frac{T_B - T(\tau)}{T_0} \right]. \quad (5.12)$$

Якщо прийняти, що  $S_0(0) = 0$  і  $S_p(\infty) = 0$ , то зрозуміло, що при  $\tau \rightarrow \infty$   
 $T = T_0$  і

$$S_p(0) = m_p C_p \ln \left[ \frac{T_B}{T_0} \right]. \quad (5.13)$$

Ентропія термодинамічної системи, утвореної посудиною з рідиною і навколишнім середовищем, дорівнюватиме:

$$S(\tau) = S_0(\tau) + S_p(\tau) = S_0(0) + S_p(0) + m_p C_p \left\{ \frac{[T_B - T(\tau)]}{T_0} - \ln \left[ \frac{T_B}{T(\tau)} \right] \right\}. \quad (5.14)$$

Ентропія, що вироблена внаслідок необоротності процесу теплообміну, складатиме

$$S_{\text{но}}(\tau) = S(\tau) - S_0(\tau) = m_p C_p \left\{ \frac{[T_B - T(\tau)]}{T_0} - \ln \left[ \frac{T_B}{T(\tau)} \right] \right\}. \quad (5.15)$$

Граничне значення  $S_{\text{но}}(\tau)$  у стані рівноваги визначається за формулою:

$$S_{\text{но}}^{\text{гр}} = m_p C_p \left[ \frac{T_B - T_0}{\ln \left( \frac{T_B}{T_0} \right)} \right]. \quad (5.16)$$

Користуючись дослідною залежністю  $T_p = f(\tau)$ , для кількох (7...8) значень  $\tau$  за формулами (5.11) – (5.16) обчислюють відповідні поточні значення ентропії і будують залежності, які показані на рис. 5.7.

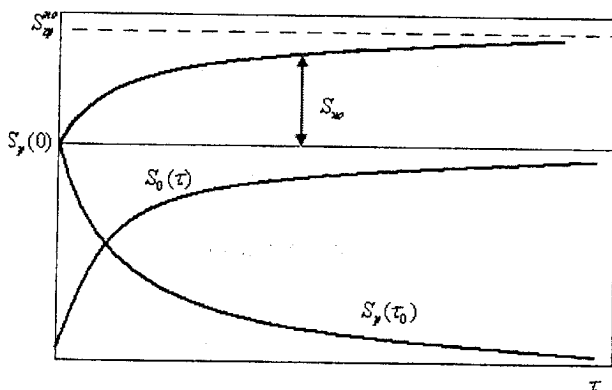


Рисунок 5.7 – Залежності ентропії від часу

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чи є розглянута в роботі термодинамічна система адіабатною?
2. З теорії теплообміну відомо, що теплота, котра передається за час  $dt$ , дорівнює  $dQ = k(T_p - T_0)dt$ . Який вигляд буде мати вираз для ентропії, що виробляється в процесі необоротного теплообміну за час  $dt$ ?
3. Чи можливо зменшення ентропії адіабатної системи?
4. Внаслідок чого виникає вироблення ентропії в процесах теплообміну?
5. Як залежить необоротне зростання ентропії від температур  $T_p$  і  $T_0$ ?

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

#### ІЗОХОРНЕ НАГРІВАННЯ ВОДИ І ВОДЯНОЇ ПАРИ

**Мета:** експериментально визначити залежність температури насичення води від тиску, скласти методику обробки дослідних даних, визначити параметри насиченої пари.

Принципова схема дослідної установки показана на рис. 5.8. Товстостінна посудина 1 з відомим об'єм  $V$ , в яку залита дистильована вода, що обігривається електронагрівником 5. Потужність нагрівника регулюється трансформатором 6. При нагріванні вода у посудині закипає. Температура насичення фіксується термопарою 3 і мілівольтметром 4, а тиск – манометром 2. Посудина добре теплоізолювана шаром ізоляції 7. При ізохорному нагріванні маса суміші (води і водяної пари) залишається сталою.

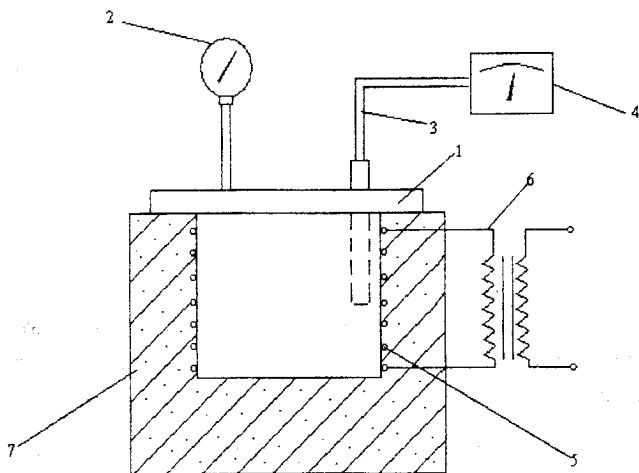


Рисунок 5.8 – Схема експериментальної установки

В ході дослідів доцільно записувати показання приладів при рівноважних станах в посудині, але проведення таких дослідів дуже тривале. Тому зручно здійснювати безперервне, але дуже повільне нагрівання і записувати показання тиску і температури через рівні проміжки підвищення тиску. Результати вимірювань записують в журнал спостережень (табл. 5.5).

Результати вимірювань  $P_H$  і  $T_H$  наносять на завчасно підготовлену діаграму  $P_H = f(T_H)$ , яку будують за табличними даними. Для дослідних точок визначають міру відхилення від табличної кривої насичення. Для точок, що найбільш збігаються з табличними даними, визначають питомий об'єм, масу води в посудині та міру сухості пари. Далі залежність

$P_H = f(T_H)$  будують в координатах  $\lg(P_H) = f\left(\frac{1}{T_H}\right)$ , яка усереднюється прямою лінією

$$\lg(P_H) = A - \frac{B}{T_H}. \quad (5.17)$$

За даними дослідів визначають сталі А і В, тобто визначають рівняння кривої насичення для дослідженого інтервалу зміни параметрів. Для однієї з точок на кривій насичення визначають значення теплоти пароутворення за рівнянням Клапейрона-Клаузіуса і порівнюють його з табличними даними.

Таблиця 5.5 – Журнал спостережень

| Дослід | Тиск за манометром<br>$P_M, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ | Абсолютний тиск,<br>$P_H, \text{бар}$ | Температура насичення<br>$t_H, ^\circ\text{C}$ | Табличне значення температури<br>$t_H^T, ^\circ\text{C}$ | Питомий об'єм<br>$v, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ | Міра сухості<br>$x$ |
|--------|---|---------------------------------------|--|--|--|---------------------|
| 1      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 2      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 3      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 4      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 5      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 6      |   |                                       |  |  |  |                     |
| 7      |   |                                       |  |  |  |                     |

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що розуміють під станами насиченої, сухої насиченої і перегрітої пари?
2. Як визначаються параметри насиченої пари?
3. Що називають теплотою пароутворення, яка її фізична суть?
4. В чому полягає суть рівняння Клапейрона-Клаузіуса?



## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ

**Мета:** за допомогою показань аспіраційного психрометра визначити параметри стану вологого повітря.

Лабораторна установка складається з психрометра, вентилятора і барометра-анероїда. Психрометр являє собою два однакових термометри, які закріплені в спеціальній оправі. Головки термометрів захищені екранами. Резервуар одного з термометрів, загорнутого бавовняною тканиною, змочується дистильованою водою.

Дослід виконується в такій послідовності. Визначається і записується в журнал спостережень (табл. 5.6) барометричний тиск. Перевіряється наявність води в резервуарі мокрого термометра. Вмикається вентилятор і через 5 хвилин знімаються показання обох термометрів, які записуються в журнал спостережень. Після запису 5...6 показань вимірювання закінчуються, а вентилятор вимикається.

### Обробка результатів

Результати вимірювань усереднюються. За усередненими даними визначається відносна вологість повітря (психрометрична формула):

$$\varphi = \frac{P_H^M}{P_H^C} - 712,6 \frac{B}{P_H^C} \Delta t \cdot 10^{-6}, \quad (5.18)$$

де  $P_H^M$ ,  $P_H^C$  – тиск насичення при температурі мокрого і сухого термометра, відповідно, Па;

$B$  – барометричний тиск, Па.

Парціальний тиск пари у вологому повітрі, Па:

$$P_H = \varphi \cdot P_H^C. \quad (5.19)$$

Вологовміст повітря,  $\frac{\Gamma}{\text{кг}}$

$$d = \frac{622 \cdot \phi \cdot P_H^c}{P - \phi \cdot P_H^c} \quad (5.20)$$

Таблиця 5.6 – Журнал спостережень

| Дослід           | Барометричний тиск В, Па | Температури, °С         |                          | Різниця температур $\Delta t$ , °С |
|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
|                  |                          | сухого термометра $t_c$ | мокрого термометра $t_m$ |                                    |
| 1                |                          |                         |                          |                                    |
| 2                |                          |                         |                          |                                    |
| 3                |                          |                         |                          |                                    |
| 4                |                          |                         |                          |                                    |
| 5                |                          |                         |                          |                                    |
| 6                |                          |                         |                          |                                    |
| Середні значення |                          |                         |                          |                                    |

Абсолютна вологість повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  :

$$\rho_{\text{пв}} = \frac{P_{\text{п}}}{R_{\text{пв}} \cdot T_c}, \quad (5.21)$$

де  $R_{\text{пв}}$  – газова стала повітря,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  (див. лаб. роб. № 3).

Ентальпія вологого повітря,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  :

$$h = C_p^c \cdot t_c + (2500 + C_p^n \cdot t_c) \cdot d, \quad (5.22)$$

де  $C_p^c = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – теплоємність сухого повітря;

$t_c$  – температура сухого термометра, °С;

$C_p^{\text{п}} = 1,93 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – теплоємність перегрітої пари.

Густина вологого повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ :

$$\rho_{\text{вл}} = \frac{B \cdot (1 + d)}{(0,622 + d) \cdot R_{\text{пв}} \cdot T_c}, \quad (5.23)$$

або

$$\rho_{\text{вл}} = \rho_{\text{сп}} \frac{1 + d}{1 + 1,61 \cdot d}, \quad (5.24)$$

де  $\rho_{\text{сп}}$  – густина сухого повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Отримані результати порівнюються з результатами, визначеними за допомогою h-d діаграми.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що розуміють під насиченим і ненасиченим вологим повітрям?
2. Що розуміють під абсолютною і відносною вологістю повітря?
3. Який зв'язок існує між вологовмістом і відносною вологістю повітря?
4. Що являє собою температура вологого термометра?
5. Що розуміють під температурою точки роси?
6. Як впливає вологовміст на густину повітря?

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТІКАННЯ ПОВІТРЯ ІЗ ЗВУЖЕНОГО СОПЛА

**Мета:** експериментально визначити залежність швидкості і витрати повітря від тиску за соплом; визначити коефіцієнти швидкості і витрати.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 5.9. Стиснуте повітря з лінії 1 через вентиль 2 надходить в установку, яка складається з діафрагми 3 і дифманометра 4 для вимірювань витрат повітря. Після діафрагми повітря прямує в камеру 5, де розташоване звужене сопло 6. Тиск повітря перед соплом і за ним вимірюється манометрами 7 і 8, а температури – термометрами 9 і 10. Витрата повітря і його тиск регулюються вентилями 2 і 11.

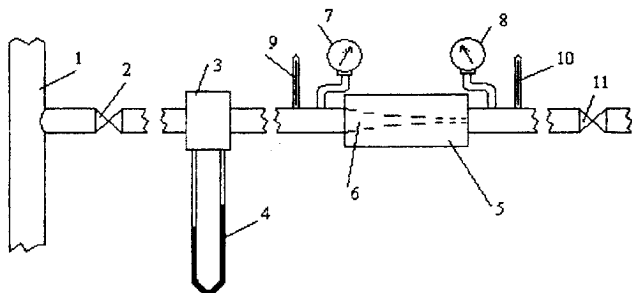


Рисунок 5.9 – Схема дослідної установки

Дослід проводять таким чином. Повністю відкривають вентиль 11, після чого повільно відкривають вентиль 2. Встановлюють заданий тиск перед соплом і підтримують його сталим за допомогою вентиля 11. Записують показання приладів в журнал спостережень (табл. 5.7). Дослід повторюють при іншому тиску перед соплом і за ним.

Таблиця 5.7 – Журнал спостережень

| Дослід | Барометричний тиск В, мм рт. ст. | Перепад тиску на діафрагмі $\Delta h$ , атм. | Тиск, атм.          |                  | Температура, °С     |                  |
|--------|----------------------------------|--|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
|        |                                  |  | перед соплом, $P_1$ | за соплом, $P_2$ | перед соплом, $t_1$ | за соплом, $t_2$ |
| 1      |                                  |  |                     |                  |                     |                  |
| 2      |                                  |  |                     |                  |                     |                  |
| 3      |                                  |  |                     |                  |                     |                  |
| 4      |                                  |  |                     |                  |                     |                  |
| 5      |                                  |  |                     |                  |                     |                  |

Міра розширення при витіканні

$$\beta = \frac{P_{2a}}{P_{1a}} \quad (5.25)$$

де  $P_{1a}$ ,  $P_{2a}$  – абсолютний тиск перед і за соплом, відповідно.

Витрата повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ :

$$G_{\text{п}} = 1,655 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha \cdot d^2 [(\Delta P \cdot 750 + B) \cdot v_1]^{0,5}, \quad (5.26)$$

де  $d$  – діаметр діафрагми, мм;

$\Delta P$  – перепад на діафрагмі, бар;

$B$  – барометричний тиск, мм рт. ст.;

$v_1$  – питомий об'єм повітря,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ , який визначаємо з рівняння стану

при параметрах  $P_1$ ,  $T_1$ ; інші позначення (див. формулу (5.6)).

Швидкість повітря в мінімальному перерізі сопла,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ :

$$C_{\text{п}} = \frac{4G_{\text{п}} \cdot v_{\text{п}}}{\pi \cdot d_c^2}, \quad (5.27)$$

де  $d_c$  – діаметр сопла, м.

Теоретична швидкість витікання,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ :

$$C_t = \left( \frac{2k \cdot P_1 \cdot v_1 (1 - \beta^m)}{k - 1} \right)^{0,5}, \quad (5.28)$$

де  $m = \frac{k-1}{k}$ ;  $k$  – показник адіабати для повітря.

Теоретична витрата повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ :

$$G_t = \frac{C_t \cdot \pi \cdot d_c^2 \cdot v_2}{4}, \quad (5.29)$$

де  $v_2$  – питомий об'єм, який визначається з рівняння стану при параметрах  $P_2$  і  $T_2$ .

Швидкісний коефіцієнт  $\phi$  і коефіцієнт витрати  $\mu$ :

$$\phi = \frac{C_{п.}}{C_t}; \quad \mu = \frac{G_{п.}}{G_t}. \quad (5.30)$$

За даними експериментів будують залежності  $G_{п.} = f(\beta)$  і  $C_{п.} = f_1(\beta)$ , із яких визначають значення  $\beta_{кр}$  і порівнюють із табличним.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які основні особливості процесу витікання газів?
2. Що розуміють під критичними параметрами, чому дорівнює критична швидкість витікання?
3. Чому у звуженому каналі не можна досягнути критичної швидкості?
4. Від яких величин залежить значення  $\beta_{кр}$  для газів?
5. Як змінюється температура газу в процесі витікання?
6. Як можна досягти надзвукових швидкостей при витіканні?

## 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження термодинамічних циклів теплових машин є основною задачею технічної термодинаміки. Однак виконати докладне дослідження циклу, визначити його основні характеристики при зміні окремих параметрів у реальній установці практично неможливо. Тому замість натурних випробувань доцільно провести дослідження на математичних моделях, які реалізуються за допомогою ЕОМ.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІВ КОМПРЕСОРА

**Мета:** дослідити показники роботи адіабатного, політропного та ізотермічного компресора. Визначити, який компресор є більш оптимальним. Побудувати графіки подачі, питомої роботи, потужності компресорів в залежності від міри підвищення тиску. Зробити загальні висновки по роботі.

