

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВА УКРАЇНИ**

**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра електротехнологій і електропостачання

## **Теплотехніка**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

**ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ**

**НАПРЯМІВ ПІДГОТОВКИ**

**6.100102 "ПРОЦЕСИ, МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ АПВ"**

**6.010104 "ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА (ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА  
І ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКТІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА)"**

**МИКОЛАЇВ**

**2014**

УДК 621.1 (075.8)  
ББК 31.3873  
Т34

Друкується за рішенням методичної ради інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол № 3 від 27 листопада 2014 р.

Укладач:

С. В. Коваль – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електротехнологій та електропостачання Миколаївського національного аграрного університету

Рецензенти:

О. О. Мочалов – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри фізики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри механізації та електрифікації сільського виробництва Миколаївського національного аграрного університету.

## **ВСТУП**

Мета даних навчально-методичних рекомендацій – надати допомогу студентам III курсу заочної форми навчання інженерно-енергетичного факультету у виконанні контрольної роботи з дисципліни "Теплотехніка" та виборі контрольних завдань.

Для вивчення основного навчального матеріалу програми курсу в методичних рекомендаціях приведені основні формули, приклади розв’язування задач та контрольні завдання. Крім того, в методичних рекомендаціях приведені загальні відомості про наближені методи обчислювання, деякі додаткові таблиці.

В методичних рекомендаціях враховані особливості навчального плану. Надано таблицю варіантів контрольних робіт з дисципліни. Контрольні роботи містять задачі різної ступені складності.

**ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО  
РОЗВ’ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ І ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ  
РОБІТ**

1. За час вивчення курсу теплотехніки студент III курсу заочної форми навчання повинен представити в навчальний заклад контрольну роботу.
2. Варіанти задач, які студент повинен включити в свою контрольну роботу, визначаються по таблиці варіантів (див. табл. 1), по останній і передостанній цифрах залікової книжки.
3. Контрольні роботи необхідно виконувати у шкільному зошиті, на обкладинці якої привести відомості за наступним зразком:

**Студент факультету механізації МДАУ  
Гонський В.О.  
Шифр 370932  
Адреса: с.м.т. Доманівка, Миколаївської обл.,  
Вул. Садова, 2. кв.5  
Контрольна робота по теплотехніці**

4. Умови задач у контрольній роботі треба переписати повністю без скорочень. Для зауважень викладача на сторінках зошита залишати поля.
5. Наприкінці контрольної роботи вказати, яким підручником чи навчальним посібником студент користувався при вивченні теплотехніки (назва підручника, автор, рік видання). Це робиться для того, щоб рецензент в разі потреби міг вказати, що має студент вивчити для завершення контрольної роботи.
6. Роботу потрібно висилати на рецензію своєчасно.
7. Якщо контрольна робота при рецензуванні не зарахована, студент зобов’язаний представити її на повторну рецензію, включивши в неї ті задачі, розв’язування яких виявилися невірними.
8. Зарахована контрольна робота пред’являється екзаменатору. Студент повинен бути готовим під час іспиту дати пояснення на розв’язування задач, що входять у контрольну роботу.
9. Розв’язування задач варто супроводжувати короткими, але вичерпними поясненнями; в таких випадках, коли це можливо дати рисунок, виконаний за допомогою креслярських приладь.

10. Розв'язувати задачу потрібно в загальному вигляді, тобто виразити шукану величину в літерних позначеннях величин, заданих в умові задачі. При такому способі розв'язування не виконується обчислення проміжних величин.

11. Після одержання розрахункової формули для перевірки правильності її треба підставити в праву частину формули замість символів позначення одиниці цих величин, провести з ними необхідні дії і переконатися в тому, що отримана при цьому одиниця вимірювання відповідає шуканій величині. Якщо такої відповідності немає, то це означає що задача розв'язана невірно.

12. Числові значення величини при підстановці їх у розрахункову формулу необхідно виражати тільки в одиницях системи СІ. За виключенням допускається виражати в будь-яких, але однакових одиницях, числові значення однорідних величин, що знаходяться у чисельнику і знаменнику відношення та маючи однакову степінь.

13. При підстановці в розрахункову формулу, а також при записі відповіді числові значення величин варто записувати як добуток десяткового дробу з однією значущою цифрою перед комою на відповідну степінь десяти. Наприклад, замість 3520 треба записати  $3,52 \cdot 10^3$ , замість 0,00129 записати  $1,29 \cdot 10^{-3}$  і т.п.

14. Обчислення по розрахунковій формулі треба проводити з дотриманням правил наближених обчислень. Як правило, остаточну відповідь варто записувати з трьома значущими цифрами. Це відноситься і до випадку, коли результат отриманий з використанням калькулятора.

## Розділ I . Теоретичні основи теплотехніки

### 1.1.Основні поняття і визначення

**Термодинаміка** – наука про закони теплового руху (термо) і його перетворення (динаміка) в інші види руху, що відбуваються в макроскопічних рівноважних системах і при переході систем до стану рівноваги.

Термодинаміка виникла з потреб теплотехніки. Розрізняють технічну і хімічну термодинаміку, термодинаміку біологічних систем і т.д.

**Технічна термодинаміка** вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, а також властивості тіл, що беруть участь у цих перетвореннях, та теплові процеси, що протікають у різних апаратах і установках і холодильних машинах.

**Хімічна термодинаміка** вивчає процеси в яких обмін енергією супроводжується зміною хімічного складу тіл.

### 1.2.Термодинамічна система

**Термодинамічною системою** називається сукупність матеріальних тіл, що можуть енергетично взаємодіяти між собою та навколишнім середовищем і обмінюється з ним енергією .

Система, яка не обмінюється з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною називають *ізолюваною (закритою)*. Якщо система не обмінюється з зовнішнім середовищем теплотою, її називають *теплоізолюваною* або *адіабатною*.

Термодинамічна система містить у собі *робочі тіла* (гази, повітря, пари) і *джерела теплоти*.

Гази у яких можна нехтувати впливом сил взаємодії між молекулами й об'ємом самих молекул називають *ідеальними*.

### 1.3.Термічні параметри стану термодинамічної системи

Макроскопічні величини, тобто величини, що визначають стан термодинамічної системи в даний момент, називають *параметрами стану*. Розрізняють *термічні, калоричні і енергетичні* параметри стану. До термічних відносять абсолютний тиск  $p$ , питомий об'єм  $v$  і абсолютну температуру  $T$ ; до калоричних – внутрішню питому енергію  $U$ , питому ентальпію  $h$  і питому ентропію  $S$ ; до енергетич-

них – питома робота  $l$  і питома теплота  $q$ .

**Абсолютний тиск  $p$**  – результат ударів об стінку мікрочастинок робочого тіла, що хаотично рухаються і чисельно дорівнює силі, яка діє по нормалі на одиницю площі:

$$p = \frac{F}{S} \quad [p] = \frac{N}{m^2} = \text{Па}. \quad (1.1)$$

Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії тиск газу визначається рівнянням:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}, \quad (1.2)$$

де  $n$  – концентрація молекул (число молекул в одиниці об'єму),  $m_0$  - маса однієї молекули,  $\langle v^2 \rangle$  – середня квадратична швидкість поступального руху молекул.

Тиск поділяють на абсолютний  $p$ , атмосферний  $p_a$ , надлишковий  $p_n$  і вакуумметричний  $p_v$ .

Прилади для вимірювання тиску – манометри, барометри, вакуумметри.

**Абсолютна термодинамічна температура  $T$**  у відповідності з молекулярно-кінетичною теорією газів пропорційна кінетичній енергії поступального руху частинок робочого тіла:

$$kT = \frac{2}{3} \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}, \quad (1.3)$$

де  $k$  - стала Больцмана, що дорівнює  $1,380662 \times 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ .

З цього рівняння видно, що температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул.

Температура, яка виражена цим рівнянням називається *термодинамічною* (абсолютною) і вимірюється в К (кельвін). На практиці широко застосовується *практична* шкала температур, яка вимірюється в  $^{\circ}C$  (градус Цельсія). Зв'язок між термодинамічною температурою  $T, K$  і температурою  $t, ^{\circ}C$  записується у вигляді:

$$T = t + 273,15. \quad (1.4)$$

**Питомий об'єм  $\nu$**  – це об'єм , що займає одиниця маси речовини. Для однорідного тіла масою  $m$  і об'ємом  $V$  його визначають за формулою:

$$\nu = \frac{V}{m} \quad [\nu] = \frac{m^3}{кг} \quad (1.5)$$

Величина обернена питомому об'єму – густина  $\rho = \frac{1}{\nu}$ , звідки  $\rho \nu = 1$ .

#### 1.4.Рівняння стану термодинамічної системи

Рівняння , яке пов'язує термічні параметри системи в рівноважному стані  $F(p, \nu, T) = 0$  , називають **термічним рівнянням стану**. Рівняння ,що зв'язує температуру  $T$ , зовнішні параметри і внутрішню енергію , називається **калоричним рівнянням стану**.

Термічне рівняння стану для довільної кількості ідеального газу записується у вигляді:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1.6)$$

Для 1 кг газу

$$\rho \nu = \frac{R}{M}T. \quad (1.7)$$

де  $m$  – маса газу,  $M$  – молярна маса газу,  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,314 \frac{Дж}{моль \times K}$ ).



Для 1 моля газу рівняння стану має вигляд:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad (1.8)$$

Виходячи з цього рівняння одержуємо, що при умові

а)  $T = \text{const}$  (ізотермічний процес )

**закон Бойля – Маріотта,**

$$pV = \text{const}, \quad (1.9)$$

б)  $V = \text{const}$  (ізохорний процес)

**закон Шарля,**

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \quad 1.10)$$

в)  $p = \text{const}$  (ізобарний процес)

**закон Гей-Люсака,**

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \quad (1.11)$$

г) **закон Дальтона,**

тиск суміші ідеальних газів  $p$  дорівнює сумі парціальних тисків  $p_i$  її складових (компонентів):

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1.12)$$

парціальним тиском компонента суміші називають такий тиск, який створював би сам компонент при тому ж об'ємі і температурі, яку мала суміш.

д) **закон Авогадро,**

в одному молі будь-якої речовини знаходяться однакове число молекул. Це число молекул називається *числом Авогадро*  $N_A$ :

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 6,02 \times 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}. \quad (1.13)$$

## Розділ II. Газові суміші

### 2.1 Склад суміші

Склад газової суміші визначається кількістю кожного газу, який входить в суміш, і може бути записаний масовими або об'ємними частками.

Масова частка визначається відношенням маси окремого газу, який входить в суміш, до маси всієї суміші:

$$m_1 = \frac{M_1}{M}, m_2 = \frac{M_2}{M}, m_3 = \frac{M_3}{M}, \dots, m_n = \frac{M_n}{M},$$

де  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$  – маси окремих газів, а  $M$  – маса всієї суміші.

Об'ємною часткою газу називають відношення об'єму кожного компоненту, який входить в суміш, до об'єму всієї газової суміші, при умові, що об'єм кожного компонента віднесений до тиску і температурі суміші (при веденні об'єму):

$$v_1 = \frac{V_1}{V}, v_2 = \frac{V_2}{V}, v_3 = \frac{V_3}{V}, \dots, v_n = \frac{V_n}{V},$$

де  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  – приведені об'єми компонентів газів, входять в суміш;

$V$  – загальний об'єм газової суміші.

Зрозуміло, що

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = M$$

$$m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = m$$

а також

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V$$

$$r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = r$$

Для переводу масових часток в об'ємні користуються формулою

$$r_i = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_i}} \quad (2.1)$$

Об'ємні частки переводять в масові по формулі

$$m_i = \frac{r_i M_i}{\sum_{i=1}^n r_i M_i} \quad (2.2)$$

Густина суміші визначають із виразу:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i m_i, [\rho_c] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (2.3)$$

або , якщо відомий масовий склад, за формулою

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}}. \quad (2.4)$$

Оскільки, питомий об'єм суміші складає величину обернену  $\rho_c$  то, якщо відомий об'ємний склад суміші,

$$V_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i \rho_i}. \quad (2.5)$$

Якщо ж відомий масовий склад, то

$$V_c = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}. \quad (2.6)$$

Із рівняння (2.3) можна легко одержати значення так званої уявної молекулярної маси газової суміші

$$\mu_c = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i, \quad (2.7)$$

або через масовий склад

$$\mu_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i}}. \quad (2.8)$$

Газову сталу суміші газів  $R_c$  можна виразити або через газові сталі окремих компонентів , які входять в суміш , або через уявну молекулярну масу суміші

$$R_c = \sum_{i=1}^n m_i R_i, [R_c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (2.9)$$

Зв'язок між тиском газової суміші і парціальних окремих компонентів , які входять в суміш встановлену законом Дальтона (1.12)

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n.$$

Парціальний тиск визначають , якщо відомі об'ємні долі окремих компонентів, які входять в суміш

$$P_1=P_{r1}, P_2=P_{r2} \text{ і т.д.},$$

або

$$P_i=P_{ri} \quad (2.10)$$

де  $P_i$  – парціальний тиск любого газу, який входить до суміші.