Дослідження циклів компресора проводиться з використанням програми "Компресор" в середовищі Excel (рис. 6.1 та 6.2).

Початкові дані до програми розрахунків компресора за варіантами зведені в таблиці 6.1. Початкове значення міри підвищення тиску  $V_0 = 2$ .

#### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають об'ємним ККД поршневого компресора та як він визначається?
2. Що називають відносним об'ємом шкідливого простору та як він впливає на ефективність роботи компресора?
3. Як визначається теоретична об'ємна продуктивність компресора?
4. Як визначити теоретичну потужність компресора?
5. Який компресор і чому є більш ефективним: адіабатний, ізотермічний чи політропний?
6. Для чого здійснюють охолодження компресорів?





Таблиця 6.1 - Початкові дані до програми розрахунків компресора

| Варіант | Молекулярна маса<br>M,<br>кг/кмоль | Коефіцієнт Пуассона<br>K | Діаметр<br>поршня<br>D, м | Хід поршня<br>S, м | Кількість обертів вала<br>A, 1/c | Об'ємний<br>ККД<br>E | Початковий тиск<br>P <sub>1</sub> , бар | Початкова<br>температура<br>T, К | Показник політропи<br>NI | Відносний об'єм шкід-<br>ливого простору SG |
|---------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|---|----------------------------------|--------------------------|---|
| 1       | 32                                 | 1,4                      | 0,25                      | 0,20               | 16                               | 0,82                 | 1,00                                    | 288                              | 1,22                     | 0,05  |
| 2       | 44                                 | 1,33                     | 0,24                      | 0,21               | 10                               | 0,83                 | 0,98                                    | 290                              | 1,23                     | 0,045                                       |
| 3       | 29                                 | 1,4                      | 0,23                      | 0,20               | 11                               | 0,84                 | 0,99                                    | 293                              | 1,24                     | 0,055                                       |
| 4       | 28                                 | 1,4                      | 0,22                      | 0,15               | 12                               | 0,85                 | 1,01                                    | 289                              | 1,21                     | 0,05  |
| 5       | 44                                 | 1,33                     | 0,20                      | 0,15               | 13                               | 0,86                 | 1,02                                    | 290                              | 1,20                     | 0,043                                       |
| 6       | 32                                 | 1,33                     | 0,21                      | 0,15               | 14                               | 0,845                | 0,985                                   | 291                              | 1,24                     | 0,044                                       |
| 7       | 28                                 | 1,4                      | 0,22                      | 0,16               | 15                               | 0,855                | 0,995                                   | 292                              | 1,22                     | 0,053                                       |
| 8       | 29                                 | 1,4                      | 0,23                      | 0,17               | 9                                | 0,835                | 1,013                                   | 288                              | 1,23                     | 0,054                                       |
| 9       | 32                                 | 1,4                      | 0,24                      | 0,18               | 8                                | 0,825                | 1,005                                   | 289                              | 1,21                     | 0,051                                       |
| 10      | 29                                 | 1,4                      | 0,25                      | 0,19               | 10                               | 0,83                 | 0,987                                   | 290                              | 1,24                     | 0,052                                       |
| 11      | 28                                 | 1,4                      | 0,22                      | 0,15               | 15                               | 0,84                 | 0,997                                   | 291                              | 1,22                     | 0,045                                       |



Таблиця 6.2 - Початкові дані до програми розрахунків сопла

| Варіант | Молекулярна маса<br>$M$ ,<br>кг/кмоль | Показник<br>адіабати<br>$K$ | Початкові<br>параметри газу |           | Витрата<br>газу<br>$G$ ,<br>кг/с | Швидкісний<br>кофіцієнт<br>$\Phi$ | Кінцевий<br>тиск газу за<br>соплом<br>$P_2$ ,<br>кПа |
|---------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
|         |                                       |                             | $P_1$ , кПа                 | $T_1$ , К |                                  |                                   |  |
| 1       | 44                                    | 1,33                        | 1000                        | 373       | 2                                | 0,7                               | 300  |
| 2       | 29                                    | 1,4                         | 2000                        | 523       | 3                                | 0,8                               | 400  |
| 3       | 28                                    | 1,4                         | 6000                        | 1020      | 4                                | 0,6                               | 500  |
| 4       | 44                                    | 1,33                        | 5000                        | 1000      | 5                                | 0,7                               | 300  |
| 5       | 32                                    | 1,33                        | 5500                        | 600       | 6                                | 0,8                               | 200  |
| 6       | 28                                    | 1,4                         | 4500                        | 1200      | 7                                | 0,6                               | 250  |
| 7       | 29                                    | 1,4                         | 5700                        | 560       | 2                                | 0,7                               | 300  |
| 8       | 32                                    | 1,4                         | 5100                        | 510       | 3                                | 0,8                               | 400  |
| 9       | 29                                    | 1,4                         | 1200                        | 300       | 4                                | 0,6                               | 350  |
| 10      | 28                                    | 1,4                         | 5200                        | 560       | 5                                | 0,7                               | 450  |

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які основні особливості процесу витікання газів?
2. Що розуміють під критичними параметрами, чому дорівнює критична швидкість витікання?
3. Чому у звуженому каналі не можна досягнути критичної швидкості?
4. Від яких величин залежить значення  $\beta_{кр}$  для газів?
5. Як змінюється температура газу в процесі витікання?
6. Як можна досягти надзвукових швидкостей при витіканні?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛУ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ З РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ

**Мета:** дослідити вплив параметрів в камері згорання (міри підвищення тиску і температури), а також міри регенерації на показники роботи газотурбінної установки (ГТУ).

Принципова схема ГТУ зображена на рис. 6.4, а її цикл – на рис. 6.5. Установа складається з компресорів низького 1 і високого 2 тиску, камер згорання 3 і 4, циліндрів газової турбіни 5 і 6, охолодника повітря 8, регенеративного повітропідігрівника 9 і електрогенератора 7.

Цикл ГТУ наближений до реального, тому процеси стиску і розширення обчислюються з урахуванням ККД компресора і турбіни. З принципами роботи ГТУ і методами її розрахунків треба ознайомитись в процесі домашньої підготовки до роботи. Вхідні дані видаються викладачем індивідуально. В процесі досліджень варіюються значення міри підвищення тиску в компресорі В і міри регенерації S.

За результатами розрахунків будуються залежності основних показників роботи ГТУ від змінних величин і визначається їх вплив на економічність роботи, робляться обґрунтовані висновки.

Дослідження циклу ГТУ з регенерацією теплоти проводиться з використанням програми "Дослідження циклу ГТУ" в середовищі Excel (рис. 6.6).

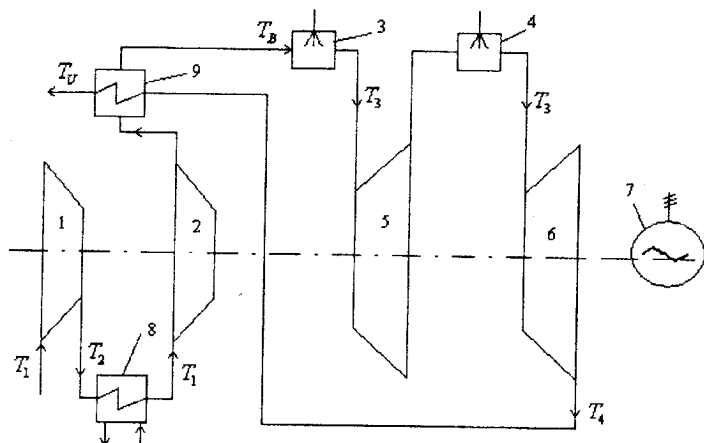


Рисунок 6.4 - Схема ГТУ з міжступінчастим стиском і розширенням та регенерацією

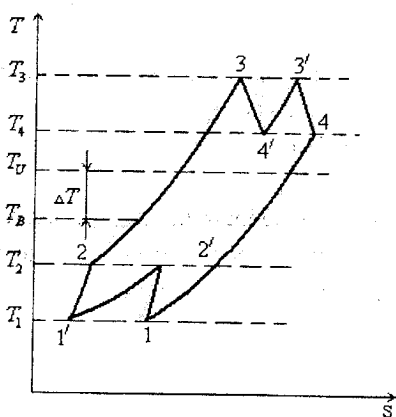


Рисунок 6.5 - Цикл ГТУ за схемою з рис. 6.4

Початкові дані до програми розрахунків ГТУ за варіантами зведені в таблиці 6.3. Показник адіабати повітря  $K_1 = 1,4$ . Початкова міра підвищення тиску  $B = 2$ .

Таблиця 6.3 - Початкові дані до програми розрахунків ГТУ з регенерацією

| Варіант | Тиск повітря перед компресором $P_1$ , бар | Температура повітря перед компресором $T_1$ , К | Електрична потужність ГТУ $N$ , МВт | ККД турбіни $E_2$ | ККД компресора $E_1$ | Температура перед турбіною $T_3$ , К | Кінцевий тиск за турбіною $P$ , бар | Показник адіабати газів $K_2$ |
|---------|--|---|-------------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1       | 1,00                                       | 290   | 10                                  | 0,87              | 0,85                 | 1273                                 | 1,2                                 | 1,66                          |
| 2       | 0,98                                       | 288   | 12                                  | 0,86              | 0,85                 | 1173                                 | 1,22                                | 1,33                          |
| 3       | 0,99                                       | 293   | 16                                  | 0,85              | 0,855                | 1223                                 | 1,25                                | 1,29                          |
| 4       | 1,01                                       | 289   | 21                                  | 0,87              | 0,855                | 1244                                 | 1,15                                | 1,33                          |
| 5       | 1,02                                       | 298   | 26                                  | 0,86              | 0,85                 | 1323                                 | 1,21                                | 1,66                          |
| 6       | 0,985                                      | 296   | 29                                  | 0,85              | 0,84                 | 1373                                 | 1,23                                | 1,33                          |
| 7       | 0,995                                      | 294   | 35                                  | 0,87              | 0,84                 | 1423                                 | 1,27                                | 1,29                          |
| 8       | 1,013                                      | 292   | 2,6                                 | 0,86              | 0,85                 | 1573                                 | 1,17                                | 1,33                          |
| 9       | 1,005                                      | 289   | 4                                   | 0,85              | 0,845                | 1443                                 | 1,19                                | 1,66                          |
| 10      | 0,987                                      | 291   | 1,8                                 | 0,87              | 0,855                | 1393                                 | 1,2                                 | 1,33                          |
| 11      | 0,997                                      | 287   | 1,2                                 | 0,86              | 0,84                 | 1193                                 | 1,23                                | 1,29                          |
| 12      | 1,00                                       | 295   | 3,4                                 | 0,85              | 0,85                 | 1293                                 | 1,22                                | 1,33                          |
| 13      | 0,98                                       | 297   | 7                                   | 0,87              | 0,845                | 1343                                 | 1,21                                | 1,66                          |
| 14      | 0,99                                       | 298   | 4                                   | 0,86              | 0,85                 | 1323                                 | 1,18                                | 1,33                          |

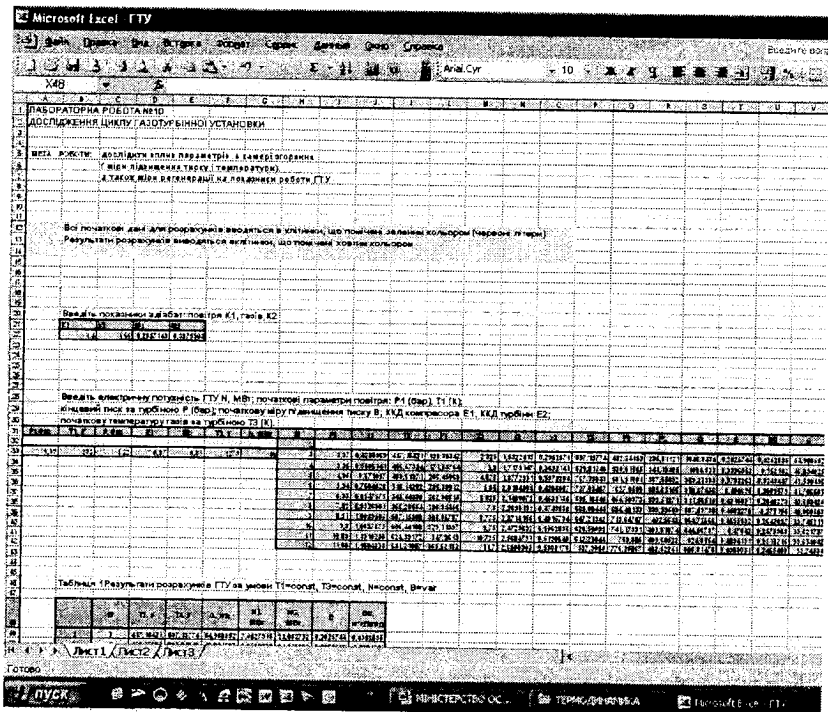


Рисунок 6.6 – Програма дослідження циклу ГТУ в середовищі Excel

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як визначається робота циклу ГТУ?
2. Як визначається робота компресора в циклі ГТУ?
3. Як визначається робота турбіни в циклі ГТУ?
4. Де здійснюється підведення теплоти в циклі ГТУ та як визначається підведена теплота?
5. Як визначається термічний ККД циклу ГТУ?
6. Як визначається питома витрата палива на ГТУ?
7. Як визначається загальна витрата палива на ГТУ?
8. З якою метою використовується регенеративне підігрівання повітря в циклі ГТУ?

9. Що називається мірою регенерації в циклі ГТУ та як вона визначається?
10. Чи можна досягнути повної регенерації в циклі ГТУ і за яких умов?
11. Як впливає регенеративне підігрівання повітря на значення термічного ККД в циклі ГТУ?
12. Як визначається потужність циклу ГТУ (електрогенератора)?
13. Як визначається потужність компресора в циклі ГТУ?
14. Як визначається потужність турбіни в циклі ГТУ?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПАРИ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ЦИКЛУ РЕНКІНА

**Мета:** на підставі варіантних розрахунків визначити вплив початкових і кінцевих параметрів пари на техніко-економічні показники роботи циклу паросилової установки (Ренкіна).

При підготовці до роботи визначається теплова схема установки, робиться її зарисовка і зображення циклу Ренкіна на  $h-s$  діаграмі, вписуються формули для розрахунків циклу Ренкіна.

Дослідження циклу паротурбінної установки (ПТУ) проводиться з використанням програми "Цикл Ренкіна\_1" в середовищі Excel (рис. 6.7). За результатами розрахунків визначається міра впливу окремих параметрів на економічність роботи циклу, будуються відповідні залежності і робляться висновки.

Початкові дані до програми розрахунків ПТУ за варіантами зведені в таблиці 6.4.



Таблиця 6.4 - Початкові дані до програми розрахунків циклу Ренкіна

| Варіант | Початкові параметри пари перед турбіною |        |         | Параметри пари в конденсаторі |        |         |
|---------|---|--------|---------|-------------------------------|--------|---------|
|         | Н0, кДж/кг                              | Т0, °С | Р0, кПа | НК, кДж/кг                    | ТК, °С | РК, кПа |
| 1       | 3500                                    | 550    | 14000   | 2060                          | 35     | 60      |
| 2       | 3425                                    | 480    | 3000    | 2200                          | 33     | 50      |
| 3       | 3530                                    | 570    | 12000   | 2275                          | 33     | 50      |
| 4       | 3480                                    | 550    | 12000   | 2280                          | 33     | 50      |
| 5       | 3410                                    | 510    | 9000    | 2251                          | 29,5   | 40      |
| 6       | 3360                                    | 450    | 2000    | 2300                          | 30     | 50      |
| 7       | 3270                                    | 420    | 4000    | 2200                          | 33     | 40      |
| 8       | 3350                                    | 500    | 12000   | 2250                          | 30     | 200     |
| 9       | 3300                                    | 470    | 14000   | 2100                          | 35     | 50      |
| 10      | 2920                                    | 350    | 10000   | 2000                          | 30     | 50      |
| 11      | 3090                                    | 400    | 11000   | 1980                          | 33     | 80      |
| 12      | 3220                                    | 450    | 12000   | 2070                          | 35     | 100     |
| 13      | 3390                                    | 500    | 9000    | 2220                          | 30     | 100     |
| 14      | 3270                                    | 420    | 3000    | 2250                          | 35     | 150     |



## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОМІЖНОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ

**Мета:** дослідити вплив проміжного перегріву пари на показники роботи ПТУ, визначити оптимальний тиск (температуру) проміжного перегріву пари.

Під час домашньої підготовки треба з'ясувати, для чого використовують проміжний перегрів пари в паротурбінних установках (ПТУ), зобразити цикл ПТУ з проміжним перегрівом на  $h-s$  діаграмі, виписати необхідні формули для визначення техніко-економічних показників його роботи, підготувати початкові дані. Згідно з виданими викладачем даними  $P_0$  та  $T_0$  із  $h-s$  діаграми визначається ентальпія пари перед турбіною Н0 і параметри пари в конденсаторі ТК, НК за відомими значеннями  $P_K$  і  $X$ . Визначені вхідні дані вводять в програму "Цикл Ренкіна 2 промперегрів" в середовищі Excel (рис. 6.8).

Після розрахунків будують залежності техніко-економічних показників роботи ПТУ від значення тиску (температури), з яким пара надходить на проміжний перегрів. Ці показники порівнюються з аналогічними показниками ПТУ, яка працює при відсутності проміжного перегріву. Оптимальний тиск і відповідна йому температура проміжного перегріву визначаються за найбільшим приростом ККД установки. Розрахунки проводяться при різних початкових параметрах пари. Відшукується залежність оптимальної температури проміжного перегріву від початкового тиску пари перед турбіною, визначається інтервал тисків, при якому проміжний перегрів доцільний.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. З якою метою застосовують проміжний перегрів пари?
2. Як проміжний перегрів впливає на економічність роботи ПТУ?
3. За яких умов проміжний перегрів впливає на економічність роботи ПТУ?

4. Чому при зростанні початкового тиску застосування проміжного перегріву більш доцільне?
5. З якою метою запроваджують регенеративний підігрів живильної води в циклі ПТУ?
6. Що розуміють під коефіцієнтом недовиробки при роботі турбіни з відборами пари?
7. Як впливає температура живильної води на ефективність циклу ПТУ?
8. Як впливає наявність відборів пари на значення термічного ККД ПТУ?
9. Як визначити термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією?
10. Як визначається теоретична робота пари в турбіні при роботі турбіни з відборами пари?

Microsoft Excel - ЦИКЛ РЕНКІНА З ПРОМПЕРЕГР

Вибір Друк Формули Вставка Сторінка Дані Сервіс Справка

Аналіз Сир 10

Лист1

Цикл Ренкіна

Лабораторна робота №12

Визначення оптимальної температури проміжного перегріву пари в циклі Ренкіна

3. Введіть початкові параметри пари:

|                             |    |       |
|-----------------------------|----|-------|
| 6. Тиск, кг/см <sup>2</sup> | Р0 | 15000 |
| 7. Температура, С           | T0 | 500   |
| 8. Ентальпія, кДж/кг        | h0 | 3310  |

8. Введіть кінцеві параметри пари:

|                              |     |      |
|------------------------------|-----|------|
| 10. Тиск, кг/см <sup>2</sup> | Рк0 | 5    |
| 11. Температура, С           | Tк0 | 53   |
| 12. Ентальпія, кДж/кг        | hк0 | 2100 |

14.5. Показники роботи циклу без проміжного перегріву пари:

|   |                 |                         |
|---|-----------------|-------------------------|
| 16. Корисна теплота роботи, кДж/кг              | Q <sub>ср</sub> | 138,2                   |
| 17. ЕД  | 12,10           | Q <sub>ср</sub> = 317,2 |
| 18. Термічний ККД                               |                 | Q <sub>ср</sub> = 317,2 |
| 19. ЕД  | 0,361           |                         |
| 20. Теплота випару пари, кг (кВт·год)           |                 |                         |
| 21. ЕД  | 2,975           |                         |
| 22. Теплота витрати усього палива, кг (кВт·год) |                 |                         |
| 23. ЕД  | 0,322           |                         |

25. Таблиця - Показники роботи циклу Ренкіна з різними значеннями температури проміжного перегріву пари за умови сталих початкових і кінцевих параметрів пари

| Температура проміжного перегріву, С | Тиск, кг/см <sup>2</sup> | Температура, С | Ентальпія, кДж/кг | ЕД   | ККД    | ЕД     | ККД   |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------|-------------------|------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1                                   | 15000                    | 1491,4         | 1491              | 3203 | 0,4271 | 0,444  | 0,508 | 0,4247 | 0,2988 | 0,8154 |        |
| 2                                   | 7                        | 11000          | 1491,2            | 1420 | 3152,7 | 0,4208 | 0,444 | 2,398  | 0,4273 | 0,2987 | 0,8332 |
| 3                                   | 1                        | 8000           | 1476,2            | 1451 | 3417,6 | 0,4251 | 0,444 | 2,489  | 0,4254 | 0,2982 | 0,8321 |
| 4                                   | 0,5                      | 7000           | 1506,5            | 1488 | 3487,2 | 0,4248 | 0,443 | 2,530  | 0,4255 | 0,2982 | 0,8327 |
| 5                                   | 0,2                      | 6000           | 1555,1            | 1573 | 3587,3 | 0,4244 | 0,443 | 2,615  | 0,4262 | 0,2986 | 0,8328 |
| 6                                   | 0,1                      | 5000           | 1628,8            | 1698 | 3736,2 | 0,4253 | 0,443 | 2,711  | 0,4265 | 0,2983 | 0,8331 |

Лист1 Лист2 Лист3

Рисунок 6.8 – Програма визначення оптимальної температури промперегріву пари в циклі Ренкіна в середовищі Excel

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛУ ПОВІТРЯНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

**Мета:** дослідити вплив міри розширення повітря, температури охолодної води і наявності повітроохолодника на показники роботи циклу.

Дослідження циклу холодильної машини проводиться з використанням програми "Холодильна машина" в середовищі Excel (рис. 6.9).

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Лабораторна робота №13". The main content is a table with the following data:

| №  | Назва параметра                            | Відомі дані | Відомі параметри |
|----|--|-------------|------------------|
| 6  | Парується, кг/с                            | 0           | 100              |
| 7  | Питома холодопродуктивність, Вт/кг         | 0,6         | 3,0              |
| 8  | Температура конденсуючого середовища, К    | 310         | 290              |
| 9  | Температура повітря на вхід в компресор, К | 310         | 270              |
| 10 | ККД компресора                             | 0,6         | 0,61             |
| 11 | ККД детандера                              | 0,6         | 0,61             |

| №  | Q       | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | P <sub>0</sub> | M | T <sub>2</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> | M <sub>0</sub> |
|----|---------|----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 13 | 2,5     |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 14 | 230     |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 15 | 230     |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 16 | 1,2857  |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 17 | 0,257   |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 18 | 365,831 |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 19 | 237,578 |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 20 | 119,996 |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 21 | 61,578  |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 22 | 1,4790  |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 23 | 1,4874  |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| 24 | 6,1896  |                |                |                |   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |

| №  | Q <sub>0</sub> | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub> | Q <sub>3</sub> | Q <sub>4</sub> | Q <sub>5</sub> | Q <sub>6</sub> | Q <sub>7</sub> | Q <sub>8</sub> | Q <sub>9</sub> |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 28 | 1              | 255,9          | 182,5          | 73,4           | 1,9827         | 0,129          | 1,351          | -0,0189        | 265,0          |                |
| 29 | 2              | 274,4          | 195            | 78,4           | 1,2602         | 0,145          | -1,334         | -0,0358        | 260,0          |                |
| 30 | 3              | 293            | 207,5          | 85,5           | 1,1698         | 0,161          | 1,319          | -0,0510        | 255,0          |                |
| 31 | 4              | 311,8          | 220            | 91,8           | 1,0894         | 0,174          | 1,305          | -0,0647        | 250,0          |                |
| 32 | 5              | 330,8          | 232,5          | 98,3           | 1,0174         | 0,187          | 1,293          | -0,0773        | 245,0          |                |
| 33 | 6              | 350            | 245            | 105            | 0,9524         | 0,198          | 1,281          | -0,0888        | 240,0          |                |
| 34 | 7              | 369,4          | 257,5          | 112            | 0,8934         | 0,209          | 1,271          | -0,0995        | 235,0          |                |
| 35 | 8              | 389,1          | 270            | 119            | 0,8396         | 0,219          | 1,261          | -0,1084        | 230,0          |                |
| 36 | 9              | 409            | 282,5          | 127            | 0,7904         | 0,228          | 1,251          | -0,1167        | 225,0          |                |

Рисунок 6.9 – Програма дослідження роботи повітряної холодильної машини в середовищі Excel

Початкові дані до програми розрахунків холодильної машини за варіантами зведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 - Початкові дані до програми розрахунків циклу холодильної машини

| Варіант | Холододви-<br>датність<br>$Q_c$ ,<br>кВт | Питома<br>холодовидатність,<br>$Q_0$ ,<br>кДж/кг | Температура<br>нарколішнього<br>середовища,<br>$T_N$ , К | Температура<br>повітря на вході<br>в компресор<br>$T_{10}$ , К | ККД<br>компресора<br>ЕК | ККД<br>дегандера<br>ЕД |
|---------|--|--|--|--|-------------------------|------------------------|
| 1       | 120                                      | 40   | 292  | 270  | 0,84                    | 0,86                   |
| 2       | 200                                      | 50   | 289  | 263  | 0,85                    | 0,85                   |
| 3       | 150                                      | 45   | 288  | 265  | 0,90                    | 0,85                   |
| 4       | 200                                      | 40   | 290  | 270  | 0,85                    | 0,84                   |
| 5       | 120                                      | 50   | 298  | 265  | 0,86                    | 0,84                   |
| 6       | 150                                      | 45   | 293  | 263  | 0,85                    | 0,85                   |
| 7       | 180                                      | 40   | 295  | 262  | 0,84                    | 0,86                   |
| 8       | 100                                      | 50   | 296  | 267  | 0,85                    | 0,85                   |
| 9       | 130                                      | 45   | 295  | 269  | 0,83                    | 0,84                   |
| 10      | 170                                      | 40   | 296  | 261  | 0,85                    | 0,86                   |

В процесі домашньої підготовки треба зарисувати робочу схему циклу, його зображення на P-v і T-s діаграмах з позначенням параметрів у вузлових точках, вписати основні формули, які покладені в основу математичної моделі.

За результатами розрахунків будуються залежності холодильного коефіцієнта, потужностей компресора і детандера, питомої витрати потужності на машину від змінних величин, визначаються оптимальні умови роботи циклу певної холодопродуктивності.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають холодильним коефіцієнтом і від яких параметрів він залежить?
2. Як визначається ексергетичний ККД холодильної машини і від яких параметрів він залежить?
3. Як впливає температура в холодильній камері на потужність компресора?
4. Як визначається робота циклу холодильної машини?
5. Як визначається холодопродуктивність холодильної машини?
6. Як впливає температура навколишнього середовища на ексергетичний ККД холодильної машини?
7. Як впливає температура охолодної води на потужність детандера?
8. Як впливає температура навколишнього середовища на холодильний коефіцієнт?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЕПЛОАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

**Мета:** дослідити і зробити аналіз роботи теплоасосної установки (ТНУ), визначити оптимальні умови її роботи і оптимальну температуру мережної води в системі теплофікації після ТНУ.

Схема дослідної установки показана на рис. 6.10, а її цикл на  $\lg P - h$  діаграмі на рис. 6.11. Низькотемпературним теплоносієм є охолодна вода,

яка за допомогою циркуляційного насоса 1 надходить у випарник 2 з витратою GB.

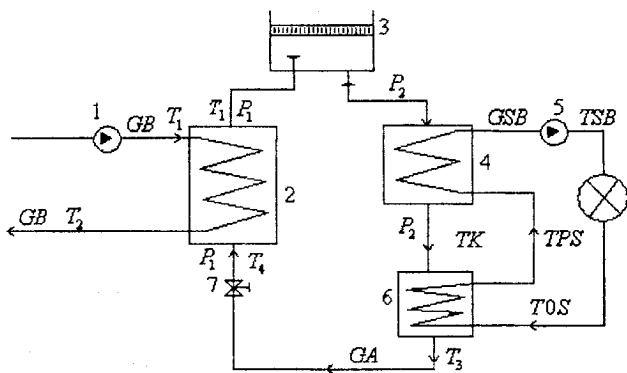


Рисунок 6.10 - Схема теплонасосної установки

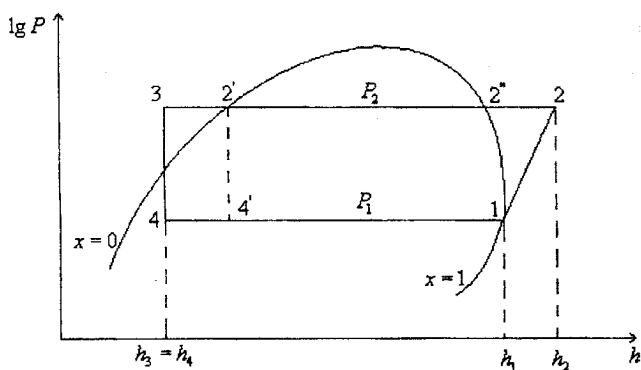


Рисунок 6.11 – Зображення циклу теплового насоса на  $\lg P-h$  діаграмі

У випарнику 2 ця вода охолоджується від температури  $T_1$  до температури  $T_2$  циркулюючим в ТНУ холодоагентом з витратою GA, який випаровується при тиску  $P_1$  зі сталою температурою  $T_1$  (процес 4-1 на рис. 6.11). Пара холодоагенту (точка 1) надходить до компресора 3, де стискається до тиску  $P_2$  (точка 2 на  $\lg P-h$  діаграмі), після чого прямує в конденсатор 4. В конденсаторі пара конденсується при сталій температурі ТК за рахунок охолодження конденсатора мережною водою в системі тепло-



фікації, яка подається мережним насосом 5. В конденсатор ця вода надходить з проміжного охолодника 6 з температурою T<sub>PS</sub> і витратою GSB, де підігрівається до температури TSB. Процес конденсації в конденсаторі зображується лінією 2–2' на lgP–h діаграмі. В проміжному охолоднику конденсат холодоагенту охолоджується до температури T<sub>3</sub> (лінія 2'–3).

Після проміжного охолодника конденсат дроселюється у дросельному вентилі 7 до тиску P<sub>1</sub> при сталому значенні ентальпії (процес 3–4), після чого надходить у випарник 2. Із діаграми lgP–h видно, яку роль відіграє проміжний охолодник конденсату 6.

Дослідження циклу теплового насоса проводиться з використанням програми "Тепловий насос" в середовищі Excel (рис. 6.12). В розрахунках визначаються: температура гарячої мережної води, її витрата, потужність компресора ТНУ, коефіцієнт трансформації теплоти, питома витрата електроенергії на відпуск теплоти, ККД ТНУ з відпуску теплоти.

За результатами розрахунків будуються відповідні залежності показників роботи ТНУ від температури гарячої мережної води TSB, з яких визначаються оптимальні режими роботи ТНУ, робляться обґрунтовані висновки по роботі.