Якщо відомі масові долі, то парціальний тиск любого газу, який входить в суміш визначається за формулою

$$P_i = m_i \frac{R_i}{R_c} P. \quad (2.11)$$

### Розділ III. Ентропія і ентропійні діаграми

Ентропія – калориметричний параметр стану, диференціал якого дорівнює відношенню кількості теплоти в елементарному оборотному процесі до абсолютної температури, що є постійною на нескінченно малій ділянці процесу:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (3.1)$$

Одиниця виміру ентропії Дж/К, а одиниця виміру питомої ентропії  $S$ , віднесеної до 1 кг речовини, Дж/кг·К. У технічній термодинаміці необхідно знати лише зміну питомої ентропії у процесі, яка дорівнює

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (3.2)$$

Загальні формули для розрахунку змін ентропії при протіканні політропного процесу мають вигляд:

$$S_1 - S_2 = C_v (k - n) \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (3.3)$$

$$S_1 - S_2 = C_v \frac{k-n}{n} \ln \frac{P_1}{P_2}; \quad (3.4)$$

$$S_1 - S_2 = C_v \frac{k-n}{n-1} \ln \frac{T_1}{T_2}; \quad (3.5)$$

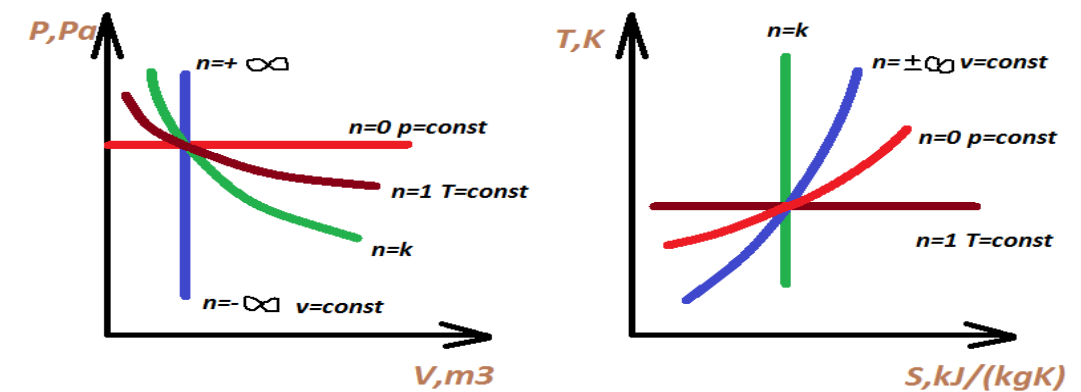
На рисунку приведені процеси в p-v і T-S діаграмах:

$P$ , Па

$T$ , К

$V$ , м<sup>3</sup>

$S$ , Дж/(кг·К)



Для основних процесів знаходимо:

$$\text{ізохорний процес} \quad S_2 - S_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \ln \frac{P_2}{P_1} ; \quad (3.6)$$

$$\text{ізобарний процес} \quad S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \ln \frac{V_2}{V_1} ; \quad (3.7)$$

$$\text{ізотермічний процес} \quad S_2 - S_1 = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2} ; \quad (3.8)$$

$$\text{адіабатичний процес} \quad S_2 - S_1 = 0, \quad ; \quad S = \text{const} . \quad (3.9)$$

Для визначення відносної ентропії приймаємо  $S_0=0$  при нормальних фізичних умовах і тоді ентропія газу буде визначатися по формулах:

$$S = C_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_0} ; \quad (3.10)$$

$$S = C_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{P}{P_0} . \quad (3.11)$$

В цих формулах  $p$  і  $p_0$  необхідно брати в однаковій розмірності, при чому

$$P_0 = 1,033 \text{ атм} = 1,0133 \text{ бар} = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Значення  $C_p$ ,  $C_v$ ,  $R$  для задач приймають постійними, і беруть з довідникової літератури.

#### Розділ IV. Термодинамічні процеси

Основне рівняння для термодинамічних процесів уявляє собою математичну залежність між трьома величинами: зовнішня теплота (яка підводиться ззовні або відводиться від робочого тіла), зміна внутрішньої енергії і зовнішня робота газу

$$dq = C_v dT + p dv, \quad (4.1)$$

або

$$q = \Delta U + l, \quad (4.2)$$

де

$$\Delta U = C_v (T_2 - T_1), \quad (4.3)$$

це зміна внутрішньої енергії, а

$$l = \int_1^2 p dv, \quad (4.4)$$

це зовнішня робота.

Рівняння політропного процесу має вигляд  $pv^n = \text{const}$  і залежність між параметрами газу в процесі слідуючі:

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n, \quad (4.5)$$

$$T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1}, \quad (4.6)$$

$$T_1^n p_1^{1-n} = T_2^n p_2^{1-n}, \quad (4.7)$$

Теплота, яка приймає участь в процесі при  $c = \text{const}$ , визначається з формули

$$q = c(T_2 - T_1), \quad (4.8)$$

де

$$C = C_v \frac{n-k}{n-1}, \quad (4.9)$$

це теплоємність, а

$$n = \frac{\varphi k - 1}{\varphi - 1}, \quad (4.10)$$

це показник політропи, де  $\varphi = \frac{\Delta U}{q}$  – розподілення енергії в процесі.

Робота 1 кг газу в політропному процесі виражається формулою

$$l = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (4.11)$$

Коли задавати визначені значення показника  $n$ , то одержимо часткові випадки політропного процесу:

а) ізохорний процес

$$n = \infty; c = c_v; l = 0; q = c_v(T_2 - T_1); \quad (4.12)$$

б) ізобарний процес

$$n = 0; c = c_p; l = R(T_2 - T_1) = p(V_2 - V_1); \quad (4.13)$$

$$q = c_p(T_2 - T_1); \quad (4.14)$$

в) ізотермічний процес

$$n = 1; c = \infty; l = q = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (4.15)$$

г) адіабатний процес

$$n = k; c = 0; l = -\Delta U = c_v(T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

## Розділ V . Кругові процеси

### 5.1 Основні поняття і визначення

Круговим процесом, або циклом, називають сукупність термодинамічних процесів, в результаті здійснення яких робоче тіло повертається в початковий стан.

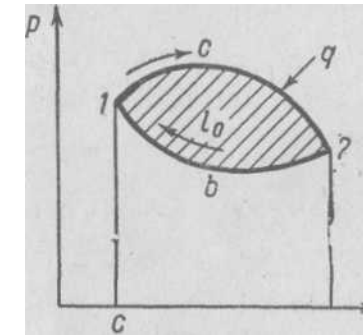


Рис. 5.1

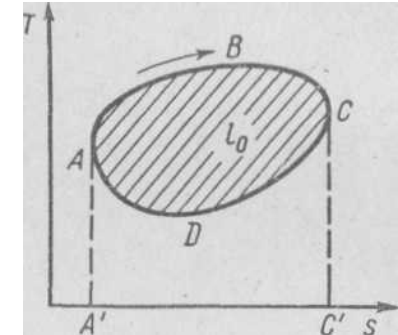


Рис. 5.2

Робота кругового процесу ( $l_0$ ) зображується в діаграмі  $pV$  (рис. 5.1) площею, розташованою усередині замкнутого контуру циклу, причому робота позитивна, якщо цикл здійснюється за годинниковою стрілкою (прямий цикл), і негативна, якщо він здійснюється проти годинникової стрілки (зворотний цикл).

Прямий цикл ( $l_0 > 0$ ) характерний для теплових двигунів, зворотний цикл ( $l_0 < 0$ ) — для холодильних машин.

Якщо позначити через:  $q_1$  — кількість теплоти, запозиченою 1 кг робочого тіла від зовнішнього (або верхнього) джерела теплоти;  $q_2$  — кількість теплоти, відданої 1 кг робочого тіла зовнішньому охолоджувачу (або нижньому джерелу), то корисно використана в циклі теплота

$$l_0 = q_1 - q_2. \quad (5.1)$$

Ця кількість теплоти в діаграмі  $TS$  зображується площею, розташованою усередині замкнутого контуру циклу (рис. 5.2). Вочевидь, ця площа представляє також величину роботи за один цикл, причому, як і в діаграмі  $pV$ , робота позитивна, якщо цикл здійснюється за годинниковою стрілкою, і негативна, якщо він здійснюється проти годинникової стрілки.

Міра ефективності процесу перетворення теплоти в роботу в кругових процесах характеризується термічним к.к.д.

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1} \quad (5.2)$$

Користуючись діаграмою  $TS$  (рис. 5.2), можна визначити термічний к.к.д.

циклу графічним шляхом:

$$\eta_t = \frac{\text{пл. (ABCD)}}{\text{пл. (ABCC'A')}} \quad (5.3)$$

## 5.2. Цикл Карно

Цикл Карно складається з двох адіабат і двох ізотерм (рис. 5.3 і рис. 5.4).

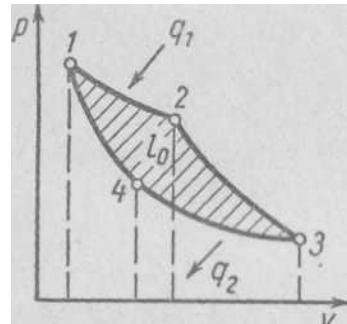


Рис. 5.3

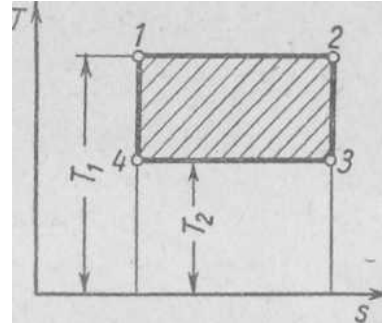


Рис. 5.4

Кількість підведеної теплоти

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.4)$$

Кількість відведеної теплоти (абсолютне значення)

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.5)$$

Робота циклу Карно визначається згідно з рівнянням (5.1)

Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (5.6)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  — відповідно температури верхнього і нижнього джерела теплоти в К.

## 5.3 Теоретичні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання

Цикл поршневих двигунів внутрішнього згорання з підведенням теплоти при постійному об'ємі складається з двох адіабат і двох ізохор (рис. 5.5 і рис. 5.6).

Характеристиками циклу є:

$\varepsilon = V_1/V_2$  — міра стискування;

$\lambda = p_3/p_2$  — міра підвищення тиску.

Кількість підведеної теплоти

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) \quad (5.7)$$

Кількість відведеної теплоти (абсолютне значення)

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) \quad (5.8)$$

Робота циклу

$$l_0 = q_1 - q_2$$

Термічний к. к. д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\frac{1}{\gamma-1}}} \quad (5.9)$$



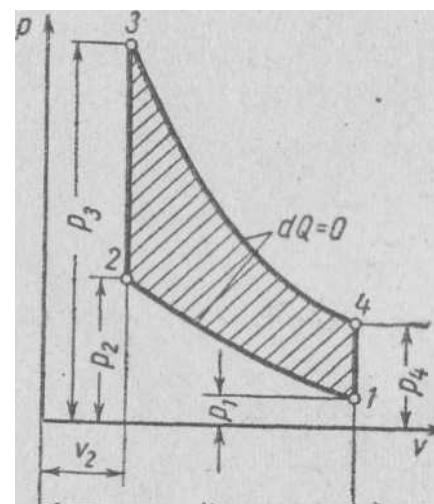


Рис. 5.5

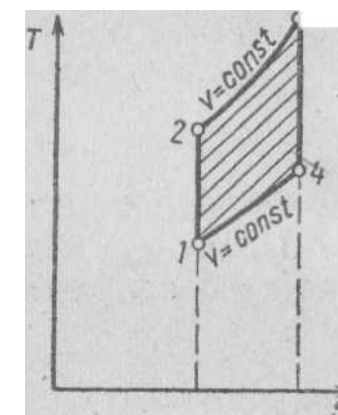


Рис. 5.6

Цикл з підведенням теплоти при постійному тиску складається з двох адіабат, однієї ізобари і однієї ізохори (рис. 5.7 і рис. 5.8).

Характеристиками циклу є:

$\epsilon = V_1/V_2$  – міра стискування;

$\rho = V_3/V_2$  – міра попереднього розширення.

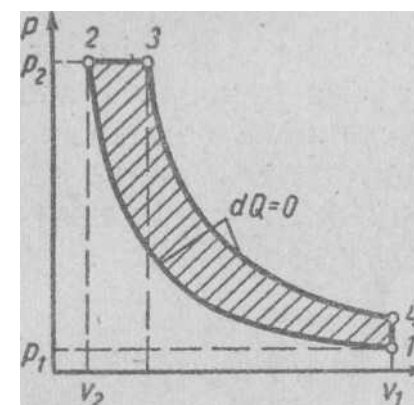


Рис. 5.7

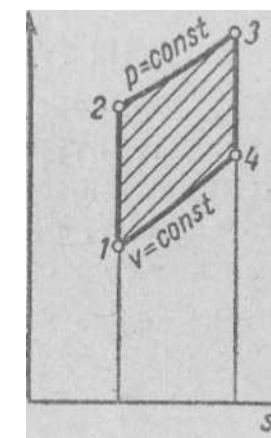


Рис. 5.8

Кількість підведеної теплоти

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2). \quad (5.10)$$

Кількість відведеної теплоти (абсолютне значення)

$$q_2 = c_v(T_4 - T_3). \quad (5.11)$$

Робота циклу

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \frac{\epsilon^{K-1}}{\kappa(\epsilon-1)} \quad (5.12)$$

Цикл з комбінованим підведенням теплоти складається з двох адіабат, двох ізохор і однієї ізобари (рис. 5.9 і рис. 5.10). Характеристиками циклу є:

$$\epsilon = \frac{v_4}{v_2}; \quad \epsilon = \frac{p_3}{p_2}; \quad \epsilon = \frac{v_4}{v_3}.$$

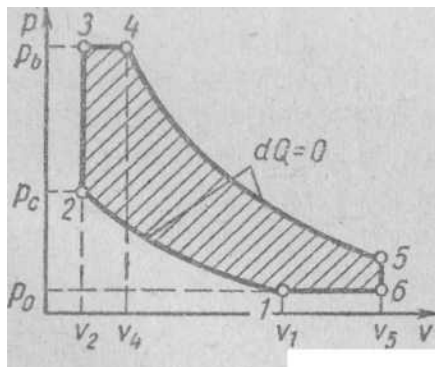


Рис. 5.9

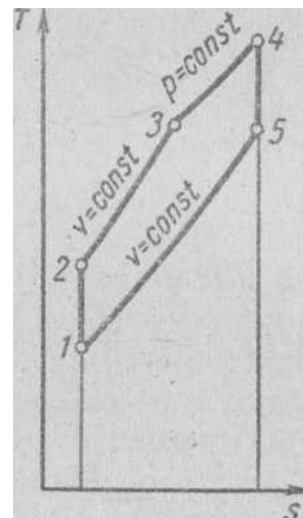


Рис. 5.10

Кількість підведеної теплоти

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_3). \quad (5.13)$$

Кількість відведеної теплоти (абсолютне значення)

$$q_2 = c_v(T_3 - T_1). \quad (5.14)$$

Термічний к. к. д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \frac{\lambda \epsilon^{K-1}}{\lambda - 1 + \kappa \lambda (\epsilon - 1)}. \quad (5.15)$$

У всіх приведених вище теоретичних циклах поршневих двигунів внутрішнього згорання рівняння для визначення кількості підведеної і відведеної теплоти, а також для термічного к. к. д. дані для випадку  $c = \text{const}$ .

#### 5.4 Цикли газотурбінних установок

На рис. 5.11 представлена схема найбільш розповсюдженого типа газотурбінної установки із згоранням пального при постійному тиску.

Компресор  $K$ , розташований на одному валу з газовою турбіною  $T$ , всмоктує повітря з атмосфери і стискає його до заданого тиску. Стиснуте в компресорі повітря поступає в камеру згорання  $KC$ ; туди ж паливним насосом  $TH$  подається рідке паливо. Згорання протікає при постійному тиску. З камери згорання газу

поступають в сопла  $C$ , з яких вони з великою швидкістю поступають на робочі лопатки  $L$  турбіни і приводять в обертання її ротор. Відпрацьовані гази через випускний патрубок  $\Pi$  випускаються в атмосферу.