Початкові дані до програми розрахунків теплового насоса за варіантами зведені в таблиці 6.6

Таблиця 6.6 – Початкові дані до програми розрахунків циклу теплового насоса

| Варіант | Температура аміаку у випарнику T1, °C | Початкова ентальпія H1, кДж/кг | ККД компресора $\eta_{км}$ | Температура навколишнього середовища TNO, K |
|---------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|
| 1       | 13                                    | 1680                           | 0,84                       | 288   |
| 2       | 15                                    | 1674,5                         | 0,85                       | 293   |
| 3       | 17                                    | 1683,3                         | 0,845                      | 298   |
| 4       | 19                                    | 1674,5                         | 0,83                       | 303   |
| 5       | 20                                    | 1680                           | 0,86                       | 283   |
| 6       | 13                                    | 1674,5                         | 0,84                       | 288   |
| 7       | 15                                    | 1683,3                         | 0,85                       | 293   |
| 8       | 17                                    | 1674,5                         | 0,86                       | 298   |
| 9       | 19                                    | 1680                           | 0,86                       | 303   |
| 10      | 20                                    | 1675                           | 0,84                       | 283   |

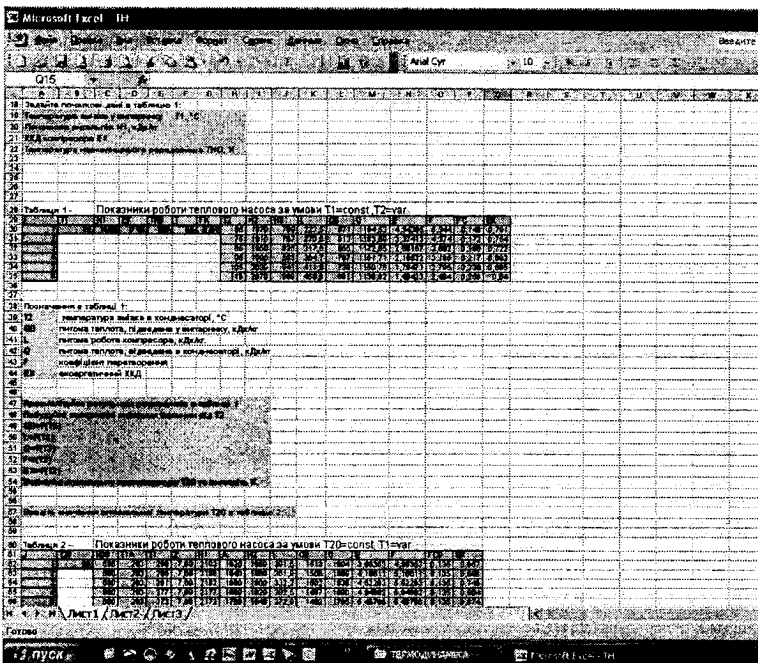


Рисунок 6.12 – Програма дослідження роботи аміачного теплового насоса в середовищі Excel

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називають опалювальним коефіцієнтом і що він характеризує?
2. Від яких параметрів залежить значення коефіцієнта перетворення?
3. Як впливають температури випаровування і конденсації на потужність компресора?
4. Яку роль відіграє проміжний охолодник конденсату і як він впливає на показники роботи ТНУ?
5. Як визначається ексергетичний ККД теплового насоса і від яких параметрів він залежить?
6. Як визначається теплопродуктивність теплового насоса?
7. Як впливає температура навколишнього середовища на ексергетичний ККД теплового насоса?
8. Запишіть рівняння енергетичного балансу теплового насоса.

1. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : Поділля-2000, 2003. – 368 с.
2. Чепурний М. М. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 150 с.
3. Чепурний М. М. Лабораторний практикум з технічної термодинаміки / Уклад. М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВДТУ. – 1995. – 44 с.
4. Техническая термодинамика / [под ред. В. И. Крутова]. – М. : Высшая школа. – 1991. – 375 с.
5. Беляев Н. М. Термодинаміка / Беляев Н. М. – Киев : Вища школа. 1987. – 246 с.
6. Кириллин В. О. Техническая термодинамика / Кириллин В. О., Сычев В. В., Шейдлин О. Е. – М. : Энергоиздат. – 1976. – 324 с.
7. Задачник по технической термодинамике / [под ред. В. И. Крутова]. – М. : Энергоатомиздат. – 1986. – 292 с.
8. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства воды и водяного пара / Ривкин Л. С. – М. : Энергия. 1980. – 192 с.
9. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства газов / Ривкин Л. С. – М. : Энергия. 1973. – 224 с.

Таблиця А.1 – Основні фізичні властивості деяких газів

| Назва           | Хімічна формула                | Густина при 0°С і 760 мм рт. ст. | Молекулярна маса | Газова стала, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ | Температура кипіння при 760 мм рт. ст. | Теплота пароутворення при 760 мм рт. ст., $г \cdot 10^{-3}, Дж/кг$ | Критичні точки  |                      | Теплоємність при 20 °С і $p = 1 \text{ бар}$ , $кДж/(кг \cdot К)$ |       |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------|----------------------|---|-------|
|                 |                                |                                  |                  |                                       |  |  | Температура, °С | Абсолютний тиск, бар | $C_p$   | $C_v$ |
| Азот            | N <sub>2</sub>                 | 1,25                             | 28               | 297                                   | -195,8                                 | 199,4  | -147,1          | 33,49                | 1,05  | 0,746 |
| Аміак           | NH <sub>3</sub>                | 0,77                             | 17               | 488                                   | 33,4                                   | 1374   | +132,4          | 111,5                | 2,22  | 1,68  |
| Ацетилен        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 1,171                            | 26,0             | 320                                   | -83,7(в)                               | 830  | +35,7           | 61,6                 | 1,68  | 1,36  |
| Бензол          | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>  | -                                | 78,1             | 106                                   | +80,2                                  | 394  | +288,5          | 47,7                 | 1,25  | 1,140 |
| Бутан           | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 2,673                            | 58,1             | 143                                   | -0,5                                   | 387  | +152            | 37,5                 | 1,92  | 1,80  |
| Повітря         | -                              | 1,293                            | (29,0)           | 287                                   | -195                                   | 197  | -140,7          | 37,2                 | 1,01  | 0,721 |
| Водень          | H <sub>2</sub>                 | 0,0899                           | 2,02             | 2140                                  | -252,8                                 | 450,5  | -239,9          | 12,80                | 14,3  | 10,14 |
| Гелій           | He                             | 0,179                            | 4,0              | 2080                                  | -268,9                                 | 19,5   | -268,0          | 2,26                 | 5,28  | 3,18  |
| Двоокис азоту   | NO <sub>2</sub>                | -                                | 46,0             | 181                                   | +21,2                                  | 712  | +158,2          | 100,00               | 0,804   | 0,62  |
| Двоокис сірки   | SO <sub>2</sub>                | 2,93                             | 64,1             | 130                                   | -10,8                                  | 394  | +157,5          | 77,78                | 0,633   | 0,503 |
| Двоокис вуглецю | CO <sub>2</sub>                | 1,90                             | 44,0             | 189                                   | 78,2(возг)                             | 574,0  | +31,1           | 72,9                 | 0,838   | 0,654 |
| Кисень          | O <sub>2</sub>                 | 1,429                            | 32               | 260                                   | -83,0                                  | 213  | -118,8          | 49,71                | 0,913   | 0,654 |
| Метан           | CH <sub>4</sub>                | 0,72                             | 16,0             | 519                                   | -161,6                                 | 511  | -82,15          | 45,6                 | 2,23  | 1,70  |
| Оксид вуглецю   | CO                             | 1,25                             | 28,0             | 297                                   | -191,5                                 | 212  | -140,2          | 34,53                | 1,05  | 0,754 |
| Пропан          | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 2,02                             | 44,1             | 189                                   | -42,1                                  | 427  | +95,6           | 43                   | 1,87  | 1,65  |
| Сірководень     | H <sub>2</sub> S               | 1,54                             | 34,1             | 244                                   | -60,2                                  | 549  | +100,4          | 188,9                | 1,060   | 0,804 |
| Хлор            | Cl <sub>2</sub>                | 3,22                             | 70,9             | 117                                   | -33,8                                  | 306  | +144,0          | 76,1                 | 0,482   | 0,355 |

Таблиця Б.1 – Теплоємність окису вуглецю

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг·К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|-------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|----------|--|-----------|
|             | $\mu C_p$                          | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                        | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                      | $C'_{vm}$ |
| 0           | 29.123                             | 20.808    | 29.123       | 20.808       | 1.0396                          | 0.7427   | 1.2992   | 0.9282    |
| 100         | 29.262                             | 20.947    | 29.178       | 20.863       | 1.0417                          | 0.7448   | 1.3017   | 0.9307    |
| 200         | 29.647                             | 21.332    | 29.303       | 20.988       | 1.0463                          | 0.7494   | 1.3071   | 0.9362    |
| 300         | 30.254                             | 21.939    | 29.517       | 21.202       | 1.0538                          | 0.7570   | 1.3167   | 0.9458    |
| 400         | 30.974                             | 22.659    | 29.789       | 21.474       | 1.634                           | 0.7666   | 1.3289   | 0.9579    |
| 500         | 31.707                             | 23.392    | 30.099       | 21.784       | 1.0748                          | 0.7775   | 1.3427   | 0.9718    |
| 600         | 32.402                             | 24.087    | 30.425       | 22.110       | 1.0861                          | 0.7892   | 1.3575   | 0.9864    |
| 700         | 33.025                             | 24.710    | 30.725       | 22.437       | 1.0978                          | 0.8009   | 1.3720   | 1.0011    |
| 800         | 33.574                             | 25.259    | 31.070       | 22.755       | 1.1091                          | 0.8122   | 1.3862   | 1.0153    |
| 900         | 34.055                             | 25.740    | 31.376       | 23.061       | 1.1200                          | 0.8231   | 1.3996   | 1.0287    |
| 1000        | 34.470                             | 26.155    | 31.665       | 23.350       | 1.1304                          | 0.8336   | 1.4126   | 1.0417    |
| 1100        | 34.826                             | 26.511    | 31.937       | 23.622       | 1.1401                          | 0.8432   | 1.4248   | 1.0538    |
| 1200        | 35.140                             | 26.825    | 32.192       | 23.877       | 1.1493                          | 0.8566   | 1.4361   | 1.0651    |
| 1300        | 35.412                             | 27.097    | 32.427       | 24.112       | 1.1577                          | 0.8608   | 1.4465   | 1.0756    |
| 1400        | 35.646                             | 27.331    | 32.653       | 24.338       | 1.1656                          | 0.8688   | 1.4566   | 1.0856    |
| 1500        | 35.856                             | 27.541    | 32.858       | 24.543       | 1.1731                          | 0.8763   | 1.4658   | 1.0948    |

Таблиця Б.2 – Теплоємність водню

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг·К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|-------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|----------|--|-----------|
|             | $\mu C_p$                          | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                        | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                      | $C'_{vm}$ |
| 0           | 28.617                             | 20.302    | 28.617       | 20.302       | 14.195                          | 10.071   | 1.2766   | 0.9056    |
| 100         | 29.128                             | 20.813    | 28.935       | 20.620       | 14.353                          | 10.228   | 1.2908   | 0.9198    |
| 200         | 29.241                             | 20.926    | 29.073       | 20.758       | 14.421                          | 10.297   | 1.2971   | 0.9261    |
| 300         | 29.299                             | 20.984    | 29.123       | 20.808       | 14.446                          | 10.322   | 1.2992   | 0.9282    |
| 400         | 29.396                             | 21.081    | 29.186       | 20.871       | 14.477                          | 10.353   | 1.3021   | 0.9311    |
| 500         | 29.559                             | 21.244    | 29.249       | 20.934       | 14.509                          | 10.384   | 1.350  | 0.9341    |
| 600         | 29.793                             | 21.478    | 29.316       | 21.001       | 14.542                          | 10.417   | 1.3080   | 0.9370    |
| 700         | 30.099                             | 21.784    | 29.408       | 21.093       | 14.587                          | 10.463   | 1.3121   | 0.9412    |
| 800         | 30.472                             | 22.157    | 29.517       | 21.202       | 14.641                          | 10.517   | 1.3167   | 0.9458    |
| 900         | 30.869                             | 22.554    | 29.647       | 21.332       | 14.706                          | 10.581   | 1.3226   | 0.9516    |
| 1000        | 31.284                             | 22.969    | 29.789       | 21.474       | 14.776                          | 10.652   | 1.3289   | 0.9579    |
| 1100        | 31.723                             | 23.408    | 29.944       | 21.629       | 14.853                          | 10.727   | 1.3360   | 0.9650    |
| 1200        | 32.155                             | 23.840    | 30.107       | 21.792       | 14.934                          | 10.809   | 1.3431   | 0.9722    |
| 1300        | 32.590                             | 24.275    | 30.488       | 21.973       | 15.023                          | 10.899   | 1.3511   | 0.9801    |
| 1400        | 33.000                             | 24.685    | 30.467       | 22.152       | 15.113                          | 10.988   | 1.3591   | 0.9881    |
| 1500        | 33.394                             | 25.079    | 30.647       | 22.322       | 15.202                          | 11.077   | 1.3674   | 0.9964    |

Таблиця Б.3 – Теплоємність вуглекислого газу

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг · К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> · К) |           |
|-------------|--------------------------------------|-----------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------|---|-----------|
|             | $\mu C_p$                            | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                          | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                       | $C'_{vm}$ |
| 0           | 35.860                               | 27.545    | 35.860       | 27.545       | 0.8148                            | 0.6259   | 1.5998  | 1.2288    |
| 100         | 40.206                               | 31.891    | 38.112       | 29.797       | 0.8658                            | 0.6770   | 1.7003  | 1.3293    |
| 200         | 43.689                               | 35.374    | 40.059       | 31.744       | 0.9102                            | 0.7214   | 1.7373  | 1.4164    |
| 300         | 46.515                               | 38.200    | 41.755       | 33.60        | 0.9487                            | 0.7599   | 1.8627  | 1.4918    |
| 400         | 48.860                               | 40.515    | 43.250       | 34.935       | 0.9826                            | 0.7938   | 1.9227  | 1.5587    |
| 500         | 50.815                               | 42.500    | 44.573       | 36.258       | 1.0128                            | 0.8240   | 1.9887  | 1.6178    |
| 600         | 52.452                               | 44.137    | 45.753       | 37.438       | 1.0396                            | 0.8508   | 2.0411  | 1.6701    |
| 700         | 53.826                               | 45.511    | 46.813       | 38.498       | 1.0639                            | 0.8746   | 2.0884  | 1.7174    |
| 800         | 54.977                               | 46.662    | 47.763       | 39.448       | 1.0852                            | 0.8964   | 2.1311  | 1.7601    |
| 900         | 55.952                               | 47.637    | 48.617       | 40.302       | 1.1045                            | 0.9157   | 2.1692  | 1.7982    |
| 1000        | 56.773                               | 48.458    | 49.392       | 41.077       | 1.1225                            | 0.9332   | 2.2035  | 1.8326    |
| 1100        | 57.472                               | 49.157    | 50.099       | 41.784       | 1.1384                            | 0.9496   | 2.2349  | 1.8640    |
| 1200        | 58.071                               | 49.756    | 50.740       | 42.425       | 1.1530                            | 0.9638   | 2.2638  | 1.8929    |
| 1300        | 58.588                               | 50.271    | 51.322       | 43.007       | 1.1660                            | 0.9772   | 2.2898  | 1.9188    |
| 1400        | 59.030                               | 50.715    | 51.858       | 43.543       | 1.1782                            | 0.9893   | 2.3136  | 1.9427    |
| 1500        | 59.411                               | 51.096    | 52.348       | 44.033       | 1.1895                            | 1.0006   | 2.3354  | 1.9644    |

Таблиця Б.4 – Теплоємність сірчаного газу

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> К) |           |
|-------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|----------|---|-----------|
|             | $\mu C_p$                          | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                        | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                     | $C'_{vm}$ |
| 0           | 38.85                              | 30.52     | 38.85        | 30.52        | 0.607                           | 0.477    | 1.733   | 1.361     |
| 100         | 42.41                              | 34.08     | 40.65        | 32.32        | 0.636                           | 0.507    | 1.813   | 1.440     |
| 200         | 45.55                              | 37.22     | 42.33        | 34.00        | 0.662                           | 0.532    | 1.888   | 1.516     |
| 300         | 48.23                              | 39.90     | 43.88        | 35.55        | 0.687                           | 0.557    | 1.955   | 1.587     |
| 400         | 50.24                              | 41.91     | 45.22        | 36.89        | 0.708                           | 0.578    | 2.018   | 1.645     |
| 500         | 51.71                              | 43.38     | 46.39        | 38.06        | 0.724                           | 0.595    | 2.068   | 1.700     |
| 600         | 52.88                              | 44.55     | 47.35        | 39.02        | 0.737                           | 0.607    | 2.114   | 1.742     |
| 700         | 53.76                              | 45.43     | 48.23        | 39.90        | 0.754                           | 0.624    | 2.152   | 1.799     |
| 800         | 54.43                              | 46.10     | 48.94        | 40.61        | 0.762                           | 0.632    | 2.181   | 1.813     |
| 900         | 55.01                              | 46.68     | 49.61        | 41.28        | 0.775                           | 0.645    | 2.215   | 1.842     |
| 1000        | 55.43                              | 47.10     | 50.16        | 41.83        | 0.783                           | 0.653    | 2.236   | 1.867     |
| 1100        | 55.77                              | 47.44     | 50.66        | 42.33        | 0.791                           | 0.662    | 2.261   | 1.888     |
| 1200        | 56.06                              | 47.73     | 51.08        | 42.75        | 0.795                           | 0.666    | 2.278   | 1.908     |

Таблиця Б.5 – Теплоємність водяної пари

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Мольна теплоємність,<br>кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова<br>теплоємність,<br>кДж/(кг·К) |          | Об'ємна<br>теплоємність,<br>кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|----------|--|-----------|
|                                    | $\mu C_p$                             | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                              | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$  | $C'_{vm}$ |
| 0                                  | 33.499                                | 25.184    | 33.499       | 25.184       | 1.8594                                | 1.3980   | 1.4943   | 1.1237    |
| 100                                | 34.055                                | 25.740    | 33.741       | 25.426       | 1.8728                                | 1.4114   | 1.5052   | 1.1342    |
| 200                                | 34.984                                | 26.649    | 34.118       | 25.803       | 1.8937                                | 1.4323   | 1.5223   | 1.1514    |
| 300                                | 36.036                                | 27.721    | 34.575       | 26.260       | 1.9192                                | 1.4574   | 1.5424   | 1.1715    |
| 400                                | 37.191                                | 28.876    | 35.090       | 26.775       | 1.9477                                | 1.4863   | 1.5654   | 1.1945    |
| 500                                | 38.406                                | 30.091    | 35.630       | 27.315       | 1.9778                                | 1.5160   | 1.5897   | 1.2188    |
| 600                                | 39.662                                | 31.347    | 36.195       | 27.880       | 2.0092                                | 1.5474   | 1.6148   | 1.2439    |
| 700                                | 40.951                                | 32.636    | 36.789       | 28.474       | 2.0419                                | 1.5805   | 1.6412   | 1.2703    |
| 800                                | 42.249                                | 33.934    | 37.392       | 29.077       | 2.0754                                | 1.6140   | 1.6680   | 1.2971    |
| 900                                | 43.513                                | 35.198    | 38.008       | 29.693       | 2.1097                                | 1.6483   | 1.6957   | 1.3247    |
| 1000                               | 44.723                                | 36.408    | 38.619       | 30.304       | 2.1436                                | 1.6823   | 1.7229   | 1.3519    |
| 1100                               | 45.858                                | 37.543    | 39.226       | 30.911       | 2.1771                                | 1.7158   | 1.7501   | 1.3791    |
| 1200                               | 46.913                                | 38.598    | 39.825       | 31.510       | 2.2106                                | 1.7488   | 1.7769   | 1.4059    |
| 1300                               | 47.897                                | 39.582    | 40.407       | 32.092       | 2.2429                                | 1.7815   | 1.8028   | 1.4319    |
| 1400                               | 48.801                                | 40.486    | 40.976       | 32.661       | 2.2743                                | 1.8129   | 1.8280   | 1.4570    |
| 1500                               | 49.639                                | 41.324    | 41.525       | 33.210       | 2.3048                                | 1.8434   | 1.8527   | 1.4817    |
| 1600                               | 50.409                                | 42.094    | 42.056       | 33.741       | 2.3346                                | 1.8728   | 1.8761   | 1.5052    |
| 1700                               | 51.133                                | 42.818    | 42.576       | 34.261       | 2.3630                                | 1.9016   | 1.8996   | 1.5286    |

Таблиця Б.6 – Теплоємність повітря

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Мольна теплоємність,<br>кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова<br>теплоємність,<br>кДж/(кг·К) |          | Об'ємна<br>теплоємність,<br>кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|----------|--|-----------|
|                                    | $\mu C_p$                             | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                              | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$  | $C'_{vm}$ |
| 0                                  | 29.073                                | 20.758    | 29.073       | 20.758       | 1.0036                                | 0.7164   | 1.2971   | 0.9261    |
| 100                                | 29.266                                | 20.951    | 29.152       | 20.838       | 1.0061                                | 0.7193   | 1.3004   | 0.9295    |
| 200                                | 29.676                                | 21.361    | 29.299       | 20.984       | 1.0115                                | 0.7243   | 1.3071   | 0.9362    |
| 300                                | 30.266                                | 21.951    | 29.521       | 21.206       | 1.0191                                | 0.7319   | 1.3172   | 0.9462    |
| 400                                | 30.949                                | 22.634    | 29.789       | 21.474       | 1.0283                                | 0.7415   | 1.3289   | 0.9579    |
| 500                                | 31.640                                | 23.325    | 30.095       | 21.780       | 1.0387                                | 0.7519   | 1.3427   | 0.9718    |
| 600                                | 32.301                                | 23.986    | 30.405       | 22.090       | 1.0496                                | 0.7624   | 1.3565   | 0.9856    |
| 700                                | 32.900                                | 24.585    | 30.723       | 22.408       | 1.0605                                | 0.7733   | 1.3708   | 1.9998    |
| 800                                | 33.432                                | 25.117    | 31.028       | 22.713       | 1.0710                                | 0.7842   | 1.3842   | 1.0312    |
| 900                                | 33.905                                | 25.590    | 31.321       | 23.006       | 1.0815                                | 0.7942   | 1.3976   | 1.0262    |
| 1000                               | 34.315                                | 26.000    | 31.598       | 23.283       | 1.0907                                | 0.8039   | 1.4097   | 1.0387    |
| 1100                               | 34.679                                | 26.687    | 31.862       | 23.547       | 1.0999                                | 0.8432   | 1.4214   | 1.0505    |
| 1200                               | 35.002                                | 26.976    | 32.109       | 23.794       | 1.1082                                | 0.8127   | 1.4327   | 1.0618    |
| 1300                               | 35.291                                | 27.231    | 32.343       | 24.028       | 1.1166                                | 0.8215   | 1.4432   | 1.0722    |
| 1400                               | 35.546                                | 27.457    | 32.565       | 24.250       | 1.1242                                | 0.8294   | 1.4528   | 1.0819    |
| 1500                               | 35.772                                | 27.662    | 32.774       | 24.459       | 1.1313                                | 0.8441   | 1.4620   | 1.0999    |
| 1600                               | 35.977                                | 27.725    | 33.967       | 24.652       | 1.1380                                | 0.8508   | 1.4708   | 1.1036    |
| 1700                               | 36.170                                | 27.855    | 33.151       | 24.836       | 1.1443                                | 0.8570   | 1.4788   | 1.1078    |

Таблиця Б.7 - Теплоємність кисню

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг·К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|-------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|----------|--|-----------|
|             | $\mu C_p$                          | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                        | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                      | $C'_{vm}$ |
| 0           | 29.274                             | 20.959    | 29.274       | 20.959       | 0.9148                          | 0.6548   | 1.3059   | 0.9349    |
| 100         | 29.877                             | 21.562    | 29.538       | 21.223       | 0.9232                          | 0.6632   | 1.3176   | 0.9466    |
| 200         | 30.815                             | 22.500    | 29.931       | 21.616       | 0.9353                          | 0.6753   | 1.3352   | 0.9642    |
| 300         | 31.832                             | 23.517    | 30.400       | 22.085       | 0.9500                          | 0.6900   | 1.3561   | 0.9852    |
| 400         | 32.758                             | 24.443    | 30.878       | 22.563       | 0.9551                          | 0.7051   | 1.3775   | 1.0065    |
| 500         | 33.549                             | 25.234    | 31.334       | 23.019       | 0.9793                          | 0.7193   | 1.3980   | 1.0270    |
| 600         | 34.202                             | 25.887    | 31.761       | 23.446       | 0.9927                          | 0.7327   | 1.4168   | 1.0459    |
| 700         | 34.246                             | 26.431    | 32.150       | 23.835       | 1.0048                          | 0.7448   | 1.4344   | 1.0634    |
| 800         | 35.203                             | 26.888    | 32.502       | 24.187       | 1.0157                          | 0.7557   | 1.4499   | 1.0789    |
| 900         | 35.584                             | 27.269    | 32.825       | 24.510       | 1.0258                          | 0.7658   | 1.4645   | 1.0936    |
| 1000        | 35.914                             | 27.599    | 33.118       | 24.803       | 1.0350                          | 0.7750   | 1.4775   | 1.0166    |
| 1100        | 34.216                             | 27.901    | 33.386       | 25.071       | 1.0434                          | 0.7834   | 1.4892   | 1.1183    |
| 1200        | 36.488                             | 28.173    | 33.633       | 25.318       | 1.0509                          | 0.7913   | 1.5005   | 1.1296    |
| 1300        | 36.752                             | 28.437    | 33.863       | 25.548       | 1.0580                          | 0.7984   | 1.5106   | 1.1396    |
| 1400        | 36.999                             | 28.684    | 34.076       | 25.761       | 1.0647                          | 0.8051   | 1.5202   | 1.1493    |
| 1500        | 37.242                             | 28.927    | 34.282       | 25.967       | 1.0714                          | 0.8114   | 1.5294   | 1.1585    |
| 1600        | 37.480                             | 28.165    | 34.474       | 26.159       | 1.0773                          | 0.8173   | 1.5378   | 1.1669    |
| 1700        | 37.715                             | 29.400    | 34.658       | 26.343       | 1.0831                          | 0.8231   | 1.5462   | 1.1750    |

Таблиця Б.8 – Теплоємність азоту

| Температура | Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К) |           |              |              | Масова теплоємність, кДж/(кг·К) |          | Об'ємна теплоємність, кДж/(см <sup>3</sup> ·К) |           |
|-------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|----------|--|-----------|
|             | $\mu C_p$                          | $\mu C_v$ | $\mu C_{pm}$ | $\mu C_{vm}$ | $C_{pm}$                        | $C_{vm}$ | $C'_{pm}$                                      | $C'_{vm}$ |
| 0           | 29.115                             | 20.800    | 29.115       | 20.800       | 1.0392                          | 0.7427   | 1.2987   | 0.9278    |
| 100         | 29.199                             | 20.884    | 29.144       | 20.829       | 1.0404                          | 0.7427   | 1.3004   | 0.9295    |
| 200         | 29.471                             | 21.156    | 29.228       | 20.913       | 1.0434                          | 0.7465   | 1.3038   | 0.9328    |
| 300         | 29.952                             | 21.637    | 29.383       | 21.068       | 1.0488                          | 0.7519   | 1.3109   | 0.9399    |
| 400         | 30.576                             | 22.261    | 29.601       | 21.286       | 1.0567                          | 0.7691   | 1.3205   | 0.9496    |
| 500         | 31.250                             | 22.935    | 29.864       | 21.549       | 1.0660                          | 0.7792   | 1.3322   | 0.9613    |
| 600         | 31.920                             | 23.605    | 30.149       | 21.834       | 1.0760                          | 0.7900   | 1.3452   | 0.9743    |
| 700         | 32.540                             | 24.225    | 30.452       | 22.136       | 1.0869                          | 0.8005   | 1.3586   | 1.9877    |
| 800         | 33.101                             | 24.786    | 30.748       | 22.433       | 1.0974                          | 0.8110   | 1.3716   | 1.0006    |
| 900         | 33.599                             | 25.284    | 31.037       | 22.722       | 1.1078                          | 0.8210   | 1.3845   | 1.0136    |
| 1000        | 34.039                             | 25.724    | 31.313       | 22.998       | 1.1179                          | 0.8210   | 1.3971   | 1.0178    |
| 1100        | 34.424                             | 26.109    | 31.577       | 23.262       | 1.1271                          | 0.8302   | 1.4089   | 1.0379    |
| 1200        | 34.773                             | 26.448    | 31.828       | 23.513       | 1.1359                          | 0.8395   | 1.4202   | 1.0492    |
| 1300        | 35.070                             | 26.745    | 32.067       | 23.752       | 1.1447                          | 0.8478   | 1.4306   | 1.0597    |
| 1400        | 35.330                             | 27.005    | 32.293       | 23.978       | 1.1526                          | 0.8558   | 1.4407   | 1.0697    |
| 1500        | 35.556                             | 27.231    | 32.502       | 24.187       | 1.1602                          | 0.8633   | 1.4499   | 1.0789    |
| 1600        | 35.757                             | 27.432    | 32.899       | 24.384       | 1.1673                          | 0.8704   | 1.4587   | 1.0877    |
| 1700        | 35.937                             | 27.612    | 32.883       | 24.568       | 1.1736                          | 0.8771   | 1.461  | 1.0961    |



Інтерполяційні формули для обчислення  
масових і об'ємних теплоємностей деяких газів в межах 0 – 1250°C

| Газ              | Масова теплоємність,<br>кДж/(кг·К)   | Об'ємна теплоємність,<br>кДж/(м <sup>3</sup> ·К)   |
|------------------|--|--|
| Повітря          | $C_p = 0,9952 + 9,349 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C_v = 0,7084 + 9,349 \cdot t \cdot 10^{-5}$     | $C'_p = 1,287 + 1,209 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C'_v = 0,9161 + 1,209 \cdot t \cdot 10^{-4}$    |
| N <sub>2</sub>   | $C_p = 1,0258 + 8,382 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C_v = 0,7289 + 8,382 \cdot t \cdot 10^{-5}$     | $C'_p = 1,2833 + 1,049 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C'_v = 0,9123 + 1,049 \cdot t \cdot 10^{-4}$   |
| O <sub>2</sub>   | $C_p = 0,9127 + 1,2724 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C_v = 0,6527 + 1,2724 \cdot t \cdot 10^{-4}$   | $C'_p = 1,3046 + 1,8183 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C'_v = 0,9337 + 1,8183 \cdot t \cdot 10^{-4}$ |
| CO               | $C_p = 1,0304 + 9,575 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C_v = 0,7335 + 9,575 \cdot t \cdot 10^{-5}$     | $C'_p = 1,2883 + 1,1966 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C'_v = 0,9173 + 1,1966 \cdot t \cdot 10^{-4}$ |
| CO <sub>2</sub>  | $C_p = 0,8725 + 2,4053 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C_v = 0,6837 + 2,4053 \cdot t \cdot 10^{-4}$   | $C'_p = 1,725 + 4,756 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C'_v = 1,354 + 4,756 \cdot t \cdot 10^{-5}$     |
| SO <sub>2</sub>  | $C_p = 0,6314 + 1,554 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C_v = 0,5016 + 1,554 \cdot t \cdot 10^{-4}$     | $C'_p = 1,8472 + 4,547 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C'_v = 1,4764 + 4,547 \cdot t \cdot 10^{-5}$   |
| H <sub>2</sub> O | $C_p = 1,84 + 2,9278 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C_v = 1,3783 + 2,9878 \cdot t \cdot 10^{-4}$     | $C'_p = 1,48 + 2,355 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C'_v = 1,105 + 2,355 \cdot t \cdot 10^{-4}$      |
| H <sub>2</sub>   | $C_p = 14,2494 + 5,9574 \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>$C_v = 10,1241 + 5,9574 \cdot t \cdot 10^{-4}$ | $C'_p = 1,2803 + 5,355 \cdot t \cdot 10^{-5}$<br>$C'_v = 0,9094 + 5,355 \cdot t \cdot 10^{-5}$   |