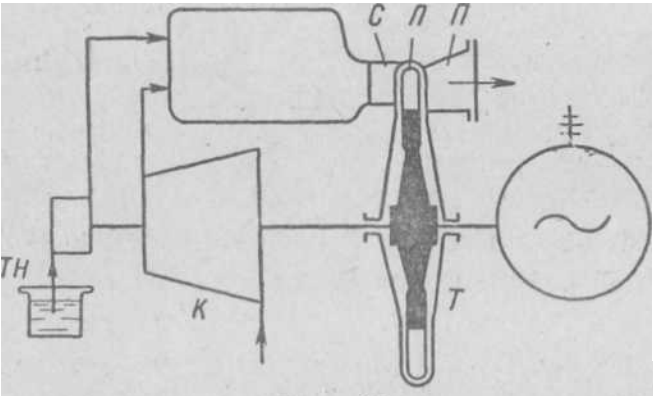


Рис. 5.11

На рис. 5.12 приведено теоретичний цикл газотурбінної установки з підведенням теплоти при постійному тиску. Як видно з цього графіка, цикл складається з двох адіабат і двох ізобар. Лінія 1-2 – зображує процес адіабатного стиснення в компресорі, 2-3 – ізобарне підведення теплоти, 3-4 – адіабатне розширення в газовій турбіні, 4-1 – умовний ізобарний процес, що замикає цикл.

Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}, \tag{5.16}$$

або

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{\gamma}}}, \tag{5.17}$$

де  $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$  – ступінь стискування, а  $\lambda = \frac{P_1}{P_2}$  – ступінь підняття тиску.

Цикл газотурбінної установки з підведенням теплоти при постійному об'ємі представлений на рис. 5.13. У компресорі  $K$  відбувається адіабатне стискання по-

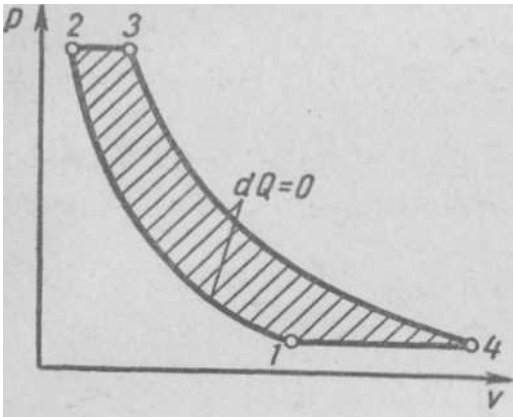


Рис. 5.12

Рис. 5.13

вітря (лінія 1-2). Стисле повітря поступає в камеру згорання  $KC$ , куди одночасно паливним насосом  $TH$  подається рідке паливо. Згоряння відбувається при постійному об'ємі (при закритих клапанах). Займання горючої суміші зазвичай здійснюється від електричної свічки  $ЭС$ . Продукти згоряння проходять через випускний клапан камери, надходять в сопла  $C$ , де адіабатно розширюються (лінія 3-4). Далі гази з великою швидкістю поступають на робочі лопатки  $L$  турбіни і приводять в обертання її ротор. Відпрацьовані гази через випускний патрубок  $П$  випускаються в атмосферу. Цикл замикається умовним ізобарним процесом (лінія 4-1).

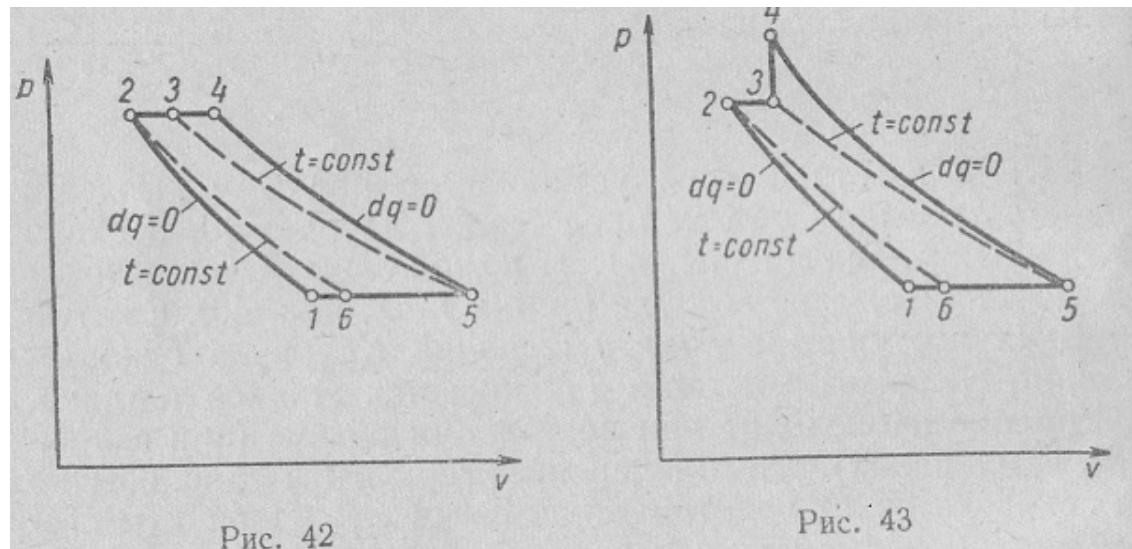
Термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{N}{\lambda N - 1}}{\frac{\lambda N - 1}{\lambda - 1}}, \quad (5.18)$$

де  $\lambda = p_3/p_2$ .

Оскільки продукти згоряння, що виходять з газової турбіни, мають досить високу температуру, то для підвищення економічності газотурбінного агрегату вводять так звану регенерацію, тобто попереднє підігрівання стислого в компресорі повітря за рахунок теплоти вихідних газів. Термічний к.к.д. циклу газової турбіни за наявності регенерації більше, ніж термічний к.к.д. турбіни без регенерації. Якщо всю теплоту відпрацьованих газів, що розташовується, використовувати для підігрівання повітря, то такий цикл газової турбіни носить назву циклу з граничною регенерацією.

Цикл газової турбіни з підведенням теплоти при  $p = \text{const}$  і регенерацією зображений на рис. 5.14, а цикл турбіни при  $V = \text{const}$  і регенерацією — на рис. 5.15. У обох циклах лінії 2-3 зображують ізобарний підігрів стислого повітря в регенераторі, а лінії 5-6 — ізобарне охолодження продуктів згоряння в регенераторі.



Термічний к.к.д. циклу турбіни з підведенням теплоти при  $p = \text{const}$  з граничною повною регенерацією і адіабатним стискуванням.

$$\eta_{tps} = 1 - \frac{T_4}{T_3}. \quad (5.19)$$

Термічний к.к.д. циклу турбіни з підведенням теплоти при  $V = \text{const}$  з граничною регенерацією і адіабатним стискуванням.

$$\eta_{tps} = 1 - \frac{T_4(T_2^{K-1} - 1)}{T_1(T_2^K - 1)}. \quad (5.20)$$

### 5.5 Поршневі компресори

На рис. 5.16 в діаграмі  $pV$  зображені процеси, які протікають в ідеальному компресорі. Рис. 5.14 зображує процес нагнітання. Діаграму 1-2-3-4 називають теоретичною індикаторною діаграмою.

Теоретична робота компресора  $l_0$  визначається площею індикаторної діаграми і залежить від процесу стискування (рис. 5.17). Крива 1-2 зображує процес ізотермічного стискування, крива 1-2'' – адіабатного стискування і крива 1-2' – політропного стискування.

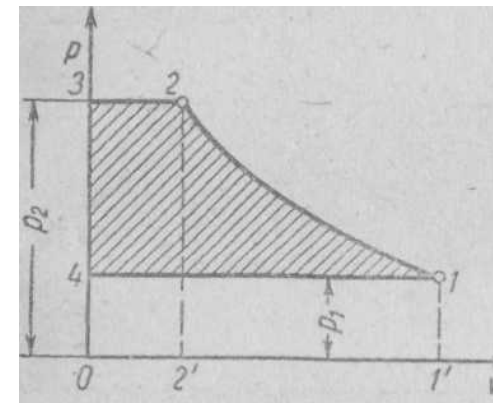


Рис. 5.16

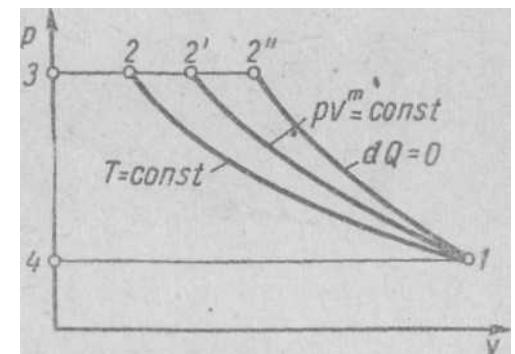


Рис. 5.17

При ізотермічному стискуванні теоретична робота компресора дорівнює роботі ізотермічного стискування:

$$l_0 = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = RT \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.21)$$

Якщо маса всмоктуваного повітря  $M$  кг, а об'єм його  $V_1$  м<sup>3</sup>, то

$$L_0 = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.22)$$

Робота, віднесена до 1 м<sup>3</sup> всмоктуваного повітря,

$$l'_0 = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.23)$$

Робота для здобуття 1 м<sup>3</sup> стиснутого повітря,



$$l''_0 = p_2 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (5.24)$$

Кількість теплоти, яка має бути відведена при ізотермічному стискуванні,

$$q=l_0 \text{ або } Q=L_0$$

При адіабатному стискуванні теоретична робота компресора в  $k$  раз більше роботи адіабатного стискування:

$$l_0 = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (5.25)$$

Якщо маса всмоктуваного повітря  $M$  кг, а об'єм його  $V_1$  м<sup>3</sup>, то

$$L_0 = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (5.26)$$

Робота віднесена до 1 м<sup>3</sup> всмоктуваного повітря,

$$l'_0 = \frac{k}{k-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (5.27)$$

Робота для здобуття 1 м<sup>3</sup> стислого повітря

$$l''_0 = \frac{k}{k-1} p_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (5.28)$$

Температуру газу в кінці стискування можна визначити із співвідношення параметрів адіабатного процесу.

Робота компресора при адіабатному стискуванні може бути також знайдена по формулі

$$l_0 = i_2 - i_1, \quad (5.29)$$

де  $i_2$  і  $i_1$  – відповідно початкове і кінцеве значення ентальпії повітря.

Ця формула дуже зручна для підрахунку роботи ідеального компресора при адіабатному стискуванні за допомогою діаграми.

В цьому випадку з точки 1 (рис. 5.18), що характеризує початковий стан, проводять вертикальну лінію до перетину її в точці 2 з ізобарою  $p_2$ . Ординати точок 1 і 2 дають значення ентальпії  $i_2$  і  $i_1$ , а відрізок 1-2 – їх різниця.

При політропному стискуванні теоретична робота компресора в  $m$  разів бі-

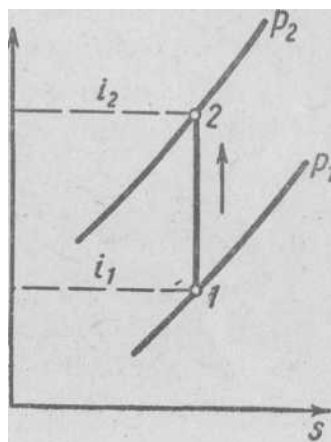


Рис. 46

льше роботи політропного стискування:

$$l_0 = \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (5.30)$$

Якщо маса всмоктуваного повітря  $M$  кг, а його об'єм  $V_1$  м<sup>3</sup>, тоді

$$L_0 = \frac{m}{m-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (5.31)$$

Робота, що витрачається на стискування 1 м<sup>3</sup> всмоктуваного повітря,

$$l'_0 = \frac{m}{m-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (5.32)$$

Робота для отримання 1 м<sup>3</sup> стислого повітря

$$l''_0 = \frac{m}{m-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (5.33)$$

Всі наведені вище формули для визначення роботи компресора дають абсолютну величину роботи.

Теоретична потужність двигуна для приводу компресора

$$N = \frac{L_0}{86000 \cdot 1000}; \quad (5.34)$$

$$N = \frac{V l'_0}{86000 \cdot 1000}; \quad (5.35)$$

$$N = \frac{V l''_0}{86000 \cdot 1000}. \quad (5.36)$$

У формулах (5.21)-(5.36) значення  $p$ ,  $V$ ,  $l_0$ ,  $L_0$ ,  $l'_0$ ,  $l''_0$  відомі відповідно в наступних одиницях;  $p_1$  і  $p_2$  - в Па;  $V$  (об'єм всмоктуваного або стислого повітря) - у м<sup>3</sup>/год;  $l_0$  - в Дж/год;  $l'_0$  і  $l''_0$  - в Дж/м<sup>3</sup> і  $N$  - в кВт.

Реальна індикаторна діаграма значно відрізняється від теоретичної головним чином унаслідок наявності в реальному компресорі шкідливого простору, втрат тиску у впускному і нагнітальному клапанах і теплообміну між газом і стінками циліндра.

За наявності шкідливого простору в індикаторну діаграму (рис. 5.19) вводиться додатковий процес (лінія 3-4) – процес розширення стислого газу, залишеного до кінця нагнітання в шкідливому просторі циліндра.

Відношення об'єму шкідливого простору до об'єму, що характеризується поршнем, тобто величину  $a = V_c/V_h$ , називають відносною величиною шкідливого простору. Унаслідок наявності шкідливого простору продуктивність компресора зменшується.

Величину

$$\lambda_v = \frac{V_1 - V_2}{V_2}, \quad (5.37)$$

яка характеризує ступінь повноти використання робочого об'єму циліндра, називають об'ємним к.к.д. компресора.

Об'ємний к.к.д. компресора можна також виразити через відносну величину шкідливого простору і відношення тисків нагнітання і всмоктування:

$$\lambda_v = 1 - \alpha \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]. \quad (5.38)$$

де  $m$  – показник політропи розширення газу, який залишився в шкідливому просторі.

Теоретична робота ідеального компресора є мінімальною. Дійсну роботу реального компресора визначають за допомогою ізотермічного або адіабатного к.к.д. і механічного к.к.д.:

$$\eta_{из} = \frac{l_{из}}{l_k}; \quad \eta_{ад} = \frac{l_{ад}}{l_k}, \quad (5.39)$$

де  $l_{из}$  і  $l_{ад}$  – відповідно теоретична робота компресора при ізотермічному і адіабатному стискуванні, а  $l_k$  – дійсна робота компресора. Ці коефіцієнти характеризують ступінь досконалості реального процесу порівняно з ідеальним.

Механічний к.к.д. враховує механічні втрати в компресорі. Вплив ізотермічного або адіабатного к.к.д. на механічний називають ефективним к.к.д. компресора  $\eta_k$ .

Реальна потужність, споживана двигуном компресора, для стискування  $M$  кг/год газу

$$N = \frac{L_2}{3600 \cdot 1000 \eta_k}. \quad (5.40)$$

Із збільшенням кінцевого тиску об'ємний к.к.д. одноступінчатого компресора зменшується (рис. 5.20), і отже, зменшується також продуктивність компресора. В граничному випадку, коли крива стискування пересікає лінію, що характеризує об'єм шкідливого простору, всмоктування повітря в циліндр припиняється і, отже, об'ємний к.к.д. і продуктивність компресора стають рівними нулю.