Додаток Г

Значення теплоємності  $C_p$  води і водяної пари на нижній та верхній граничних кривих, кДж/(кг·К)

| Температура насичення | Вода      | Пара       | Температура насичення | Вода      | Пара       | Температура насичення | Вода      | Пара       |
|-----------------------|-----------|------------|-----------------------|-----------|------------|-----------------------|-----------|------------|
| t                     | $C'_{ps}$ | $C''_{ps}$ | t                     | $C'_{ps}$ | $C''_{ps}$ | t                     | $C'_{ps}$ | $C''_{ps}$ |
| 0,01                  | 4,218     | 1,87       | 130                   | 4,264     | 2,27       | 260                   | 4,981     | 4,31       |
| 10                    | 4,193     | 1,88       | 140                   | 4,286     | 2,34       | 270                   | 5,118     | 4,66       |
| 20                    | 4,182     | 1,88       | 150                   | 4,311     | 2,42       | 280                   | 5,28      | 5,09       |
| 30                    | 4,178     | 1,89       | 160                   | 4,340     | 2,52       | 290                   | 5,49      | 5,60       |
| 40                    | 4,179     | 1,90       | 170                   | 4,372     | 2,62       | 300                   | 5,75      | 6,22       |
| 50                    | 4,181     | 1,92       | 180                   | 4,409     | 2,73       | 310                   | 6,10      | 7,06       |
| 60                    | 4,184     | 1,95       | 190                   | 4,451     | 2,86       | 320                   | 6,56      | 8,25       |
| 70                    | 4,189     | 1,98       | 200                   | 4,498     | 3,00       | 330                   | 7,21      | 9,88       |
| 80                    | 4,196     | 2,01       | 210                   | 4,552     | 3,15       | 340                   | (8,16)    | (12,39)    |
| 90                    | 4,205     | 2,05       | 220                   | 4,614     | 3,32       | 350                   | (9,80)    | (17,25)    |
| 100                   | 4,217     | 2,09       | 230                   | 4,686     | 3,53       | 360                   | (13,98)   | (29,31)    |
| 110                   | 4,230     | 2,14       | 240                   | 4,769     | 3,75       | 370                   | (40,32)   | (97,13)    |
| 120                   | 4,245     | 2,20       | 250                   | 4,866     | 4,01       |                       |           |            |

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення

| Р,<br>бар | t, °C  | v',<br>м³/кг | v'',<br>м³/кг | ρ'',<br>кг/м³ | h',<br>кДж/кг | h'',<br>кДж/кг | г,<br>кДж/кг |
|-----------|--------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|--------------|
| 1         | 2      | 3            | 4             | 5             | 6             | 7              | 8            |
| 0,010     | 6,92   | 0,0010001    | 129,9         | 0,00770       | 29,32         | 2513           | 2484         |
| 0,015     | 13,038 | 0,0010007    | 87,9          | 0,01138       | 54,75         | 2525           | 2470         |
| 0,020     | 17,514 | 0,0010014    | 66,97         | 0,01493       | 73,52         | 2533           | 2459         |
| 0,025     | 21,094 | 0,0010021    | 54,24         | 0,01843       | 88,5          | 2539           | 2451         |
| 0,030     | 24,097 | 0,0010028    | 45,66         | 0,02190       | 101,04        | 2545           | 2444         |
| 0,035     | 26,692 | 0,0010035    | 39,48         | 0,02533       | 111,86        | 2550           | 2438         |
| 0,040     | 28,979 | 0,0010041    | 34,81         | 0,02873       | 121,42        | 2554           | 2433         |
| 0,045     | 31,033 | 0,0010047    | 31,13         | 0,03211       | 130,00        | 2557           | 2427         |
| 0,050     | 32,88  | 0,0010053    | 28,19         | 0,03547       | 137,83        | 2561           | 2423         |
| 0,055     | 34,59  | 0,0010059    | 25,77         | 0,03880       | 144,95        | 2564           | 2419         |
| 0,060     | 36,18  | 0,0010064    | 23,74         | 0,04212       | 151,50        | 2567           | 2415         |
| 0,065     | 37,65  | 0,0010070    | 22,02         | 0,04542       | 157,68        | 2570           | 2412         |
| 0,070     | 39,03  | 0,0010075    | 20,53         | 0,04871       | 163,43        | 2572           | 2409         |
| 0,075     | 40,32  | 0,0010080    | 19,23         | 0,05198       | 168,8         | 2574           | 24,05        |
| 0,080     | 41,54  | 0,0010085    | 18,1          | 0,05525       | 173,9         | 2576           | 2402         |
| 0,085     | 42,69  | 0,0010090    | 17,1          | 0,05849       | 178,7         | 2578           | 2399         |
| 0,090     | 43,79  | 0,0010094    | 16,2          | 0,06172       | 183,3         | 2580           | 2397         |
| 0,095     | 44,84  | 0,0010098    | 15,4          | 0,06493       | 187,7         | 2582           | 2394         |
| 0,10      | 45,84  | 0,0010103    | 14,68         | 0,06812       | 191,9         | 2584           | 2392         |
| 0,11      | 47,72  | 0,0010111    | 13,4          | 0,07462       | 199,7         | 2588           | 2388         |
| 0,12      | 49,45  | 0,0010119    | 12,35         | 0,08097       | 207           | 2591           | 2384         |
| 0,13      | 51,07  | 0,0010126    | 11,46         | 0,08726       | 213,8         | 2594           | 2380         |
| 0,14      | 52,58  | 0,0010133    | 10,69         | 0,09354       | 220,1         | 2596           | 2376         |
| 0,15      | 54     | 0,0010140    | 10,02         | 0,0998        | 226,1         | 2599           | 2373         |
| 0,16      | 55,34  | 0,0010147    | 9,429         | 0,106         | 231,7         | 2601           | 2369         |
| 0,17      | 56,61  | 0,0010153    | 8,909         | 0,1123        | 236,9         | 2603           | 2366         |
| 0,18      | 57,82  | 0,0010159    | 8,444         | 0,1185        | 241,9         | 2605           | 2363         |
| 0,19      | 58,98  | 0,0010165    | 8,025         | 0,1247        | 246,7         | 2607           | 2360         |
| 0,20      | 60,08  | 0,0010171    | 7,647         | 0,1308        | 251,4         | 2609           | 2358         |
| 0,21      | 61,14  | 0,0010177    | 7,304         | 0,1369        | 255,9         | 2611           | 2355         |
| 0,22      | 62,16  | 0,0010183    | 6,992         | 0,143         | 260,2         | 2613           | 2353         |
| 0,23      | 63,14  | 0,0010188    | 6,708         | 0,1491        | 264,3         | 2614           | 2350         |
| 0,24      | 64,08  | 0,0101930    | 6,445         | 0,1551        | 268,2         | 2616           | 2348         |
| 0,25      | 64,99  | 0,0010199    | 6,202         | 0,1612        | 272           | 2618           | 2346         |
| 0,26      | 65,88  | 0,0010204    | 5,977         | 0,1673        | 275,7         | 2620           | 2344         |
| 0,27      | 66,73  | 0,0010209    | 5,769         | 0,1733        | 279,3         | 2621           | 2342         |
| 0,28      | 67,55  | 0,0010214    | 5,576         | 0,1793        | 282,7         | 2623           | 2640         |
| 0,29      | 68,35  | 0,0010218    | 5,395         | 0,1853        | 286           | 2624           | 2338         |
| 0,30      | 69,12  | 0,0010222    | 5,226         | 0,1913        | 289,3         | 2625           | 2336         |
| 0,32      | 70,6   | 0,0010232    | 4,922         | 0,20322       | 295,5         | 2627           | 2332         |
| 0,34      | 72,02  | 0,001024     | 4,65          | 0,2151        | 301,5         | 2630           | 2328         |

## Продовження таблиці Д.1

| 1    | 2      | 3         | 4      | 5      | 6     | 7    | 8    |
|------|--------|-----------|--------|--------|-------|------|------|
| 0,36 | 73,36  | 0,0010248 | 4,407  | 0,2269 | 307,1 | 2632 | 2325 |
| 0,38 | 74,64  | 0,0010256 | 4,189  | 0,2387 | 312,5 | 2634 | 2322 |
| 0,4  | 75,88  | 0,0010264 | 3,994  | 0,2504 | 317,7 | 2636 | 2318 |
| 0,45 | 78,75  | 0,0010282 | 3,754  | 0,2797 | 329,6 | 2641 | 2311 |
| 0,45 | 78,75  | 0,0010282 | 3,754  | 0,2797 | 329,6 | 2641 | 2311 |
| 0,5  | 81,35  | 0,0010299 | 3,239  | 0,3087 | 340,6 | 2645 | 2204 |
| 0,55 | 83,74  | 0,0010315 | 2,963  | 0,3375 | 350,7 | 2649 | 2298 |
| 0,6  | 85,95  | 0,001033  | 2,732  | 0,3661 | 360   | 2653 | 2293 |
| 0,65 | 88,02  | 0,0010345 | 2,534  | 0,3946 | 368,6 | 2657 | 2288 |
| 0,7  | 89,97  | 0,0010359 | 2,364  | 0,423  | 376,8 | 2660 | 2283 |
| 0,75 | 91,8   | 0,0010372 | 2,216  | 0,4512 | 384,5 | 2663 | 2278 |
| 0,8  | 93,52  | 0,0010385 | 2,087  | 0,4792 | 391,8 | 2665 | 2273 |
| 0,85 | 95,16  | 0,0010397 | 1,972  | 0,5071 | 398,7 | 2668 | 2269 |
| 0,9  | 96,72  | 0,0010409 | 1,869  | 0,535  | 405,3 | 2670 | 2265 |
| 0,95 | 98,21  | 0,0010421 | 1,777  | 0,5627 | 411,5 | 2673 | 2261 |
| 1,00 | 99,64  | 0,0010432 | 1,694  | 0,5903 | 417,4 | 2675 | 2258 |
| 1,1  | 102,32 | 0,0010452 | 1,55   | 0,6453 | 428,9 | 2679 | 2250 |
| 1,2  | 104,81 | 0,0010472 | 1,429  | 0,6999 | 439,4 | 2683 | 2244 |
| 1,3  | 107,14 | 0,0010492 | 1,325  | 0,7545 | 449,2 | 2687 | 2238 |
| 1,4  | 109,33 | 0,001051  | 1,236  | 0,8088 | 458,5 | 2690 | 2232 |
| 1,5  | 111,38 | 0,0010527 | 1,159  | 0,8627 | 467,2 | 2693 | 2226 |
| 1,6  | 113,32 | 0,0010543 | 1,091  | 0,9164 | 475,4 | 2696 | 2221 |
| 1,7  | 115,17 | 0,0010559 | 1,031  | 0,9699 | 483,2 | 2699 | 2216 |
| 1,8  | 116,94 | 0,0010575 | 0,9773 | 1,023  | 490,7 | 2702 | 2211 |
| 1,9  | 118,62 | 0,0010591 | 0,929  | 1,076  | 497,9 | 2704 | 2206 |
| 2    | 120,23 | 0,0010605 | 0,8854 | 1,129  | 504,8 | 2707 | 2202 |
| 2,1  | 121,78 | 0,0010619 | 0,8459 | 1,182  | 511,4 | 2709 | 2198 |
| 2,2  | 123,27 | 0,0010633 | 0,8098 | 1,235  | 517,8 | 2711 | 2193 |
| 2,3  | 124,71 | 0,0010646 | 0,7768 | 1,287  | 524   | 2713 | 2189 |
| 2,4  | 126,09 | 0,0010659 | 0,7465 | 1,34   | 529,8 | 2715 | 2185 |
| 2,5  | 127,43 | 0,0010672 | 0,7185 | 1,392  | 535,4 | 2717 | 2182 |
| 2,6  | 128,73 | 0,0010685 | 0,6925 | 1,444  | 540,9 | 2719 | 2178 |
| 2,7  | 129,98 | 0,0010697 | 0,6684 | 1,496  | 546,2 | 2721 | 2175 |
| 2,8  | 131,2  | 0,0010709 | 0,6461 | 1,548  | 551,4 | 2722 | 2171 |
| 2,9  | 132,39 | 0,0010721 | 0,6253 | 1,599  | 556,5 | 2724 | 2167 |
| 3    | 133,54 | 0,0010733 | 0,6057 | 1,651  | 561,4 | 2725 | 2164 |
| 3,1  | 134,66 | 0,0010744 | 0,5873 | 1,703  | 566,3 | 2727 | 2161 |
| 3,2  | 135,75 | 0,0010754 | 0,5701 | 1,754  | 571,1 | 2728 | 2157 |
| 3,3  | 136,82 | 0,0010765 | 0,5539 | 1,85   | 575,7 | 2730 | 2154 |
| 3,4  | 137,86 | 0,0010776 | 0,5386 | 1,857  | 580,2 | 2731 | 2151 |
| 3,5  | 138,88 | 0,0010786 | 0,5241 | 1,908  | 584,5 | 2732 | 2148 |
| 3,6  | 139,87 | 0,0010797 | 0,5104 | 1,959  | 588,7 | 2734 | 2145 |
| 3,7  | 140,84 | 0,0010807 | 0,4975 | 2,01   | 592,8 | 2735 | 2142 |
| 3,8  | 141,79 | 0,0010817 | 0,4852 | 2,061  | 596,8 | 2736 | 2139 |
| 3,9  | 142,71 | 0,0010827 | 0,4735 | 2,112  | 600,8 | 2737 | 2136 |
| 4    | 143,62 | 0,0010836 | 0,4624 | 2,163  | 604,7 | 2738 | 2133 |

## Продовження таблиці Д.1

| 1    | 2      | 3         | 4      | 5     | 6     | 7    | 8    |
|------|--------|-----------|--------|-------|-------|------|------|
| 4,1  | 144,51 | 0,0010845 | 0,4518 | 2,213 | 608,5 | 2740 | 2131 |
| 4,2  | 145,32 | 0,0010855 | 0,4416 | 2,264 | 612,3 | 2741 | 2129 |
| 4,3  | 146,25 | 0,0010865 | 0,4319 | 2,315 | 616,1 | 2742 | 2126 |
| 4,4  | 147,09 | 0,0010874 | 0,4227 | 2,366 | 619,8 | 2743 | 2123 |
| 4,5  | 147,92 | 0,0010883 | 0,4139 | 2,416 | 623,4 | 2744 | 2121 |
| 4,6  | 148,73 | 0,0010892 | 0,4054 | 2,467 | 626,9 | 2745 | 2118 |
| 4,7  | 149,53 | 0,0010901 | 0,3973 | 2,517 | 630,3 | 2746 | 2116 |
| 4,8  | 150,31 | 0,001091  | 0,3895 | 2,568 | 633,7 | 2747 | 2113 |
| 4,9  | 151,08 | 0,0010918 | 0,3819 | 2,618 | 636,9 | 2748 | 2111 |
| 5    | 151,84 | 0,0010927 | 0,3747 | 2,669 | 640,1 | 2749 | 2109 |
| 5,2  | 153,32 | 0,0010943 | 0,3612 | 2,769 | 646,5 | 2750 | 2104 |
| 5,4  | 154,76 | 0,001096  | 0,3485 | 2,869 | 652,7 | 2752 | 2099 |
| 5,6  | 156,16 | 0,0010976 | 0,3368 | 2,969 | 658,8 | 2754 | 2095 |
| 5,6  | 156,16 | 0,0010976 | 0,3368 | 2,969 | 658,8 | 2754 | 2095 |
| 5,8  | 157,52 | 0,0010992 | 0,3258 | 3,069 | 664,7 | 2755 | 2090 |
| 6    | 158,84 | 0,0011007 | 0,3156 | 3,16  | 670,5 | 2757 | 2086 |
| 6,2  | 160,12 | 0,0011022 | 0,306  | 3,268 | 676   | 2758 | 2082 |
| 6,4  | 161,37 | 0,0011037 | 0,297  | 3,367 | 681,5 | 2760 | 2078 |
| 6,6  | 162,59 | 0,0011052 | 0,2885 | 3,467 | 686,9 | 2761 | 2074 |
| 6,8  | 163,79 | 0,0011066 | 0,2804 | 3,566 | 692,1 | 2762 | 2070 |
| 7    | 164,96 | 0,0011081 | 0,2728 | 3,666 | 697,2 | 2764 | 2067 |
| 7,2  | 166,1  | 0,0011095 | 0,2656 | 3,765 | 702,2 | 2765 | 2063 |
| 7,4  | 167,21 | 0,0011109 | 0,2588 | 3,864 | 707,1 | 2766 | 2059 |
| 7,6  | 168,3  | 0,0011123 | 0,2523 | 3,963 | 711,8 | 2767 | 2055 |
| 7,8  | 169,37 | 0,0011136 | 0,2462 | 4,062 | 716,4 | 2768 | 2052 |
| 8    | 170,42 | 0,0011149 | 0,2403 | 4,161 | 720,9 | 2769 | 2048 |
| 8,2  | 171,44 | 0,0011162 | 0,2347 | 4,26  | 725,4 | 2770 | 2045 |
| 8,4  | 172,44 | 0,0011175 | 0,2294 | 4,359 | 729,8 | 2771 | 2041 |
| 8,6  | 173,43 | 0,0011187 | 0,2243 | 4,458 | 734,2 | 2772 | 2038 |
| 8,8  | 174,4  | 0,00112   | 0,2195 | 4,556 | 738,6 | 2773 | 2034 |
| 9    | 175,35 | 0,0011213 | 0,2149 | 4,654 | 742,8 | 2774 | 2031 |
| 9,2  | 176,29 | 0,0011225 | 0,2104 | 4,753 | 746,9 | 2775 | 2028 |
| 9,4  | 177,21 | 0,0011237 | 0,2061 | 4,852 | 750,9 | 2776 | 2025 |
| 9,6  | 178,12 | 0,0011249 | 0,202  | 4,949 | 754,8 | 2777 | 2022 |
| 9,8  | 179,01 | 0,0011261 | 0,1982 | 5,045 | 758,8 | 2778 | 2019 |
| 10   | 179,88 | 0,0011273 | 0,1946 | 5,139 | 762,7 | 2778 | 2015 |
| 10,5 | 182,00 | 0,0011303 | 0,1856 | 5,388 | 772,1 | 2779 | 2007 |
| 11   | 184,05 | 0,0011331 | 0,1775 | 5,634 | 781,1 | 2781 | 2000 |
| 11,5 | 186,04 | 0,0011358 | 0,1701 | 5,879 | 789,8 | 2783 | 1993 |
| 12   | 187,95 | 0,0011385 | 0,1633 | 6,124 | 798,3 | 2785 | 1987 |
| 12,5 | 189,8  | 0,0011412 | 0,157  | 6,369 | 806,5 | 2786 | 1980 |
| 13   | 191,6  | 0,0011438 | 0,1512 | 6,614 | 814,5 | 2787 | 1973 |
| 13,5 | 193,34 | 0,0011464 | 0,1458 | 6,859 | 822,3 | 2789 | 1967 |
| 14   | 195,04 | 0,001149  | 0,1408 | 7,103 | 830   | 2790 | 1960 |
| 14,5 | 196,68 | 0,0011515 | 0,1361 | 7,348 | 837,4 | 2791 | 1954 |
| 15   | 198,28 | 0,0011539 | 0,1317 | 7,593 | 844,6 | 2792 | 1947 |

Продовження таблиці Д.1

| 1    | 2      | 3         | 4       | 5      | 6      | 7    | 8    |
|------|--------|-----------|---------|--------|--------|------|------|
| 15,5 | 199,84 | 0,0011563 | 0,1276  | 7,837  | 851,5  | 2793 | 1941 |
| 16   | 201,36 | 0,0011586 | 0,1238  | 8,08   | 858,3  | 2793 | 1935 |
| 16,5 | 202,85 | 0,0011609 | 0,1201  | 8,325  | 865    | 2794 | 1929 |
| 17   | 204,3  | 0,0011632 | 0,1167  | 8,569  | 871,6  | 2795 | 1923 |
| 17,5 | 205,72 | 0,0011655 | 0,1135  | 8,812  | 878,1  | 2796 | 1918 |
| 18   | 207,1  | 0,0011678 | 0,1104  | 9,058  | 884,4  | 2796 | 1912 |
| 18,5 | 208,45 | 0,0011700 | 0,1075  | 9,303  | 890,6  | 2797 | 1907 |
| 19   | 209,78 | 0,0011722 | 0,1047  | 9,549  | 896,6  | 2798 | 1901 |
| 19,5 | 211,09 | 0,0011744 | 0,1021  | 9,795  | 902,6  | 2799 | 1896 |
| 20   | 212,37 | 0,0011766 | 0,09958 | 10,041 | 908,5  | 2799 | 1891 |
| 20,5 | 213,62 | 0,0011788 | 0,09719 | 10,29  | 914,2  | 2800 | 1886 |
| 21   | 214,84 | 0,0011809 | 0,09492 | 10,54  | 919,8  | 2800 | 1880 |
| 21,5 | 216,05 | 0,001183  | 0,09276 | 10,78  | 925,4  | 2800 | 1875 |
| 22   | 217,24 | 0,0011851 | 0,09068 | 11,03  | 930,9  | 2801 | 1870 |
| 19,5 | 211,09 | 0,0011744 | 0,1021  | 9,795  | 902,6  | 2799 | 1896 |
| 22,5 | 218,41 | 0,0011872 | 0,08869 | 11,28  | 936,3  | 2801 | 1865 |
| 23   | 219,5  | 0,0011892 | 0,8679  | 11,52  | 941,5  | 2801 | 1860 |
| 23,5 | 220,67 | 0,0011912 | 0,08498 | 11,77  | 946,7  | 2802 | 1855 |
| 24   | 221,77 | 0,0011932 | 0,8324  | 12,01  | 951,8  | 2802 | 1850 |
| 24,5 | 222,85 | 0,0011952 | 0,08156 | 12,26  | 956,8  | 2802 | 1845 |
| 25   | 223,93 | 0,0011972 | 0,07993 | 12,51  | 961,8  | 2802 | 1840 |
| 25,5 | 224,99 | 0,0011992 | 0,07837 | 12,76  | 966,8  | 2803 | 1836 |
| 26   | 226,03 | 0,0012012 | 0,7688  | 13,01  | 971,7  | 2803 | 1831 |
| 26,5 | 227,05 | 0,0012031 | 0,07545 | 13,25  | 976,6  | 2803 | 1820 |
| 27   | 228,06 | 0,001205  | 0,07406 | 13,5   | 981,3  | 2803 | 1822 |
| 27,5 | 229,06 | 0,0012069 | 0,07271 | 13,75  | 985,9  | 2803 | 1817 |
| 28   | 230,04 | 0,0012088 | 0,07141 | 14     | 990,4  | 2803 | 1813 |
| 28,5 | 231,01 | 0,0012107 | 0,07016 | 14,25  | 994,9  | 2803 | 1808 |
| 29   | 231,96 | 0,0012126 | 0,06895 | 14,5   | 999,4  | 2803 | 1804 |
| 29,5 | 232,9  | 0,0012145 | 0,06778 | 14,75  | 1003,8 | 2804 | 1800 |
| 30   | 233,83 | 0,0012163 | 0,06665 | 15     | 1008,3 | 2804 | 1796 |
| 31   | 235,66 | 0,0012201 | 0,0645  | 15,5   | 1016,9 | 2804 | 1787 |
| 32   | 237,44 | 0,0012238 | 0,06246 | 16,01  | 1025,3 | 2803 | 1778 |
| 33   | 239,18 | 0,0012274 | 0,06055 | 16,52  | 1033,7 | 2803 | 1769 |
| 34   | 240,88 | 0,001231  | 0,05875 | 17,02  | 1041,9 | 2803 | 1761 |
| 35   | 242,54 | 0,0012345 | 0,05704 | 17,53  | 1049,8 | 2803 | 1753 |
| 36   | 244,16 | 0,001238  | 0,05543 | 18,04  | 1057,5 | 2802 | 1745 |
| 37   | 245,75 | 0,0012415 | 0,05391 | 18,55  | 1065,2 | 2802 | 1737 |
| 38   | 247,31 | 0,001245  | 0,05246 | 19,06  | 1072,7 | 2802 | 1729 |
| 39   | 248,84 | 0,0012485 | 0,05108 | 19,58  | 1080,2 | 2801 | 1721 |
| 40   | 250,33 | 0,001252  | 0,04977 | 20,09  | 1087,5 | 2801 | 1713 |
| 41   | 251,8  | 0,0012554 | 0,04852 | 20,61  | 1094,7 | 2800 | 1705 |
| 42   | 253,24 | 0,0012588 | 0,04732 | 21,13  | 1101,7 | 2800 | 1698 |
| 43   | 254,66 | 0,0012622 | 0,04617 | 21,66  | 1108,5 | 2799 | 1691 |
| 44   | 256,05 | 0,0012656 | 0,04508 | 22,18  | 1115,3 | 2798 | 1683 |
| 45   | 257,41 | 0,001269  | 0,04404 | 22,71  | 1122,1 | 2798 | 1676 |

Продовження таблиці Д.1

| 1  | 2      | 3         | 4       | 5     | 6      | 7    | 8      |
|----|--------|-----------|---------|-------|--------|------|--------|
| 46 | 258,75 | 0,0012724 | 0,04305 | 23,23 | 1128,8 | 2797 | 1668   |
| 47 | 260,07 | 0,0012757 | 0,0421  | 23,76 | 1135,4 | 2796 | 1661   |
| 48 | 261,37 | 0,001279  | 0,04118 | 24,29 | 1141,8 | 2796 | 1654   |
| 49 | 262,65 | 0,0012824 | 0,04029 | 24,82 | 1148,2 | 2795 | 1647   |
| 50 | 263,91 | 0,0012857 | 0,03944 | 25,35 | 1154,4 | 2794 | 1640   |
| 51 | 265,15 | 0,001289  | 0,03863 | 25,89 | 1160,6 | 2793 | 1632   |
| 52 | 266,38 | 0,0012923 | 0,03784 | 26,43 | 1166,8 | 2792 | 1625   |
| 53 | 267,58 | 0,0012955 | 0,03708 | 26,97 | 1172,9 | 2791 | 1618   |
| 54 | 268,77 | 0,0012988 | 0,03635 | 27,51 | 1179   | 2791 | 1612   |
| 55 | 269,94 | 0,0013021 | 0,03564 | 28,06 | 1184,9 | 2790 | 1604,6 |
| 56 | 271,1  | 0,0013054 | 0,03495 | 28,61 | 1190,8 | 2789 | 1597,7 |
| 57 | 272,24 | 0,0013087 | 0,03429 | 29,16 | 1196,6 | 2788 | 1591   |
| 58 | 273,6  | 0,001312  | 0,03365 | 29,72 | 1202,4 | 2786 | 1584,3 |
| 59 | 274,47 | 0,0013152 | 0,03303 | 30,28 | 1208,2 | 2786 | 1577,6 |
| 60 | 275,56 | 0,0013185 | 0,03243 | 30,84 | 1213,9 | 2785 | 1570,8 |
| 61 | 276,64 | 0,0013217 | 0,03185 | 31,4  | 1219,6 | 2784 | 1564,1 |
| 62 | 277,71 | 0,001325  | 0,0313  | 31,95 | 1225,1 | 2782 | 1557,4 |
| 63 | 278,76 | 0,0013282 | 0,03076 | 32,51 | 1230,6 | 2781 | 1550,7 |
| 64 | 279,8  | 0,0013314 | 0,03024 | 33,07 | 1236   | 2780 | 1544,1 |
| 65 | 280,83 | 0,0013347 | 0,02973 | 33,64 | 1241,3 | 2779 | 1537,5 |
| 66 | 281,85 | 0,001338  | 0,02923 | 34,21 | 1246,6 | 2778 | 1530,9 |
| 67 | 282,86 | 0,0013412 | 0,02874 | 34,79 | 1251,8 | 2776 | 1524,4 |
| 68 | 283,85 | 0,0013445 | 0,02827 | 35,37 | 1257   | 2775 | 1517,9 |
| 69 | 284,83 | 0,0013478 | 0,02782 | 35,95 | 1262,2 | 2773 | 1511,4 |
| 70 | 285,8  | 0,001351  | 0,02737 | 36,54 | 1267,4 | 2772 | 1504,9 |
| 71 | 286,76 | 0,0013542 | 0,02694 | 37,12 | 1272,5 | 2771 | 1498,4 |
| 72 | 287,71 | 0,0013574 | 0,02652 | 37,71 | 1277,6 | 2769 | 1492   |
| 73 | 288,65 | 0,0013607 | 0,02611 | 38,3  | 1282,6 | 2768 | 1485,6 |
| 74 | 289,58 | 0,001364  | 0,02571 | 38,89 | 1287,6 | 2767 | 1479,2 |
| 75 | 290,5  | 0,0013673 | 0,02532 | 39,49 | 1292,7 | 2766 | 1472,8 |
| 76 | 291,41 | 0,0013706 | 0,02494 | 40,09 | 1297,7 | 2764 | 1466,4 |
| 77 | 292,32 | 0,0013739 | 0,02457 | 40,7  | 1302,6 | 2763 | 1460   |
| 78 | 293,22 | 0,0013772 | 0,02421 | 41,3  | 1307,4 | 2761 | 1453,7 |
| 79 | 294,1  | 0,0013805 | 0,02386 | 41,91 | 1312,2 | 2759 | 1447,4 |
| 80 | 294,98 | 0,0013838 | 0,02352 | 42,52 | 1317   | 2758 | 1441,1 |
| 81 | 295,85 | 0,0013872 | 0,02318 | 43,14 | 1321,8 | 2757 | 1434,8 |
| 82 | 296,71 | 0,0013905 | 0,02285 | 43,76 | 1326,6 | 2755 | 1428,5 |
| 83 | 297,56 | 0,0013938 | 0,02253 | 44,38 | 1331,4 | 2753 | 1422,2 |
| 84 | 298,4  | 0,0013972 | 0,02222 | 45    | 1336,1 | 2752 | 1416   |
| 85 | 299,24 | 0,0014005 | 0,02192 | 45,62 | 1340,8 | 2751 | 1409,8 |
| 86 | 300,07 | 0,0014039 | 0,02162 | 46,25 | 1345,4 | 2749 | 1403,7 |
| 87 | 300,89 | 0,0014073 | 0,02132 | 46,9  | 1350,1 | 2747 | 1397,6 |
| 88 | 301,71 | 0,0014106 | 0,02103 | 47,55 | 1354,7 | 2746 | 1391,5 |
| 89 | 302,52 | 0,001414  | 0,02075 | 48,19 | 1359,2 | 2744 | 1385,4 |
| 90 | 303,32 | 0,0014174 | 0,02048 | 48,83 | 1363,7 | 2743 | 1379,3 |
| 91 | 304,11 | 0,0014208 | 0,02021 | 49,48 | 1368,2 | 2741 | 1373,2 |