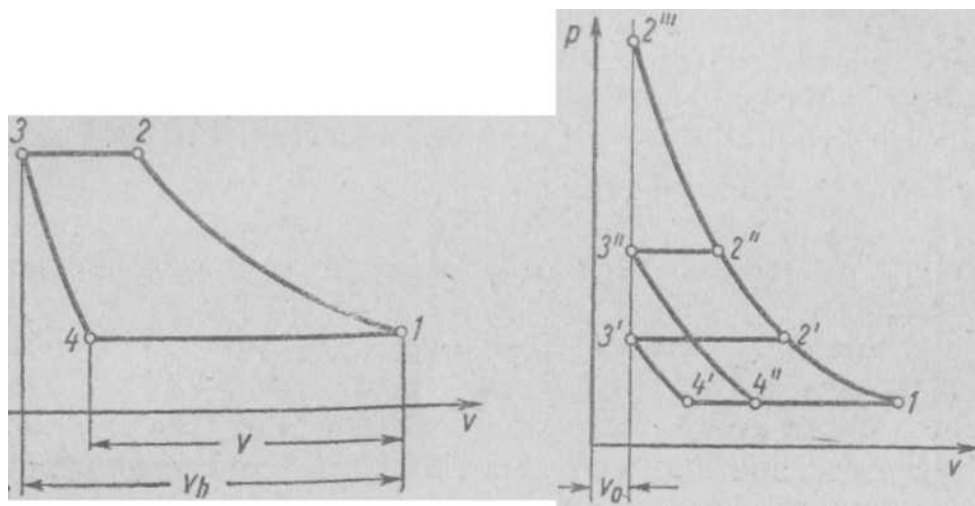


Рис. 1.7  
Рис. 1.7  
Рис. 1.7



На рис. 5.21 показані процеси стискування в триступінчатому компресорі. Лінії 1-2, 3-4 і 5-6 зображують процес адіабатного стискування в кожному циліндрі компресора, а лінії 2-3 і 4-5 – процеси ізобарного охолодження повітря в спеціальних холодильниках.

Процес стискування повітря (газу) в багатоциліндрових або багатоступінчастих компресорах здійснюється послідовно у всіх циліндрах з охолодженням повітря після стискування в кожному циліндрі. Зазвичай при цьому прагнуть до того, аби повітря (газ) після холодильника мало ту ж температуру, з якою він поступив в попередній рівень. Таким чином, для триступінчатого компресора (рис. 5.21)

$$t_1 = t_2 = t_3.$$

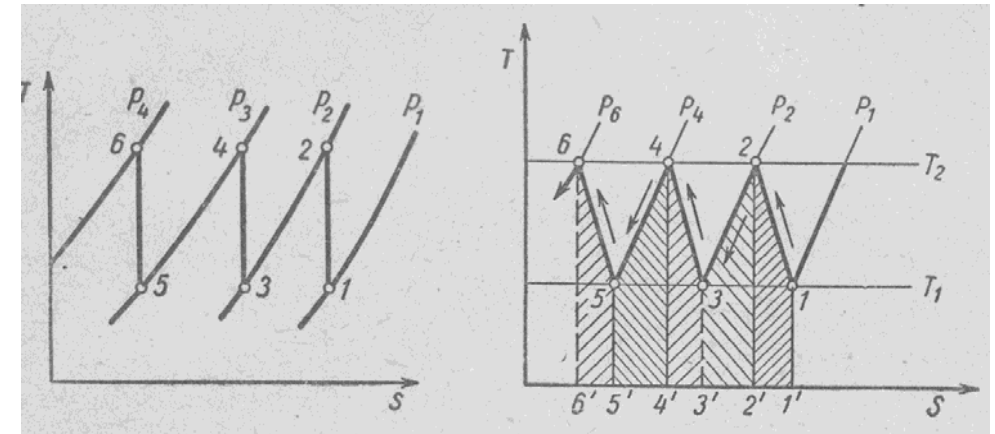


Рис. 5.21

Рис. 5.22

Найбільш вигідним виявляється багатоступінчасте стиснення в разі, якщо відношення тисків в кожному рівні приймається однаковим для всіх рівнів.

Для триступінчатого компресора в цьому випадку

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_3} = \lambda,$$

Звідки

$$\lambda = \sqrt[n]{\frac{p_6}{p_1}}, \text{ або } \lambda = \sqrt[n]{\frac{p_k}{p_1}}, \quad (5.41)$$

де  $\lambda$  – відношення тиску в кожному рівні;  $n$  – число рівнів компресора;  $p_k$  – тиск повітря, що виходить з останнього рівня;  $p_1$  – тиск повітря, що поступає в першу ступінь.

Розподіл тисків по формулі (5.41) наводить до того, що температури повітря на виході з кожного рівня рівні між собою, тобто

$$t_2 = t_4 = t_6,$$

а також до рівності робіт всіх рівнів. Тому для визначення роботи багатоступінча-

стого компресора достатньо знайти роботу одного рівня і збільшити її в  $n$  разів.

На рис. 5.21 і рис. 5.22 приведені графіки адіабатного і політропного стискування газу в триступінчатому компресорі в діаграмі  $TS$ . Лінії 1-2, 3-4 і 5-6 зображують процеси стискування в окремих циліндрах, лінії 2-3 і 4-5 – процеси охолодження газу при постійному тиску в першому і другому холодильниках. Площі (рис. 5.22) 1-2-2'-1', 3-4-4'-3' і 5-6-6'-5' зображують кількість теплоти, віднімані від повітря при політропному стискуванні його в окремих циліндрах компресора і передаванні воді, що охолоджує стінки циліндра. Площі 2-2'-3'-3 і 4-4'-5'-5 зображують кількість теплоти, віднімані від газу при його ізобарному охолодженні в першому і другому холодильниках.

## Розділ VI . Водяна пара

### 6.1.Основні поняття і визначення

На рис. 6.1 зображено діаграму  $pV$  для водяної пари. Кривій I відповідає вода при  $0^\circ \text{C}$ , кривій II – вода при температурі кипіння (або температурі насичення) і кривій III – сухий насичений пар.

Криву II називають нижньою пограничною кривою, криву III – верхньою пограничною кривою, а точку К, що розділяє обидві пограничні криві, називають критичною.

Криві I, II і III ділять всю діаграму на три частини: область між кривими I і II – рідина, область між киплячою рідиною і пари, тобто волога насичена пара, і область правіше кривої III — перегріта пара.

Критична точка К характеризує критичне стан, при якому зникає відмінність у властивостях пари і рідини. Критична температура є найбільшою температурою рідини і її насиченої пари. При температурах вище критичною можливо існування лише перегрітої пари.

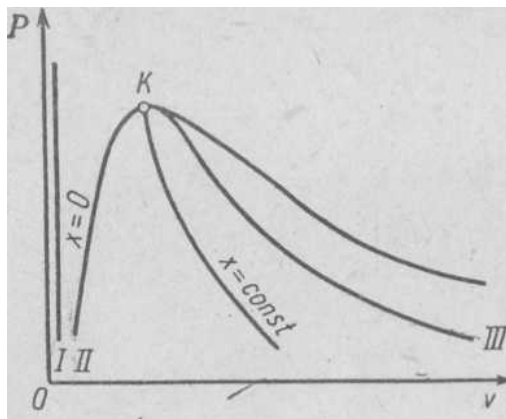


Рис. 6.1

Критичні параметри водяної пари наступні:

$$t_{кр} = 374,15^\circ \text{ C}; p_{кр} = 22,129 \text{ МПа}; V_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

У довідникові літературі можна знайти таблиці водяної пари, зокрема складені М. П. Вукаловичем.

### 6.2. Суха насичена пара.

Стан сухої насиченої пари визначається його тиском або температурою. З довідникових таблиць можна знайти тиск пари (та всі інші його параметри) по температурі, а також температуру пари (і усі інші його параметри) за тиском. Залежності  $p=f(t_n)$ ,  $v''=f(P)$  і  $\rho''=f(p)$  для водяної пари приведені на рис. 6.2 і рис. 6.3.

### 6.3. Волога насичена пара



Рис. 6.2

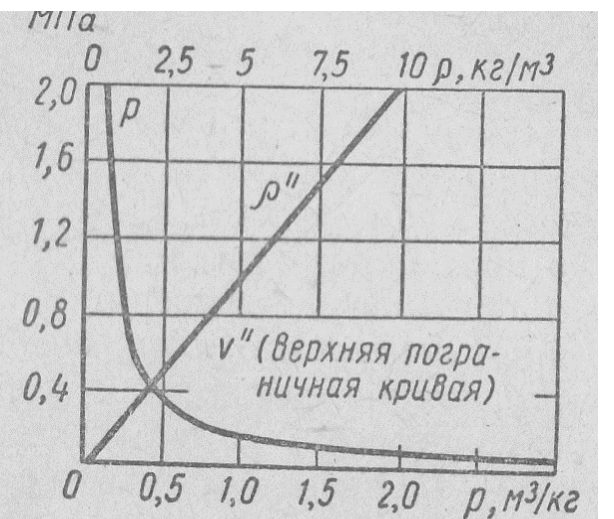


Рис. 6.3

Стан вологої насиченої пари визначається його тиском або температурою і мірою сухості  $x$ . Вочевидь, значення  $x = 0$  відповідає воді в стані кипіння, а  $x = 1$  – сухій насиченій парі.

Температура вологої пари є функція лише тиску і визначається так само, як і температура сухої пари, з довідникових таблиць. Питомий об'єм вологої пари залежить від тиску і від міри сухості і визначається з рівняння

$$v_x = v''_x + (1 - x) v'.$$
 (6.1)

З цієї формули набуваємо значення

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}.$$
 (6.2)

Для тисків до 3 МПа і  $x \geq 0,8$  можна нехтувати останнім членом рівності (6.1). Тоді питомий об'єм вологої насиченої пари

$$v_x = v'' x$$
 (6.3)

Для великих тисків і малих слід користуватися формулою (6.1).

Густина вологої пари

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v^s x + (1-x)v^l}. \quad (6.4)$$

або приблизно

$$\rho_x \approx \frac{1}{v^s} = \frac{\rho^s}{x}, \quad (6.5)$$

#### 6.4. Перегріта пара

Перегріта пара має вищу температуру  $t$  в порівнянні з температурою  $t_n$  сухої насиченої пари того ж тиску. Отже, на відміну від насиченої пари перегріта пара певного тиску може мати різні температури. Для характеристики стану перегрітої пари необхідно знати два її параметра, наприклад тиск і температуру. Різниця температур перегрітої і насиченої пари того ж тиску  $t - t_n$  називають перегрівом пари.

Вельми важливим в теплотехнічних розрахунках є визначення кількості теплоти, що витрачається на окремі стадії процесу паротворення і зміни внутрішній енергії.

Кількість теплоти, витраченої для підігрівання рідини від  $0^\circ \text{C}$  до температури кипіння при постійному тиску, називають теплотою рідини. Її можна визначити як різниця ентальпій рідини в стані кипіння і рідини при тому ж тиску і  $0^\circ \text{C}$ , тобто

$$q_p = i_2 - i_1 = i' - i'_0,$$

а оскільки й при невисоких тисках з достатньою для технічних розрахунків точністю можна вважати рівним нулю, то

$$q_p = i'.$$

Значення внутрішньої енергії рідини можна визначити із загальної залежності

$$i = u + pv.$$

Тоді

$$u' = i' - pv'.$$

а оскільки величина  $pv'$  мала, то при невисоких тисках можна приймати

$$u' = i',$$

тобто внутрішня енергія рідини дорівнює ентальпії рідини. Значення  $i'$ , а отже, і  $u'$  наводяться в таблицях насиченої пари.

Кількість теплоти, необхідну для переведення 1 кг киплячої рідини в суху

насичену пару при постійному тиску, називають теплотою паротворення і позначають буквою  $r$ . Це кількість теплоти витрачається на зміну внутрішньої енергії, зв'язану з подоланням сил зчеплення  $d$  між молекулами рідини, і на роботу розширення ( $\psi$ ).

Величину  $d$  називають внутрішньою теплотою пароутворення, а величину  $r$  - зовнішньою, теплотою пароутворення. Вочевидь

$$\psi = p (u'' - v') \quad (6.6)$$

і

$$r = d + \psi \quad (6.7)$$

Значення  $r$  наводяться в таблицях насиченої пари. Ентальпія  $i''$  сухої насиченої пари визначається по формулі

$$i'' = i' + r \quad (6.8)$$

а зміна внутрішньої енергії при здобутті сухої насиченої пари з 1 кг рідини при  $0^\circ\text{C}$  – з виразу:

$$u'' = i'' - pv''. \quad (6.9)$$

Для вологої насиченої пари маємо наступні співвідношення:

$$i_x = i' + rx \quad (6.10)$$

і

$$u_x = i_x - pv_x \quad (6.11)$$

де  $i_x$  — ентальпія вологої насиченої пари;

$u_x$  — внутрішня енергія вологої насиченої пари.

Кількість теплоти, необхідна для переведення 1 кг сухої насиченої пари в перегріту при постійному тиску називається теплотою перегріву. Вочевидь

$$q_n = \int_{t_n}^t c_p dt \quad (6.12)$$

де  $c_p$  — дійсна масова теплоємність перегрітої пари при постійному тиску.

В результаті ретельних досліджень встановлено, що теплоємності  $c_p$  перегрітої пари залежать від температури і тиску, а також знайдена аналітична залежність

$$c_p = f(p, t). \quad (6.13)$$

Проте користуватися цією залежністю внаслідок її складності і громіздкості незручно. Розрахунки значно спрощуються тим, що в таблицях водяної пари наводяться значення ентальпії перегрітої пари. Тому теплота перегріву може бути визначена з виразу

$$q_n = i - i'' \quad (6.14)$$

## 6.5. Ентропія пари

Ентропія водяної пари відлічується від умовного нуля, як який приймають ентропію води при  $0,01^\circ \text{C}$  і при тиску насичення, відповідному цій температурі, тобто при тиску  $0,0006108 \text{ МПа}$ . Ентропія рідини  $s'$  визначається з виразу

$$s' = c \ln \frac{T_n}{273}, \quad (6.15)$$

де  $c$  – теплоємність води, а  $T_n$  — температура насичення в К.

Значення теплоємності для води з достатньою точністю можна прийняти рівним  $4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Отже

$$s'' = 4,19 \ln \frac{T_n}{273} \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}. \quad (6.16)$$

Якщо рідина підігрівається не до температури кипіння, а до довільної температури  $T$ , то під  $T_n$  у формулі (6.16) слід розуміти цю довільну температуру.

Ентропія сухої насиченої пари  $s''$  визначається з рівняння

$$s'' = s' + \frac{r}{T_n} \quad (6.17)$$

де  $r$  — теплота паротворення.

Ентропія вологої насиченої пари

$$s_x = s' + \frac{r}{T_n} x \quad (6.18)$$

або на підставі формули (1.23)

$$s_x = s' + (s'' - s') x; \quad (196)$$

де  $x$  — ступінь сухості пари.

Ентропія  $s'$  і  $s''$  приведені в таблицях насиченої пари, а  $\frac{r}{T_n}$  можна отримати з цих же таблиць як різниця  $s'' - s'$ .

Ентропія перегрітої пари може бути знайдена з рівняння

$$s = s'' + \int_{T_n}^T c_p \frac{dT}{T}.$$

Значення  $s$  наводяться в таблиці перегрітої пари.

При визначенні стану пари заданих параметрів необхідно виходити з наступного:

для перегрітої і сухої насиченої пари однакового тиску

$$v > v'' \text{ і } t < t_n;$$

при одній і тій же температурі перегрітої і сухої насиченої пари

$$v > v'' \text{ і } p < p_n.$$

За допомогою таблиць водяної пари і цих співвідношень легко знайти стан

пари.

## Розділ VII. Діаграми ентропій для водяної пари

### 7.1. Діаграма $TS$ .

Разом з таблицями насиченої і перегрітої пари виключно важливе значення в теплотехнічних розрахунках мають діаграми  $TS$  і  $iS$ . На рис. 7.1 зображена діаграма  $TS$  для водяної пари. Крива  $O_1K$  – нижня гранична крива ( $x=0$ ), крива  $KB_1$  – верхня гранична крива ( $x=1$ ).

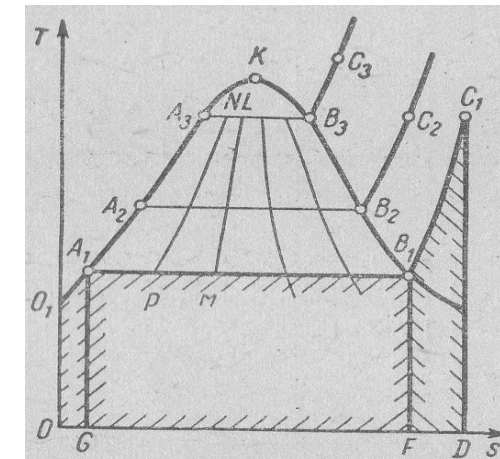


Рис. 7.1

Точка  $O_1$  відповідає температурі 273 К ( $0^\circ \text{C}$ ), точка  $K$  – критичному стану пари.

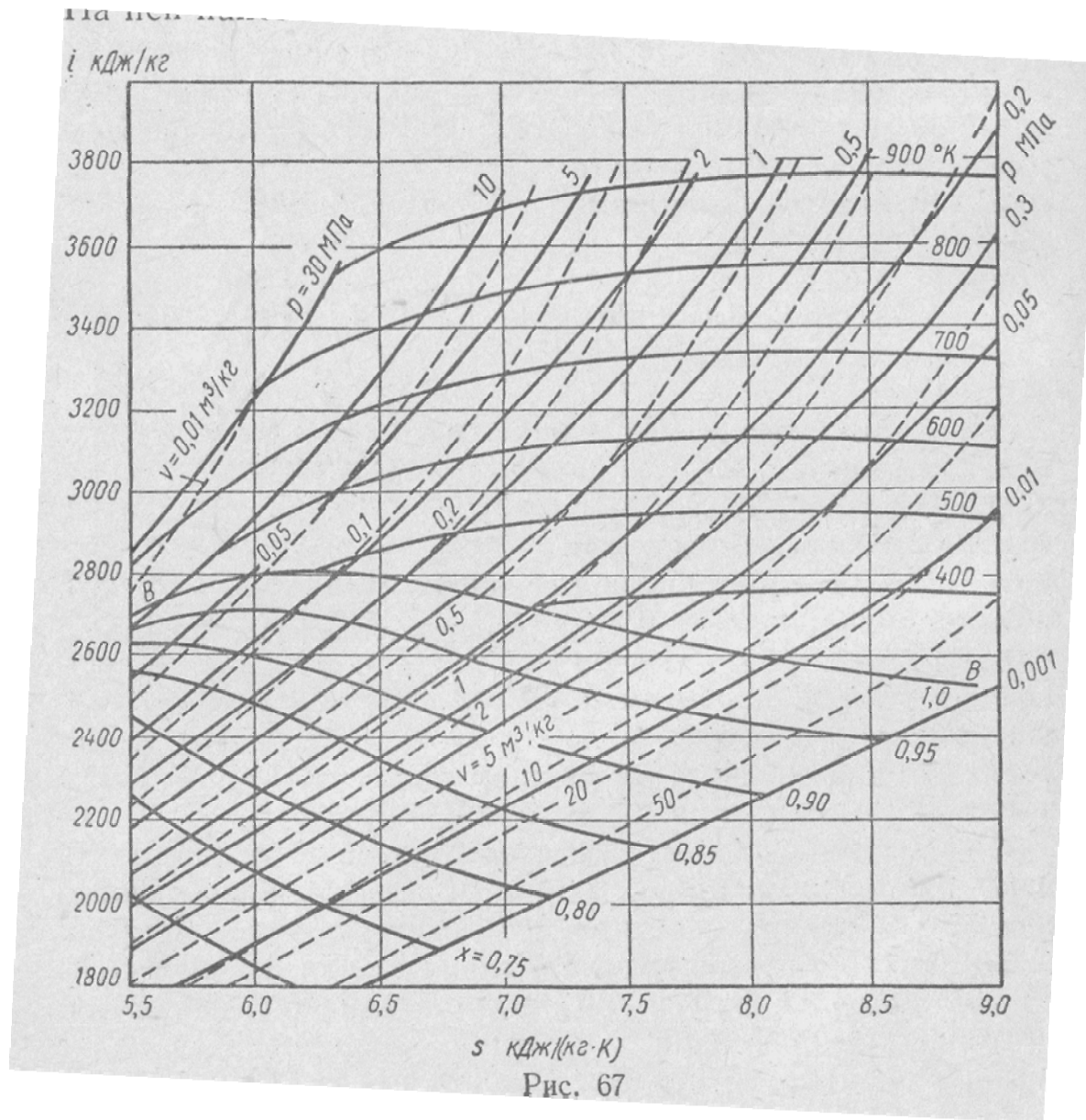
З достатньою для практики точністю можна вважати, що нижня гранична крива збігається з ізобарами рідини. Тому крива  $O_1K$  одночасно зображує процес підігріву рідини при постійному тиску від  $0^\circ \text{C}$  до температури кипіння. Лінії  $AB$  є одночасно ізобарами й ізотермами і зображують процес паротворення. Лінії  $BC$  є ізобарами і зображують процес перегріву пари. Вся область рідини в діаграмі  $TS$  збігається з кривою  $O_1K$ . Між кривими  $O_1K$  і  $KB_1$  розташована область вологої насиченої пари. У діаграмі  $TS$  наносяться також криві однакої міри сухості пари  $NP$ ,  $LM$  і ін. Оскільки площі діаграми  $TS$ , обмежені кривою процесу, крайніми ординатами і віссю абсцис, вимірюють в певному масштабі кількості теплоти, підведеної до робочого тіла при постійному тиску, то площа  $OO_1A_1G$  відповідає ентальпії рідини  $i'$ , площа  $A_1B_1FG$  – теплоті паротворення ( $r$ ) і площа паротворення  $B_1C_1DF$  – теплоті перегріву. Вся площа відповідає ентальпії перегрітої пари  $i$ .

Для розв'язку ряду завдань зручно в діаграмі  $TS$  мати також ізохори ( $V = \text{const}$ ) і криві однакових внутрішніх енергій ( $u = \text{const}$ ).



## 7.2. Діаграма $iS$ .

На рис. 67 змальована діаграма  $iS$  для водяної пари. На ній нанесені ізохори (пунктирні криві), ізобари ізотерми і лінії рівної сухості пари. Лінія  $BB$  – верхня гранична крива. Нижче за неї розташована область вологої насиченої пари, вище за неї – область перегрітої пари. Ізобари в області насиченої пари – прямі лінії, що є одночасно ізотермами. При переході в область перегрітої пари ізобари і ізотерми



розділяються, і кожна з них є окремою кривою.

Зазвичай частина діаграми  $iS$  для області вологої пари з мірою сухості пари нижче 0,5 відкидається.



Діаграма  $iS$  має багато важливих властивостей: вона дозволяє швидко визначати параметри пари з достатньою для технічних розрахунків точністю, дає можливість визначати ентальпію водяної пари і різниці ентальпій у вигляді відрізків, надзвичайно наочно змальовує адіабатний процес, що має велике значення при вивченні парових двигунів, і, нарешті, дозволяє швидко, наочно і досить точно вирішувати різні практичні завдання.

В довідникових книгах приводяться діаграми  $iS$  водяної пари, зокрема складені по таблицях М. П. Вукаловіча.

### 7.3. Процеси зміни стану водяної пари

При вирішенні завдань, пов'язаних із зміною стану водяної пари, вживання графічного або аналітичного методу великою мірою визначається характером процесу. Проте в окремих випадках удається визначити всі необхідні величини одним з цих способів; тому найчастіше доводиться одночасно користуватися як графічним, так і аналітичним способами. При цьому частина параметрів пари і величин, що підлягають визначенню, знаходять з діаграми, а останні визначають аналітичним шляхом із застосуванням таблиць водяної пари.

У всіх випадках досить важливо визначити, до якої пари (насиченої або перегрітої) відноситься початковий або кінцевий стан. Це питання легко вирішується за допомогою таблиць і діаграм.

Для аналітичного визначення необхідних параметрів і величин треба користуватися наступними співвідношеннями:

1. **Ізохорний процес** (рис. 7.3). Якщо в початковому стані пар перегрітий, а в кінцевому — вологий (випадок а), то

$$v_1 = v_2 = v_2 x_2 + (1 - x_2) v_2' \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7.1)$$

Оскільки останній член вельми малий і їм часто можна нехтувати, то

$$x_2 = \frac{v_1}{v_2'} \quad (7.2)$$

Якщо в початковому і кінцевому станах пар вологий насичений (випадок б), то

$$v_1' x_1 + (1 - x_1) v_1'' = v_2' x_2 + (1 - x_2) v_2'' \quad (7.3)$$

Якщо в обох частинах рівняння нехтувати другими членами, то отримаємо

$$\frac{v_2''}{v_1'} = \frac{v_1''}{v_2'} \quad (7.4)$$

Оскільки при  $V = \text{const}$  робота пари дорівнює нулю, то що вся повідомляєть-

ся парі теплота (або віднімаючи у нього) витрачається на збільшення (зменшення) його внутрішньої енергії і, отже

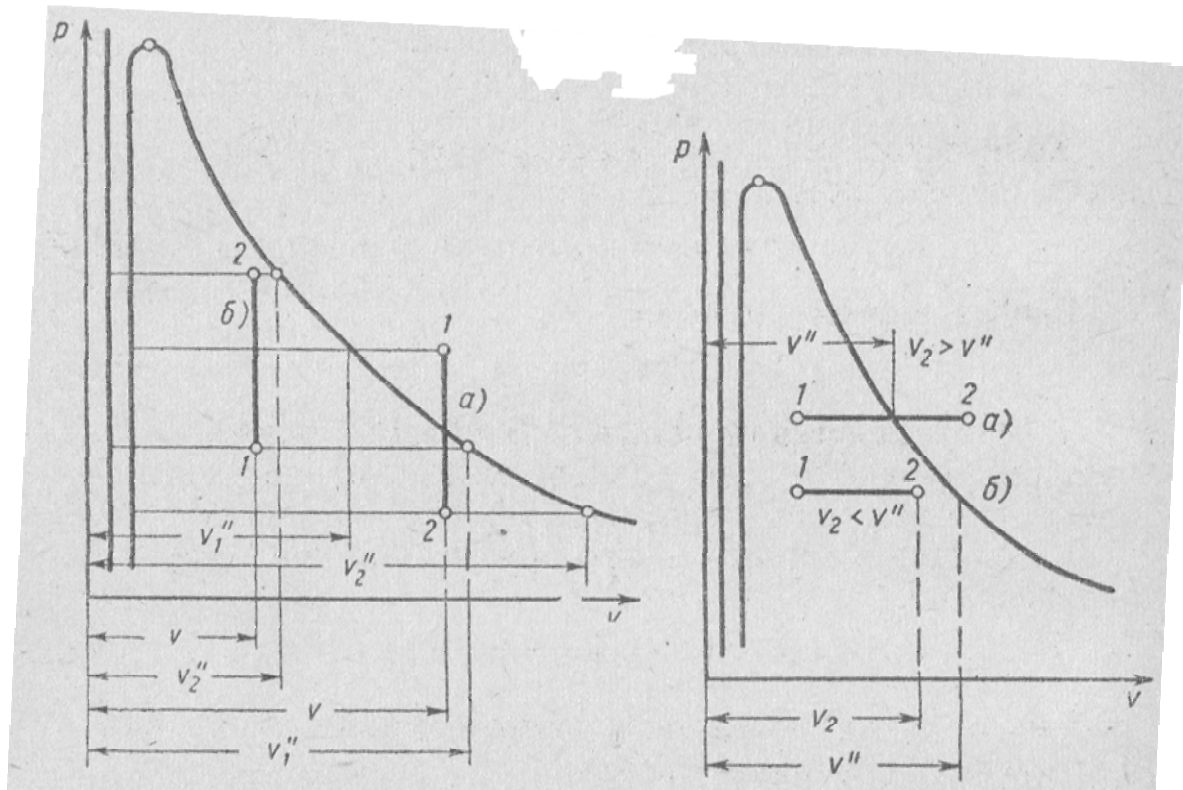


Рис. 7.3

Рис. 7.4

$$q_v = u_2 - u_1 \quad (7.5)$$

2. **Ізобарний процес** (рис. 7.4). Якщо пара в початковому стані волога насичена, а в кінцевому стані перегріта (випадок а), то

$$v_1 = v'' x_1 + v' (1 - x_1) \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7.6)$$

Якщо пара в початковому і кінцевому станах волога (випадок б), то, нехтуючи складовим  $v' (1 - x_1)$ , отримуємо

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.7)$$

Кількість теплоти, що бере участь в ізобарному процесі, визначається з рівняння

$$q_p = i_2 - i_1. \quad (7.8)$$

Робота в цьому процесі

$$l = p (v_2 - v_1). \quad (7.9)$$

7. **Ізотермічний процес.** В області вологої пари ізотермічний процес одно-

часно є ізобарним тому для його справедливо рівняння (7.7).