## Продовження таблиці Д.1

| 1   | 2      | 3         | 4        | 5      | 6      | 7    | 8      |
|-----|--------|-----------|----------|--------|--------|------|--------|
| 92  | 304,9  | 0,0014242 | 0,01995  | 50,13  | 1372,7 | 2740 | 1367   |
| 93  | 305,67 | 0,0014276 | 0,01969  | 50,79  | 1377,1 | 2738 | 1360,9 |
| 94  | 306,45 | 0,001431  | 0,01944  | 51,45  | 1381,5 | 2736 | 1354,7 |
| 95  | 307,22 | 0,0014345 | 0,01919  | 52,11  | 1385,9 | 2734 | 1348,4 |
| 96  | 307,98 | 0,001438  | 0,01895  | 52,77  | 1390,2 | 2732 | 1342,1 |
| 97  | 308,74 | 0,0014415 | 0,01871  | 53,44  | 1394,5 | 2730 | 1335,8 |
| 98  | 309,49 | 0,001445  | 0,01848  | 54,11  | 1398,9 | 2728 | 1329,5 |
| 99  | 310,23 | 0,0014486 | 0,01825  | 54,79  | 1403,3 | 2726 | 1323,2 |
| 100 | 310,96 | 0,0014521 | 0,01803  | 55,46  | 1407,7 | 2725 | 1317   |
| 102 | 312,42 | 0,0014592 | 0,01759  | 56,85  | 1416,4 | 2721 | 1304,6 |
| 104 | 313,86 | 0,0014664 | 0,01716  | 58,27  | 1425   | 2717 | 1292,3 |
| 106 | 315,28 | 0,0014736 | 0,01675  | 59,7   | 1433,5 | 2713 | 1280   |
| 108 | 316,67 | 0,0014808 | 0,01636  | 61,13  | 1441,9 | 2709 | 1267,3 |
| 110 | 318,04 | 0,001489  | 0,01598  | 62,58  | 1450,2 | 2705 | 1255,4 |
| 112 | 319,39 | 0,001496  | 0,01561  | 64,05  | 1458,4 | 2701 | 1243   |
| 114 | 320,73 | 0,001503  | 0,01526  | 65,54  | 1466,6 | 2697 | 1230,6 |
| 116 | 322,05 | 0,001511  | 0,01491  | 67,06  | 1474,8 | 2693 | 1218,3 |
| 118 | 323,35 | 0,001519  | 0,01458  | 68,59  | 1483   | 2689 | 1205,9 |
| 120 | 324,63 | 0,001527  | 0,01426  | 70,13  | 1491,1 | 2685 | 1193,5 |
| 122 | 325,9  | 0,001535  | 0,01395  | 71,7   | 1499,2 | 2680 | 1181   |
| 124 | 327,15 | 0,001543  | 0,01364  | 73,3   | 1507,3 | 2676 | 1168,5 |
| 126 | 328,39 | 0,001551  | 0,01334  | 74,94  | 1515,4 | 2671 | 1156   |
| 128 | 329,61 | 0,001559  | 0,01305  | 76,61  | 1523,5 | 2667 | 1143,4 |
| 130 | 330,81 | 0,001567  | 0,01277  | 78,3   | 1531,5 | 2662 | 1130,8 |
| 132 | 332    | 0,001576  | 0,0125   | 80     | 1539,5 | 2658 | 1118,2 |
| 134 | 333,18 | 0,001585  | 0,01224  | 81,72  | 1547,3 | 2653 | 1105,5 |
| 136 | 334,34 | 0,001594  | 0,01198  | 83,47  | 1555,1 | 2648 | 1092,7 |
| 138 | 335,49 | 0,001602  | 0,01173  | 85,25  | 1562,9 | 2643 | 1079,9 |
| 140 | 336,63 | 0,001611  | 0,01149  | 87,03  | 1570,8 | 2638 | 1066,9 |
| 142 | 337,75 | 0,00162   | 0,01125  | 88,89  | 1578,7 | 2633 | 1053,8 |
| 144 | 338,86 | 0,001629  | 0,01101  | 90,83  | 1586,6 | 2628 | 1040,7 |
| 146 | 339,96 | 0,001638  | 0,01078  | 92,76  | 1594,5 | 2622 | 1027,6 |
| 148 | 341,04 | 0,001648  | 0,01056  | 94,69  | 1602   | 2617 | 1014,5 |
| 150 | 342,11 | 0,001658  | 0,01035  | 96,62  | 1610   | 2611 | 1001,1 |
| 152 | 343,18 | 0,001668  | 0,01014  | 98,62  | 1618   | 2606 | 987,5  |
| 154 | 344,23 | 0,001678  | 0,009928 | 100,72 | 1626   | 2600 | 973,8  |
| 156 | 345,27 | 0,001688  | 0,00972  | 102,9  | 1634   | 2594 | 960    |
| 158 | 346,3  | 0,001699  | 0,009517 | 105,1  | 1642   | 2588 | 946,1  |
| 160 | 347,32 | 0,00171   | 0,009318 | 107,3  | 1650   | 2582 | 932    |
| 162 | 348,33 | 0,001721  | 0,009124 | 109,6  | 1658   | 2576 | 917,7  |
| 164 | 349,32 | 0,001732  | 0,008934 | 111,9  | 1666   | 2569 | 903,2  |
| 166 | 350,31 | 0,001744  | 0,008747 | 114,3  | 1674   | 2562 | 888,4  |
| 168 | 351,29 | 0,001756  | 0,008563 | 116,8  | 1682   | 2555 | 873,4  |
| 170 | 352,26 | 0,001768  | 0,008382 | 119,3  | 1690   | 2548 | 858,3  |
| 172 | 353,21 | 0,001781  | 0,008203 | 121,9  | 1698   | 2541 | 843    |
| 174 | 354,17 | 0,001794  | 0,008025 | 124,6  | 1707   | 2534 | 827,4  |



## Продовження таблиці Д.1

| 1   | 2      | 3        | 4        | 5     | 6    | 7    | 8     |
|-----|--------|----------|----------|-------|------|------|-------|
| 176 | 355,11 | 0,001808 | 0,007848 | 127,4 | 1715 | 2526 | 811,4 |
| 178 | 356,04 | 0,001822 | 0,007674 | 130,3 | 1723 | 2518 | 795   |
| 180 | 356,96 | 0,001837 | 0,007504 | 133,2 | 1732 | 2510 | 778,2 |
| 182 | 357,87 | 0,001853 | 0,007336 | 136,3 | 1741 | 2502 | 761,2 |
| 184 | 358,78 | 0,00187  | 0,007169 | 139,5 | 1749 | 2493 | 743,9 |
| 186 | 359,67 | 0,001887 | 0,007003 | 142,8 | 1758 | 2484 | 726,4 |
| 188 | 360,56 | 0,001904 | 0,00684  | 146,2 | 1767 | 2475 | 708,5 |
| 190 | 361,44 | 0,001921 | 0,00668  | 149,7 | 1776 | 2466 | 690   |
| 192 | 362,31 | 0,00194  | 0,00652  | 153,4 | 1785 | 2456 | 671   |
| 194 | 363,17 | 0,001961 | 0,00636  | 157,3 | 1795 | 2446 | 651   |
| 196 | 364,02 | 0,001985 | 0,00619  | 161,6 | 1805 | 2435 | 630   |
| 198 | 364,87 | 0,00201  | 0,00602  | 166,1 | 1816 | 2423 | 607   |
| 200 | 365,71 | 0,00204  | 0,00585  | 170,9 | 1827 | 2410 | 583   |
| 202 | 366,54 | 0,00207  | 0,00568  | 176   | 1838 | 2397 | 559   |
| 204 | 367,37 | 0,0021   | 0,00551  | 181,4 | 1849 | 2383 | 534   |
| 206 | 368,18 | 0,00213  | 0,00534  | 187,2 | 1861 | 2369 | 508   |
| 208 | 368,99 | 0,00217  | 0,00516  | 193,6 | 1874 | 2353 | 479   |
| 210 | 369,79 | 0,00221  | 0,00498  | 200,7 | 1888 | 2336 | 448   |
| 212 | 370,58 | 0,00226  | 0,0048   | 208,5 | 1903 | 2316 | 413   |
| 214 | 371,4  | 0,00232  | 0,0046   | 217,4 | 1920 | 2294 | 374   |
| 216 | 372,2  | 0,00239  | 0,00436  | 229,3 | 1940 | 2269 | 329   |
| 218 | 372,9  | 0,00249  | 0,00402  | 248,7 | 1965 | 2233 | 268   |
| 220 | 373,7  | 0,00273  | 0,00367  | 272,5 | 2016 | 2168 | 152   |

Додаток Е

Таблиця Е.1 - Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $C_p, \text{кДж/кг}^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м}^\circ\text{C}$ | $a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | Pr    |
|---------------------|-----------------------|------------------------------------|---|-------------------------------------|---|---------------------------------------|-------|
| -50                 | 1,548                 | 1,013                              | 2,04  | 12,7                                | 14,6  | 9,23                                  | 0,728 |
| -40                 | 1,515                 | 1,013                              | 212   | 13,8                                | 15,2  | 10,04                                 | 0,728 |
| -30                 | 1,453                 | 1,013                              | 2,20  | 14,9                                | 15,7  | 10,80                                 | 0,723 |
| -20                 | 1,395                 | 1,009                              | 2,28  | 16,2                                | 16,2  | 12,79                                 | 0,716 |
| -10                 | 1,342                 | 1,009                              | 2,36  | 17,4                                | 16,7  | 12,43                                 | 0,712 |
| 0                   | 1,293                 | 1,005                              | 2,44  | 18,8                                | 17,2  | 13,28                                 | 0,707 |
| 10                  | 1,247                 | 1,005                              | 2,51  | 20,0                                | 17,6  | 14,16                                 | 0,705 |
| 20                  | 1,205                 | 1,005                              | 2,59  | 21,4                                | 18,1  | 15,06                                 | 0,703 |
| 30                  | 1,165                 | 1,005                              | 2,67  | 22,9                                | 18,6  | 16,00                                 | 0,701 |
| 40                  | 1,128                 | 1,005                              | 2,76  | 24,3                                | 19,1  | 16,96                                 | 0,699 |
| 50                  | 1,093                 | 1,005                              | 2,803   | 25,7                                | 19,6  | 17,95                                 | 0,698 |
| 60                  | 1,060                 | 1,005                              | 2,90  | 27,2                                | 20,1  | 18,97                                 | 0,696 |
| 70                  | 1,029                 | 1,009                              | 2,96  | 28,6                                | 20,6  | 20,02                                 | 0,694 |
| 80                  | 1,000                 | 1,009                              | 3,05  | 30,2                                | 21,1  | 21,09                                 | 0,692 |
| 90                  | 0,972                 | 1,009                              | 3,13  | 31,9                                | 21,5  | 22,10                                 | 0,690 |
| 100                 | 0,946                 | 1,009                              | 3,21  | 33,6                                | 21,9  | 23,13                                 | 0,688 |
| 120                 | 0,898                 | 1,009                              | 3,34  | 36,8                                | 22,8  | 25,45                                 | 0,686 |
| 140                 | 0,854                 | 1,013                              | 3,49  | 40,3                                | 23,7  | 27,80                                 | 0,684 |
| 160                 | 0,815                 | 1,017                              | 3,64  | 43,9                                | 24,5  | 30,09                                 | 0,682 |
| 180                 | 0,779                 | 1,022                              | 3,78  | 47,5                                | 25,3  | 32,49                                 | 0,681 |
| 200                 | 0,746                 | 1,026                              | 3,93  | 51,4                                | 26,0  | 34,85                                 | 0,680 |
| 250                 | 0,674                 | 1,038                              | 4,27  | 61,0                                | 27,4  | 40,61                                 | 0,677 |
| 300                 | 0,615                 | 1,047                              | 4,60  | 71,6                                | 29,7  | 48,33                                 | 0,674 |
| 350                 | 0,566                 | 1,059                              | 4,91  | 81,9                                | 31,4  | 55,46                                 | 0,676 |
| 400                 | 0,524                 | 1,068                              | 5,21  | 93,1                                | 33,0  | 63,09                                 | 0,678 |
| 500                 | 0,456                 | 1,093                              | 5,74  | 115,3                               | 36,2  | 79,38                                 | 0,687 |
| 600                 | 0,404                 | 1,114                              | 6,22  | 138,3                               | 39,1  | 96,89                                 | 0,699 |
| 700                 | 0,362                 | 1,135                              | 6,71  | 163,4                               | 44,8  | 115,4                                 | 0,706 |
| 800                 | 0,329                 | 1,156                              | 7,18  | 188,8                               | 44,3  | 134,8                                 | 0,713 |
| 900                 | 0,301                 | 1,172                              | 7,63  | 216,2                               | 46,7  | 155,1                                 | 0,717 |
| 1000                | 0,277                 | 1,185                              | 8,07  | 245,9                               | 49,0  | 177,1                                 | 0,719 |
| 1100                | 0,257                 | 1,197                              | 8,50  | 276,2                               | 51,2  | 199,3                                 | 0,722 |
| 1200                | 0,239                 | 1,210                              | 9,15  | 316,5                               | 53,5  | 233,7                                 | 0,724 |

|                            |                              |
|----------------------------|------------------------------|
| Абсолютний                 | absolute                     |
| Адіабатний                 | adiabatic                    |
| Барометричний              | barometric                   |
| Вакуум                     | vacuum                       |
| Волога насичена пара       | humid saturated steam        |
| Внутрішня енергія          | internal energy              |
| Газ                        | gas                          |
| Газова стала               | gas constant                 |
| Густина                    | density                      |
| Другий закон термодинаміки | second law of thermodynamics |
| Енергія                    | energy                       |
| Ентальпія                  | enthalpy                     |
| Ентропія                   | entropy                      |
| Закон                      | law                          |
| Зворотний цикл             | reverse cycle                |
| Ідеальний                  | ideal                        |
| Ідеальний газ              | ideal gas                    |
| Ізобарний                  | isobaric                     |
| Ізотермічний               | isothermal                   |
| Ізохорний                  | isochoric                    |
| Істинна теплосмність       | true thermal capacity        |
| Кипіння                    | boiling                      |
| ККД                        | efficiency                   |
| Коефіцієнт                 | coefficient                  |
| Конденсація                | condensation                 |
| Манометричний              | manometric                   |
| Нерівноважний              | nonequilibrium               |
| Об'єм                      | volume                       |
| Пара                       | steam                        |
| Параметр стану             | parameter of condition       |
| Перегріта пара             | superheating steam           |
| Перший закон термодинаміки | first law of thermodynamics  |
| Питомий                    | specific                     |
| Питомий об'єм              | specific volume              |
| Показник політропи         | coefficient of polytrope     |
| Політропний                | polytropic                   |
| Процес                     | process                      |
| Прямий цикл                | straight cycle               |

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Рівноважний                        | equilibrium                             |
| Рівняння                           | equation                                |
| Рівняння стану                     | equation of condition                   |
| Робота                             | work                                    |
| Робота зміни об'єму                | work of alteration the volume           |
| Робота зміни тиску                 | work of alteration the pressure         |
| Робота проштовхування              | work of push                            |
| Робоче тіло                        | working body                            |
| Система                            | system                                  |
| Стан                               | condition                               |
| Суха насичена пара                 | dry saturated steam                     |
| Температура                        | temperature                             |
| Температура насичення              | temperature of saturation               |
| Теорема                            | theorem                                 |
| Теорема Карно                      | Carnot theorem                          |
| Теплоємність                       | thermal capacity                        |
| Теплообмін                         | heat exchange                           |
| Теплота                            | heat                                    |
| Теплота пароутворення              | heat generation of steam                |
| Теплота фазових перетворень        | heat of phase transformations           |
| Термічний ККД                      | thermal efficiency                      |
| Термодинамічний                    | thermodynamics                          |
| Технічна                           | technical                               |
| Тиск                               | pressure                                |
| Тиск насичення                     | pressure of saturation                  |
| Узагальнені рівняння термодинаміки | generalized equations of thermodynamics |
| Універсальна                       | universal                               |
| Фаза                               | phase                                   |
| Фазова діаграма                    | phase diagram                           |
| Функція стану                      | function of condition                   |
| Холодильний                        | refrigeratory                           |
| Холодовидатність                   | cold productivity                       |
| Цикл                               | cycle                                   |
| Цикл Карно                         | Carnot cycle                            |

*Навчальне видання*

**Остапенко Ольга Павлівна**

## **ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

**Лабораторний практикум**

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено О.П. Остапенко

Підписано до друку 11.07.2012 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 5,8.

Наклад 75 прим. Зам. №. 2012-098.

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, к. 2201.

тел. (0432) 59-87-36.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к.114.

тел. (0432) 59-87-68.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.