Кількість теплоти в ізотермічному процесі легко визначається з діаграми  $Ts$ :

$$Q = T(S_2 - S_1). \quad (7.10)$$

Робота пара у ізотермічному процесі знаходиться з рівняння першого закону термодинаміки

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

звідки

$$l = q - \Delta u = T(s_2 - s_1) - (u_2 - u_1). \quad (7.11)$$

**4. Адіабатний процес.** З достатньою точністю можна прийняти для водяної пари залежність

$$pv^k = \text{const.}$$

Проте величина  $k$  в цьому рівнянні немає змісту відношення теплоємностей, а є лише коефіцієнтом підібраним дослідним шляхом. Для сухої насиченої пари

$$k = 1,135. \quad (7.12)$$

Для вологої пари

$$k = 1,035 + 0,1x, \quad (7.13)$$

де  $x$  – міра сухості.

Для перегрітої пари

$$k = 1,7.$$

Для аналітичного обчислення міри сухості пари в кінцевому стані користуються рівнянням

$$s_1 = s_2 = s'_2 + \frac{r_2 x_2}{T_{s2}}, \quad (7.14)$$

звідси

$$x_2 = \frac{(s_1 - s'_2)}{r_2} = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2}, \quad (7.15)$$

Робота пари при адіабатному розширенні

$$l = u_1 - u_2. \quad (7.16)$$

Міра сухості пари в кінці адіабатного розширення визначається за допомогою діаграми  $iS$ . Якщо в початковому стані пар сухий насичений, то точка, що характеризує його стан, легко знаходиться в перетині відповідної ізобари  $p_1$  і верхньою граничною кривою (рис. 7.5). Якщо в початковому стані пар вологий, то його стан зобразиться точкою, що знаходиться в перетині відповідної ізобари  $p_1$  і кривій заданої сухості пари. Якщо пара перегріта, то точка  $l$ , що характеризує його стан, знаходиться в перетині ізобари  $p_1$  і ізотерми  $t_1$ . Оскільки для оборотного процесу адіабата на діаграмі зображується прямою, яка паралельна осі ординат, то

кінцевий стан пари легко знаходиться графічно по точці перетину адіабати із заданою кінцевою ізобарою (точка 2). Міра сухості пари визначається за значенням кривої рівній сухості, що проходить через точку 2. Ентальпія і ентропія пари як в

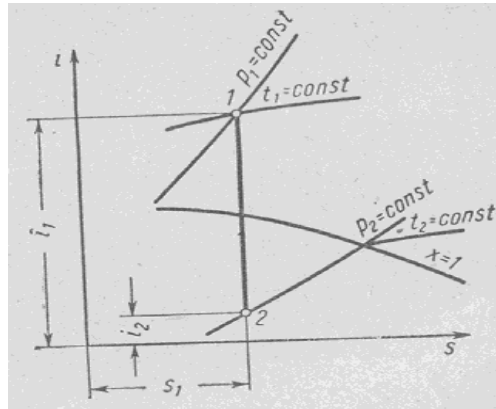


Рис. 7.5

початковому, так і в кінцевому стані знаходяться дуже легко по відповідних значеннях осі ординат і осі абсцис.

Температура пари в кінцевому стані також визначається просто. Якщо цей стан зображується точкою, що знаходиться в області перегрітої пари, то температура його відлічується за значенням ізотерми, що проходить через цю точку. Якщо ж в кінцевому стані пар вологий, то потрібно від точки, що характеризує його стан, піднятися по відповідній ізобарі до верхньої граничної кривої. Температура цієї точки, відлічувана по відповідній ізотермі, є температурою насиченої пари кінцевого тиску.

### Приклади розв'язування задач

**Задача №1.** Газ масою  $m$  має початкові параметри: тиск  $p_1$  та температуру  $T_1$ . Після політропної зміни стану, його об'єм став рівним  $V_2$ , а тиск  $p_2$ . Знайти кінцеву температуру газу  $T_2$ , показник політропного процесу  $n$ , теплоємність, зміну внутрішньої енергії, виконану роботу, підведене або відведене тепло при цьому, зміну ентропії. Знайти ті ж самі величини, якщо зміна стану газу з початкових параметрів відбувається за ізотермою до кінцевого об'єму  $V_2$ . Зобразити процес в  $p$ - $V$  та  $T$ - $S$  координатах. Зробити висновок.

Газ –  $H_2$  (водень),  $T_1 = 273$  К,  $V_2 = 4$  м<sup>3</sup>,  $m = 13$  кг,  $p_1 = 0,4$  МПа,  $p_2 = 0,8$  МПа.

1. З рівняння стану ідеального газу знайдемо початковий об'єм  $V_1$ , для цьо-

ГО визначимо  $R$  для водню:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu_{H_2}} = \frac{8314}{2,016} = 4124 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К},$$

$$V_1 = \frac{m \cdot R \cdot T_1}{P_1} = \frac{13 \cdot 4124 \cdot 273}{0,4 \cdot 10^6} = 36,6 \text{ м}^3.$$

2. Визначимо показник політропного процесу:

Використовуючи рівняння політропного процесу  $pV^n = \text{const}$  знаходимо показник політропи:

$$n = \frac{\ln(P_1 / P_2)}{\ln(V_2 / V_1)} = \frac{\ln\left(\frac{0,4}{0,8}\right)}{\ln\left(\frac{4}{36,6}\right)} = 0,31.$$

3. Підставивши в рівняння політропного процесу  $pV^n = \text{const}$  значення  $pV = mRT$ , отримаємо:

$$T_1 \cdot V_1^{n-1} = T_2 \cdot V_2^{n-1} = \text{const}.$$

Отже температура в кінцевому стані буде дорівнювати:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = 273 \cdot \left(\frac{36,6}{4}\right)^{0,31-1} = 59,6 \text{ К}.$$

4. Теплоємність процесу визначаємо за формулою:

$$c_n = \frac{R}{\gamma - 1} \cdot \frac{n - \gamma}{n - 1},$$

$$c_n = \frac{4124}{1,4 - 1} \cdot \frac{0,31 - 1,4}{0,31 - 1} = 16289 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К},$$

де  $\gamma = 1,4$ .

5. Визначимо зміну внутрішньої енергії в політропному процесі:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = \frac{R}{\gamma - 1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{4124}{1,4 - 1} \cdot (59,6 - 273) = -2,25 \text{ МДж}.$$

6. Визначимо роботу процесу за формулою:

$$L = \frac{p_1 \cdot V_1}{n - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 36,6}{0,31 - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,8 \cdot 10^6}{0,4 \cdot 10^6} \right)^{\frac{0,31-1}{0,31}} \right] = -16,68 \text{ МДж}.$$

7. Визначимо кількість тепла в політропному процесі:

$$Q = m \cdot c_n \cdot (T_2 - T_1) = 16289 \cdot 13 (59,6 - 273) = -45,18 \text{ МДж}.$$

8. Після цього визначаємо зміну ентропії:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m \cdot c_n \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 13 \cdot 16289 \cdot \ln\left(\frac{59,6}{273}\right) = -0,32 \text{ МДж}.$$

б) Рівняння ізотермічного процесу знайдемо з рівняння Клапейрона-Менделєєва, якщо  $T = \text{const}$ ;

$$pV = RT = \text{const} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

або

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad \Rightarrow \quad V_1 = \frac{p_2 \cdot V_2}{p_1} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 4}{0,4 \cdot 10^6} = 8 \text{ м}^3.$$

Теплоємність ізотермічного процесу  $c = \pm\infty$ , зміна внутрішньої енергії ідеального газу в ізотермічному процесі:

$$\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0, \text{ оскільки } T_1 = T_2 = \text{const}.$$

Робота ізотермічного процесу:

$$L = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 13 \cdot 4124 \cdot 273 \cdot \ln\left(\frac{0,4}{0,8}\right) = -10,4 \text{ кДж},$$

Оскільки  $Q = L$ , то

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m \cdot R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 13 \cdot 4124 \cdot \ln\left(\frac{0,4}{0,8}\right) = -37,160 \text{ кДж / К}.$$

Для побудови графіків процесу в  $pV$  координатах визначаємо проміжні значення параметрів газу:

а) при політропному процесі використовуємо рівняння

$$p_1 = p_2 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n,$$

на основі отриманих даних будуємо графік.

б) при ізотермічному стисканні:

$$p_2 \cdot V_2 = p_1 \cdot V_1 \quad \Rightarrow \quad p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2},$$

в) для побудови графіків процесу в  $TS$  координатах визначаємо проміжні

значення параметрів газу:

$$\Delta S_2 = m \cdot c_n \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right),$$

на основі отриманих даних будуємо графік.

**Задача №2.** Склад газової суміші в об'ємних відсотках даний відповідно останніх цифр залікової книжки. Визначити:

- а) середню молекулярну масу і густину суміші за нормальних умов;
- б) об'ємну та масову середні теплоємності суміші при сталому тиску;
- в) кількість тепла, яке відводиться від 1 кг суміші при її ізобарному охолодженні від температури  $T_2$  до температури  $T_1$  за одну годину.

$O_2=60\%$ ,  $CO_2=40\%$ ,  $t_1=300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2=800\text{ }^\circ\text{C}$ .

1. густину суміші при нормальних умовах визначаємо по формулі:

$$\rho_{\text{сум}} = (r_1 \cdot \rho)_{O_2} + (r_2 \cdot \rho)_{CO_2} = 0,6 \cdot 1,429 + 0,4 \cdot 1,977 = 1,6482 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

2. Визначаємо молекулярну масу суміші:

$$\mu_{\text{сум}} = (r_1 \cdot \mu)_{O_2} + (r_2 \cdot \mu)_{CO_2} = 0,6 \cdot 32 + 0,4 \cdot 44.01 = 36,8 \text{ кг} / \text{К} \cdot \text{моль}.$$

3. Для визначення об'ємної та масової середньої теплоємності суміші при  $p = \text{const}$ , в інтервалі температур від  $300\text{ }^\circ\text{C}$  до  $800\text{ }^\circ\text{C}$  по таблиці треба визначити:

$$(c'_{pm})_{CO_2} /_0^{300} = 1,8627 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{CO_2} /_0^{800} = 2,1311 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{O_2} /_0^{300} = 1,3561 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{O_2} /_0^{800} = 1,4499 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{CO_2} /_0^{300} = 0,9487 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{CO_2} /_0^{800} = 1,0852 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{O_2} /_0^{300} = 0,9500 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К};$$

$$(c'_{pm})_{O_2} /_0^{300} = 1,0157 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К}.$$

4. Визначаємо об'ємну середню теплоємність суміші:

$$(c'_{pm})_{O_2} /_{300}^{800} = \frac{c'_{pm} /_0^{800} \cdot T_2 - c'_{pm} /_0^{800} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1,4499 \cdot 1073 - 1,3561 \cdot 573}{1073 - 573} = 1,5062 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$(c'_{pm})_{CO_2} /_{300}^{800} = \frac{2,1311 \cdot 1073 - 1,8627 \cdot 573}{1073 - 573} = 2,2921 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$c'_{pm_{\text{сум}}} = (r \cdot c'_{pm})_{O_2} + (r \cdot c'_{pm})_{CO_2} = (0,6 \cdot 1,5062) + (0,4 \cdot 2,2921) = 1,8206 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

5. Визначаємо масову середню теплоємність суміші. Для цього потрібно визначити масові долі кожного газу за формулою:

$$g = r_1 \frac{\mu_i}{\mu_{\text{сум}}},$$

$$g_{O_2} = 0,6 \cdot \frac{32}{36,8} = 0,52,$$

$$g_{CO_2} = 0,4 \cdot \frac{44,01}{36,8} = 0,48,$$

$$(c_{pm})_{O_2} /_{300}^{800} = \frac{c_{pm} /_0^{800} \cdot T_2 - c_{pm} /_0^{800} \cdot T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1,0157 \cdot 1073 - 0,9500 \cdot 573}{1073 - 573} = 1,0551 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}},$$

$$(c_{pm})_{CO_2} /_{300}^{800} = \frac{1,0852 \cdot 1073 - 0,9487 \cdot 573}{1073 - 573} = 1,167 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

6) Визначаємо кількість тепла, яке відводиться від суміші при її ізобарному охолодженні:

$$c_{pm_{\text{сум}}} = (g \cdot c_{pm})_{O_2} + (g \cdot c_{pm})_{CO_2} = (0,52 \cdot 1,0551) + (0,48 \cdot 1,1671) = 1,1089 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

**Задача №3.** Розрахуйте параметри робочого тіла в усіх точках ідеального циклу поршневого двигуна з ізохорним – ізобарним підведенням тепла, якщо відомо тиск  $p_1$  та температура  $T_1$  на початку стискування. Ступінь стискування  $\varepsilon$ , ступінь попереднього розширення  $\rho$  і ступінь підвищеного тиску  $\lambda$ . Розрахувати роботу циклу, зміну ентропії окремих процесів циклу. Робочим тілом є повітря з незмінним значенням теплоємності. Побудувати діаграму циклу в  $p$ - $V$  та  $T$ - $S$  координатах.

$$p_1 = 0,17 \text{ МПа}, T_1 = 290 \text{ К}, \varepsilon = 17, \rho = 1,3, \lambda = 1,8, \mu_{\text{п}} = 28,96 \text{ кг/К}.$$

1. Знаходимо параметри робочого тіла.

1.1. Спочатку знаходимо об'єм за рівнянням Клапейрона - Менделєєва:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} R T_1 \Rightarrow V_1 = \frac{m R T_1}{\mu p_1} = \frac{2,5 \cdot 8314 \cdot 290}{0,17 \cdot 10^6 \cdot 28,96} = 1,2 \text{ м}^3.$$

Вводячи безрозмірні параметри, які характеризують цикл знаходимо:



$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{1,2}{17} = 0,07 \text{ м}^3,$$

$$V_3 = V_2,$$

$$V_4 = V_3 \cdot \rho = 0,07 \cdot 1,3 = 0,091 \text{ м}^3,$$

$$V_5 = V_1.$$

1.2. Знайшовши об'єм в усіх характерних точках тактів поршневого двигуна, ми визначаємо тиск:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^\gamma = 0,17 \cdot 10^6 \cdot 17^{1,4} = 8,98 \text{ МПа},$$

$$p_3 = p_2 \cdot \lambda = 8,98 \cdot 1,8 = 16,16 \text{ МПа},$$

$$p_4 = p_3,$$

$$p_5 = \left( \frac{V_4}{V_5} \right) \cdot p_4 = \left( \frac{0,091}{1,2} \right) \cdot 16,16 = 0,38 \text{ МПа}.$$

1.3. Знайшовши об'єми  $V$  та тиски  $p$ , розраховуємо температури:

$$T_1 = 290 \text{ К},$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\gamma-1} = 290 \cdot 1,4^{1,4-1} = 331,76 \text{ К},$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 331,76 \cdot 1,8 = 597,168 \text{ К},$$

$$T_4 = T_3 \cdot \rho = 597,168 \cdot 1,3 = 776,32 \text{ К},$$

$$T_5 = T_4 \cdot \left( \frac{V_4}{V_5} \right)^{K-1} = \left( \frac{0,091}{1,2} \right) \cdot 776,32 = 267,83 \text{ К}.$$

2.3. Знайшовши параметри робочого тіла ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) розраховуємо роботу циклу:

$$l_{1-2} = (p_1 V_1 - p_2 V_2) \frac{1}{\gamma - 1} = (0,17 \cdot 1,2 - 8,98 \cdot 0,07) \cdot \frac{1}{1,4 - 1} = -1,05 \text{ Дж},$$

$$l_{2-3} = 0,$$

$$l_{3-4} = (p_4 V_4 - p_3 V_3) \frac{1}{\gamma - 1} = (16,16 \cdot 0,091 - 16,16 \cdot 0,07) \cdot \frac{1}{1,4 - 1} = 0,339 \text{ Дж},$$

$$l_{4-5} = (p_4 V_4 - p_5 V_5) \frac{1}{\gamma - 1} = (16,16 \cdot 0,091 - 0,02 \cdot 1,2) \cdot \frac{1}{1,4 - 1} = 3,615 \text{ Дж},$$

$$l_{5-1} = 0.$$

Після того як ми знайшли роботу циклів, ми знаходимо загальну роботу:

$$l_{3AG} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1} = -1,05 + 0,339 + 3,615 = 2,904 \text{ Дж}.$$

3. Знаходимо кількість підведеного та відведеного тепла:

$$Q_{\text{підв}}(2-3) = c_V (T_3 - T_2) = 0,72(597,168 - 331,76) = 191,09 \text{ Дж},$$

$$Q_{\text{підв}}(3-4) = c_P (T_4 - T_3) = 1,1(776,32 - 597,168) = 197,07 \text{ Дж}.$$

Знаходимо загальну кількість підведеного тепла:

$$Q_{\text{підв. заг}} = Q_{\text{підв}}(2-3) + Q_{\text{підв}}(3-4) = 191,09 + 197,07 = 388,16 \text{ Дж}.$$

Знайдемо кількість відведеного тепла:

$$Q_{\text{відв}}(5-1) = c_V(T_5 - T_1) = 0,72(267,80 - 290) = -15,96 \text{ Дж}.$$

4. Після цього знайдемо термічний коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_{\text{відв}}}{Q_{\text{підв}}} = 1 - \frac{15,96}{388,16} = 0,96.$$

5. Заключним етапом у розрахунку енергетичного балансу ДВЗ є знаходження зміни ентропії окремих процесів циклу:

$$\Delta S_{1-2} = 0,$$

$$\Delta S_{2-3} = S_3 - S_2 = c_V \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,72 \cdot \ln \frac{597,168}{331,76} = 0,423 \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$\Delta S_{3-4} = S_4 - S_3 = c_P \ln \frac{T_4}{T_3} = 1,1 \cdot \ln \frac{776,32}{597,168} = 0,288 \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$\Delta S_{4-5} = 0,$$

$$\Delta S_{5-1} = S_1 - S_5 = c_V \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,72 \cdot \ln \frac{290}{267,83} = 0,055 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Знайдемо загальну зміну ентропії циклу:

$$\Delta S_{\text{ЗАГ}} = \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} + \Delta S_{3-4} + \Delta S_{4-5} + \Delta S_{5-1} = 0,766 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Задача №4. Плоска стальна стінка товщиною  $\delta$  з одного боку нагрівається гарячим газом з температурою  $T_{\text{г}}$ , а з іншого охолоджується водою з температурою  $T_{\text{в}}$ . Знайти коефіцієнт теплопровідності від газу до води, питомий тепловий потік з кожного боку, якщо відомі коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки  $\alpha_{\text{г}}$ , від стінки до води  $\alpha_{\text{в}}$ , коефіцієнт теплопровідності сталі, який дорівнює  $\lambda = 46 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Розрахувати усі температури, якщо стінка має товщину  $\delta_{\text{н}}$  від води з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_{\text{н}} = 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

$\delta = 4 \text{ мм}$ ,  $\delta_{\text{н}} = 1,3 \text{ мм}$ ,  $t_{\text{г}} = 750^\circ \text{C}$ ,  $t_{\text{в}} = 20^\circ \text{C}$ ,  $\alpha_{\text{г}} = 26 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ,  $\alpha_{\text{в}} = 700 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .  $T_{\text{г}} = (750 + 273) \text{ К} = 1023 \text{ К}$ ,  $T_{\text{в}} = 293 \text{ К}$ .

1. Знайдемо коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}} = \frac{1}{\frac{1}{26} + \frac{0,004}{46} + \frac{1}{700}} = 25,02 \quad \frac{Bm}{m^2 \cdot K}.$$

2. Визначимо питомий тепловий потік:

$$q = K \cdot (T_z - T_B) = 25,02 \cdot (1023 - 293) = 18,25 \quad \frac{\kappa Bm}{m^2}.$$

3. Температура поверхні стінки з боку газу:

$$t_{1CT} = t_z - \frac{q}{\alpha_z} = 750 - \frac{18,25 \cdot 10^3}{26} = 47,69 \text{ } ^\circ C.$$

4. Температура поверхні стінки з боку повітря:

$$t_{2CT} = t_B + \frac{q}{\alpha_B} = 20 + \frac{18260}{700} = 46,08 \text{ } ^\circ C.$$

5. Визначаємо коефіцієнт теплопередачі від газу до води з накипом:

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{\delta}{\lambda_H} + \frac{\delta_H}{\alpha_B} + \frac{1}{\alpha_B}} = \frac{1}{\frac{1}{26} + \frac{0,004}{46} + \frac{1}{700} + \frac{0,0013}{0,7}} = 23,91 \quad \frac{Bm}{m^2 K}.$$

6. Визначимо питомий тепловий потік

$$q' = K' \cdot (T_z - T_B) = 23,91 \cdot (1023 - 293) = 17,454 \quad \frac{\kappa Bm}{m^2}.$$

7. Визначаємо температуру стінки зі сторони газу:

$$t'_{1CT} = t_z - \frac{q'}{\alpha_r} = 750 - \frac{17454}{26} = 78,68 \text{ } ^\circ C.$$

8. Визначаємо температуру стінки зі сторони води:

$$t'_{2CT} = t_B + \frac{q'}{\alpha_B} = 20 + \frac{17454}{700} = 44,93 \text{ } ^\circ C.$$

9. Температура поверхні сталюї стінки в місці переходу до накипу:

$$t'_H = t'_{1CT} - q' \cdot \frac{\delta}{\lambda} = 78,68 - 17454 \cdot \frac{0,0013}{46} = 78,19 \text{ } ^\circ C.$$

Визначені температури записуємо в системі СІ.

**Задача №5.** Розрахувати кількість тепла, яке відходить від горизонтальної труби за одну годину, якщо по трубі тече газ, а труба знаходиться в повітрі. Середня температура газу дорівнює  $T_g$  і повітря  $T_n$ . Зовнішній діаметр труби дорівнює  $D_3$ , внутрішній  $d_6$ , довжина труби  $L$ . Коефіцієнт тепловіддачі від газу до труби дорівнює  $\alpha_T = 30 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , коефіцієнт тепловіддачі від труби до повітря  $\alpha_n = 5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Коефіцієнт теплопровідності сталі дорівнює  $\lambda_{CT} = 36 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

$$t_g = 600^\circ\text{C}, t_n = 15^\circ\text{C}, D_3 = 80 \text{ мм}, d_6 = 70 \text{ мм}, l = 7 \text{ м}.$$

1. Визначаємо кількість тепла що відходить від горизонтальної труби по формулі:

$$Q = q_e \cdot l,$$

де  $q_e$  – тепловий потік,  $l$  – довжина труби.

Визначимо тепловий потік:

$$q_e = \frac{t}{\frac{1}{\pi \cdot d_B \cdot \alpha_T} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{D_3}{d_B} + \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot \alpha_n}} =$$

$$= \frac{600 - 15}{\frac{1}{3,14 \cdot 0,07 \cdot 30} + \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 36} \ln \left( \frac{0,08}{0,07} \right) + \frac{1}{3,14 \cdot 0,08 \cdot 5}} = 616,82 \text{ Вт / м}.$$

$$Q = 616,82 \cdot 7 = 4317,75 \text{ Дж}.$$

2. Визначаємо кількість тепла, що відводиться від горизонтальної труби за одну годину:

$$Q = 4317 / 75 \cdot 3600 = 15,54 \text{ МДж}.$$

**Завдання до контрольної роботи**

Номер варіанту до виконання контрольної роботи з дисципліни „Теплотехніка та теплопостачання ” вибирається по табл.1 за двома останніми цифрами залікової книжки. Номер варіанта знаходиться на перетині горизонтального рядка, який відповідає останній цифрі залікової книжки та вертикального стовпчика, що відповідає передостанній цифрі залікової книжки.

Наприклад, студент, який має залікову книжку з номером 9230064, за табл.1 обирає варіант 17. Потім згідно з табл.2 після обраного варіанта 17, студент обирає відповідні дані для вирішення задач та номери теоретичних питань (додаток 1).

Таблиця 1

Номера варіантів до виконання контрольної роботи

| Остання цифра залікової книжки | Передостання цифра залікової книжки |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                | 1                                   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 0  |
| 0                              | 10                                  | 11 | 5  | 20 | 12 | 13 | 4  | 14 | 8  | 18 |
| 1                              | 9                                   | 12 | 4  | 19 | 11 | 14 | 3  | 13 | 7  | 17 |
| 2                              | 8                                   | 13 | 3  | 18 | 10 | 15 | 2  | 12 | 6  | 16 |
| 3                              | 7                                   | 14 | 2  | 17 | 9  | 16 | 1  | 11 | 5  | 15 |
| 4                              | 6                                   | 15 | 1  | 16 | 8  | 17 | 20 | 10 | 4  | 14 |
| 5                              | 5                                   | 16 | 6  | 15 | 7  | 18 | 19 | 9  | 3  | 20 |
| 6                              | 4                                   | 17 | 7  | 14 | 6  | 1  | 18 | 8  | 2  | 19 |
| 7                              | 3                                   | 18 | 8  | 13 | 5  | 2  | 17 | 7  | 1  | 11 |
| 8                              | 2                                   | 19 | 9  | 12 | 4  | 20 | 16 | 6  | 10 | 12 |
| 9                              | 1                                   | 20 | 10 | 11 | 3  | 19 | 15 | 5  | 9  | 13 |

**Задача №1**

1.Газ масою  $m$  має початкові параметри: тиск  $p_1$  та температуру  $T_1$ . Після політропної зміни стану, його об'єм став рівним  $V_2$ , а тиск  $p_2$ . Знайти кінцеву температуру газу  $T_2$ , показник політропного процесу  $n$ ,

теплоємність, зміну внутрішньої енергії, виконану роботу, підведене або відведене тепло, зміну ентропії. Знайти ті ж самі величини, якщо зміна стану газу з початкових параметрів відбувається за ізотермою до кінцевого об'єму  $V_2$ . Зобразити процес в  $p$ - $V$  та  $T$ - $S$  координатах. Зробити висновок.

2.Відповісти на питання.

### Задача №2

1. Склад газової суміші в об'ємних відсотках даний відповідно останніх цифр залікової книжки. Визначити:

а) середню молекулярну масу і густину суміші за нормальних умов;

б) об'ємну та масову середні теплоємності суміші при сталому тиску;

в) кількість тепла, яке відводиться від 1 кг суміші при її ізобарному охолодженні від температури  $T_2$  до температури  $T_1$  за одну годину.

2. Відповісти на питання.

### Задача №3

1. Розрахуйте параметри робочого тіла в усіх точках ідеального циклу поршневого двигуна з ізохорним - ізобарним підведенням тепла, якщо відомо тиск  $p_1$ , та температура  $T_1$  на початку стискування. Ступінь стискування  $\varepsilon$ , ступінь попереднього розширення  $\rho$  і ступінь підвищеного тиску  $\lambda$ . Розрахувати роботу циклу, зміну ентропії окремих процесів циклу. Робочим тілом є повітря з незмінним значенням теплоємності. Побудувати діаграму циклу в  $p$ - $V$  та  $T$ - $S$  координатах.

2. Відповісти на питання.

### Задача №4

1.Плоска стальна стінка товщиною  $\delta$  з одного боку нагрівається гарячим газом з температурою  $T_g$ , а з іншого охолоджується водою з температурою  $T_v$ . Знайти коефіцієнт теплопровідності від газу до води, питомий тепловий потік з кожного боку, якщо відомі коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки  $\alpha_g$ , від стінки до води  $\alpha_v$ , коефіцієнт теплопровідності сталі, який дорівнює  $\lambda_H = 46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Розрахувати усі

температури, якщо стінка має товщину  $\delta_H$  від води з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_H = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

2.Відповісти на питання.

Задача №5

1. Розрахувати кількість тепла, яке відходить від горизонтальної труби за одну годину, якщо по трубі тече газ, а труба знаходиться в повітрі. Середня температура газу дорівнює  $T_z$ , повітря  $T_n$ . Зовнішній діаметр труби дорівнює  $D_3$ , внутрішній  $d_в$ , довжина труби  $L$ . Коефіцієнт тепловіддачі від газу до труби дорівнює  $\alpha_T = 30 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , від труби до повітря  $\alpha_n = 5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ . Коефіцієнт теплопровідності сталі дорівнює  $\lambda_{ст}=36 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

2. Відповісти на питання.

Таблиця 2

Дані для вирішення задач та номери теоретичних питань

| Номер варіанта | Дані для вирішення задач  | Номер теоретичних питань |
|----------------|---|--------------------------|
| 1              | 2   | 3                        |
| 1              | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – O <sub>2</sub> (кисень), $t_l=100^{\circ}\text{C}$ , $V_2=8\text{м}^3$ , $m=7\text{кг.}$ , $p_l=0,2\text{МПа}$ , $p_2=1,8\text{МПа}$ .   | 1,5                      |
|                | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: N <sub>2</sub> =10%, H <sub>2</sub> =90%, $t_l = 300^{\circ}\text{C}$ , $t_2=500^{\circ}\text{C}$   | 10,15                    |
|                | <b>Задача №3.</b> $p_l = 0,16 \text{ МПа}$ , $T_l=305 \text{ К}$ , $\varepsilon =18$ , $\rho=1,4$ , $\lambda=1,7$ .   | 20,25                    |
|                | <b>Задача №4.</b> $\delta=4 \text{ мм.}$ , $\delta_n=0,9\text{мм.}$ , $t_r = 950^{\circ}\text{C}$ , $t_B=40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r =34 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , $\alpha_B=750 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ,   | 30,35                    |
|                | <b>Задача №5.</b> $t_r = 600^{\circ}\text{C}$ , $t_n= 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $D_3=80 \text{ мм}$ , $d_B=70 \text{ мм}$ , $L=7 \text{ м}$ .  | 40,2                     |
| 2              | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – CO <sub>2</sub> , $t_l=115^{\circ}\text{C}$ , $V_2=6\text{м}^3$ , $m=5,5\text{кг.}$ , $p_l=1,4\text{МПа}$ , $p_2=0,16\text{МПа}$ .   | 3,8                      |
|                | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: O <sub>2</sub> =13%, CO <sub>2</sub> =87%, $t_l = 200^{\circ}\text{C}$ , $t_2=600^{\circ}\text{C}$  | 13,18                    |
|                | <b>Задача №3.</b> $p_l = 0,12 \text{ МПа}$ , $T_l=284 \text{ К}$ , $\varepsilon =12$ , $\rho=1,1$ , $\lambda=1,5$ .   | 23,28                    |
|                | <b>Задача №4.</b> $\delta=3 \text{ мм.}$ , $\delta_n=1\text{мм.}$ , $t_r = 885^{\circ}\text{C}$ , $t_B=34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r =34 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , $\alpha_B=750 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ,       | 33,38                    |
|                | <b>Задача №5.</b> $t_r = 615^{\circ}\text{C}$ , $t_n=24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $D_3=82 \text{ мм}$ , $d_B=74 \text{ мм}$ , $L=5 \text{ м}$ .   | 4,9                      |
| 3              | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – O <sub>2</sub> (кисень), $t_l=95^{\circ}\text{C}$ , $V_2=3\text{м}^3$ , $m=5\text{кг.}$ , $p_l=0,12\text{МПа}$ , $p_2=1,05\text{МПа}$ .  | 6,11                     |
|                | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: H <sub>2</sub> =18%, O <sub>2</sub> =82%, $t_l = 300^{\circ}\text{C}$ , $T_2=700^{\circ}\text{C}$   | 16,21                    |
|                | <b>Задача №3.</b> $p_l = 0,24 \text{ МПа}$ , $T_l=280 \text{ К}$ , $\varepsilon =13$ , $\rho=1,1$ , $\lambda=1,2$ .   | 26,31                    |
|                | <b>Задача №4.</b> $\delta=4.5 \text{ мм.}$ , $\delta_n=1,2\text{мм.}$ , $t_r = 880^{\circ}\text{C}$ , $t_B=34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r =34 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , $\alpha_B=750 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , | 36,7                     |
|                | <b>Задача №5.</b> $t_r = 585^{\circ}\text{C}$ , $t_n=22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $D_3=78 \text{ мм}$ , $d_B=70 \text{ мм}$ , $L=6 \text{ м}$ .   | 12,14                    |
| 4              | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – O <sub>2</sub> (кисень), $t_l=100^{\circ}\text{C}$ , $V_2=8\text{м}^3$ ,   | 17,22                    |

|   |  |       |
|---|--|-------|
|   | $m=7\text{кг.}, p_1=0,2\text{МПа}, p_2=1,8\text{МПа}.$   |       |
|   | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: повітря=10%, $\text{H}_2=90\%$ ,<br>$t_1=400^\circ\text{C}, t_2=600^\circ\text{C}$   | 27,32 |
|   | <b>Задача №3.</b> $p_1=0,16\text{ МПа}, T_1=305\text{ К}, \varepsilon=18, \rho=1,4$ ,<br>$\lambda=1,7.$  | 37,19 |
|   | <b>Задача №4.</b> $\delta=4\text{ мм.}, \delta_n=0,9\text{мм.}, t_r=950^\circ\text{C}, t_B=40^\circ\text{C}, \alpha_r=34\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$       | 24,29 |
|   | <b>Задача №5.</b> $t_r=600^\circ\text{C}, t_n=15^\circ\text{C}, D_3=80\text{ мм}, d_B=70\text{ мм},$<br>$L=7\text{ м}.$  | 34,39 |
| 5 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{O}_2$ (кисень), $t_1=115^\circ\text{C}, V_2=9\text{м}^3$ ,<br>$m=4,5\text{кг.}, p_1=0,3\text{МПа}, p_2=2\text{МПа}.$   | 2,8   |
|   | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{CO}_2=17\%$ , повітря=83%,<br>$t_1=300^\circ\text{C}, t_2=500^\circ\text{C}$  | 14,20 |
|   | <b>Задача №3.</b> $p_1=0,19\text{ МПа}, T_1=287\text{ К}, \varepsilon=12, \rho=1,2, \lambda=2.$  | 26,32 |
|   | <b>Задача №4.</b> $\delta=5\text{ мм.}, \delta_n=1,2\text{мм.}, t_r=1015^\circ\text{C}, t_B=34^\circ\text{C},$<br>$\alpha_r=34\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$ | 38,4  |
|   | <b>Задача №5.</b> $t_r=700^\circ\text{C}, t_n=25^\circ\text{C}, D_3=90\text{ мм}, d_B=80\text{ мм},$<br>$L=4\text{ м}.$  | 10,16 |
| 6 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_1=118^\circ\text{C}, V_2=6,5\text{м}^3$ , $m=5\text{кг.},$<br>$p_1=0,45\text{МПа}, p_2=1,65\text{МПа}.$  | 3,9   |
|   | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=22\%$ , $\text{O}_2=78\%$ , $t_1=200^\circ\text{C},$<br>$t_2=600^\circ\text{C}$  | 15,21 |
|   | <b>Задача №3.</b> $p_1=0,24\text{ МПа}, T_1=345\text{ К}, \varepsilon=16, \rho=1,25$ ,<br>$\lambda=1,54.$  | 27,33 |
|   | <b>Задача №4.</b> $\delta=3\text{ мм.}, \delta_n=1\text{мм.}, t_r=960^\circ\text{C}, t_B=35^\circ\text{C},$<br>$\alpha_r=34\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$     | 39,5  |
|   | <b>Задача №5.</b> $t_r=650^\circ\text{C}, t_n=17^\circ\text{C}, D_3=84\text{ мм}, d_B=76\text{ мм},$<br>$L=6\text{ м}.$  | 11,17 |
| 7 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{O}_2$ (кисень), $t_1=150^\circ\text{C}, V_2=5,5\text{м}^3$ ,<br>$m=6\text{кг.}, p_1=0,18\text{МПа}, p_2=1,35\text{МПа}.$   | 6,12  |
|   | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{CO}_2=27\%$ , $\text{O}_2=73\%$ ,<br>$t_1=300^\circ\text{C}, t_2=700^\circ\text{C}$   | 18,24 |
|   | <b>Задача №3.</b> $p_1=0,13\text{ МПа}, T_1=318\text{ К}, \varepsilon=13, \rho=1,25, \lambda=1,5.$   | 30,36 |
|   | <b>Задача №4.</b> $\delta=6\text{ мм.}, \delta_n=0,7\text{мм.}, t_r=890^\circ\text{C}, t_B=36^\circ\text{C},$<br>$\alpha_r=34\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$  | 7,13  |
|   | <b>Задача №5.</b> $t_r=625^\circ\text{C}, t_n=18^\circ\text{C}, D_3=64\text{ мм}, d_B=58\text{ мм},$<br>$L=5\text{ м}.$  | 19,25 |
| 8 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_1=120^\circ\text{C}, V_2=6,5\text{м}^3$ , $m=7\text{кг.},$<br>$p_1=0,17\text{МПа}, p_2=2\text{МПа}.$   | 19,25 |
|   | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: повітря=15%, $\text{O}_2=85\%$ ,<br>$t_1=300^\circ\text{C}, t_2=600^\circ\text{C}$   | 31,37 |
|   | <b>Задача №3.</b> $p_1=0,12\text{ МПа}, T_1=345\text{ К}, \varepsilon=13, \rho=1,3, \lambda=1,5.$  | 40,1  |
|   | <b>Задача №4.</b> $\delta=4\text{ мм.}, \delta_n=0,9\text{мм.}, t_r=960^\circ\text{C}, t_B=30^\circ\text{C},$<br>$\alpha_r=34\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$  | 22,34 |



|    |   |       |
|----|---|-------|
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 650^{\circ}\text{C}$ , $t_n=25^{\circ}\text{C}$ , $D_3=94\text{ мм}$ , $d_B=86\text{ мм}$ , $L=7\text{ м}$ .   | 22,12 |
| 9  | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{O}_2$ (кисень), $t_l=100^{\circ}\text{C}$ , $V_2=5\text{ м}^3$ , $m=6\text{ кг}$ ., $p_l=1,5\text{ МПа}$ , $p_2=0,16\text{ МПа}$ .  | 4,9   |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=10\%$ , $\text{CO}_2=90\%$ , $t_l = 400^{\circ}\text{C}$ , $T_2=700^{\circ}\text{C}$  | 14,19 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,12\text{ МПа}$ , $T_l=385\text{ К}$ , $\varepsilon=14$ , $\rho=1,7$ , $\lambda=1,9$ .  | 24,29 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=5\text{ мм}$ ., $\delta_n=0,8\text{ мм}$ ., $t_r = 1015^{\circ}\text{C}$ , $t_B=35^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r=34\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , $\alpha_B=750\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ,    | 34,39 |
|    | <b>Задача №5.</b> $T_r = 700^{\circ}\text{C}$ , $T_n=35^{\circ}\text{C}$ , $D_3=80\text{ мм}$ , $d_B=70\text{ мм}$ , $L=5\text{ м}$ .   | 5,10  |
| 10 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ (кисень), $t_l=150^{\circ}\text{C}$ , $V_2=6\text{ м}^3$ , $m=6,5\text{ кг}$ ., $p_l=1,7\text{ МПа}$ , $p_2=0,16\text{ МПа}$ .   | 7,12  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=15\%$ , $\text{H}_2=85\%$ , $t_l = 200^{\circ}\text{C}$ , $t_2=500^{\circ}\text{C}$   | 17,22 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,18\text{ МПа}$ , $T_l=290\text{ К}$ , $\varepsilon=14$ , $\rho=1,3$ , $\lambda=1,6$ .  | 27,32 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=5\text{ мм}$ ., $\delta_n=0,8\text{ мм}$ ., $t_r = 970^{\circ}\text{C}$ , $t_B=34^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r=34\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , $\alpha_B=750\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , | 37,8  |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 700^{\circ}\text{C}$ , $t_n=35^{\circ}\text{C}$ , $D_3=84\text{ мм}$ , $d_B=76\text{ мм}$ , $L=9\text{ м}$ .   | 13,18 |
| 11 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{N}_2$ (азот), $t_l=140^{\circ}\text{C}$ , $V_2=6\text{ м}^3$ , $m=4\text{ кг}$ ., $p_l=0,17\text{ МПа}$ , $p_2=1,9\text{ МПа}$ .  | 8,15  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{O}_2=27\%$ , $\text{H}_2=73\%$ , $t_l = 300^{\circ}\text{C}$ , $T_2=600^{\circ}\text{C}$   | 20,25 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,24\text{ МПа}$ , $T_l=460\text{ К}$ , $\varepsilon=13$ , $\rho=1,6$ , $\lambda=1,2$ .  | 31,36 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=3\text{ мм}$ ., $\delta_n=1,2\text{ мм}$ ., $t_r = 850^{\circ}\text{C}$ , $t_B=45^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r=34\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , $\alpha_B=750\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ,     | 1,6   |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 720^{\circ}\text{C}$ , $t_n=30^{\circ}\text{C}$ , $D_3=76\text{ мм}$ , $d_B=70\text{ мм}$ , $L=4\text{ м}$ .   | 11,16 |
| 12 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_l=200^{\circ}\text{C}$ , $V_2=7\text{ м}^3$ , $m=6\text{ кг}$ ., $p_l=0,16\text{ МПа}$ , $p_2=1,7\text{ МПа}$ .   | 17,23 |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=10\%$ , повітря=90%, $t_l = 300^{\circ}\text{C}$ , $t_2=500^{\circ}\text{C}$  | 28,33 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,12\text{ МПа}$ , $T_l=280\text{ К}$ , $\varepsilon=16$ , $\rho=1,3$ , $\lambda=1,6$ .  | 38,2  |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=4\text{ мм}$ ., $\delta_n=0,8\text{ мм}$ ., $t_r = 940^{\circ}\text{C}$ , $t_B=35^{\circ}\text{C}$ , $\alpha_r=34\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , $\alpha_B=750\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , | 3,21  |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 640^{\circ}\text{C}$ , $t_n=25^{\circ}\text{C}$ , $D_3=84\text{ мм}$ , $d_B=76\text{ мм}$ , $L=5\text{ м}$ .   | 26,30 |
| 13 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_l=100^{\circ}\text{C}$ , $V_2=8\text{ м}^3$ , $m=5\text{ кг}$ ., $p_l=0,2\text{ МПа}$ , $p_2=1,7\text{ МПа}$ .  | 1,13  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=12\%$ , $\text{CO}=88\%$ , $t_l = 300^{\circ}\text{C}$ , $T_2=500^{\circ}\text{C}$  | 25,37 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,16\text{ МПа}$ , $T_l=325\text{ К}$ , $\varepsilon=18$ , $\rho=1,3$ , $\lambda=1,8$ .  | 19,31 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=3,5\text{ мм}$ ., $\delta_n=0,9\text{ мм}$ ., $t_r = 850^{\circ}\text{C}$ , $t_B=30^{\circ}\text{C}$ ,  | 28,35 |

|    |   |       |
|----|---|-------|
|    | $\alpha_r=34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$  |       |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 610^\circ\text{C}, t_n=18^\circ\text{C}, D_3=80 \text{ мм}, d_B=70 \text{ мм}, L=4 \text{ м}.$   | 17,29 |
| 14 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_l=115^\circ\text{C}, V_2=4\text{м}^3, m=4\text{кг}., p_l=0,16\text{МПа}, p_2=1,8\text{МПа}.$  | 2,12  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=8\%, \text{CO}=92\%, t_l = 300^\circ\text{C}, T_2=500^\circ\text{C}$  | 24,36 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l = 0,2 \text{ МПа}, T_l=305 \text{ К}, \varepsilon =18, \rho=1,4, \lambda=1,6.$   | 20,32 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=3 \text{ мм}., \delta_n=1\text{мм}., t_r = 1000^\circ\text{C}, t_B=45^\circ\text{C}, \alpha_r=34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$  | 22,34 |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 680^\circ\text{C}, t_n=35^\circ\text{C}, D_3=80 \text{ мм}, d_B=70 \text{ мм}, L=5 \text{ м}.$   | 18,30 |
| 15 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{N}_2$ (азот), $t_l=100^\circ\text{C}, V_2=6\text{м}^3, m=7\text{кг}., p_l=0,15\text{МПа}, p_2=2,2\text{МПа}.$   | 3,11  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{CO}=10\%, \text{повітря}=90\%, t_l = 300^\circ\text{C}, t_2=600^\circ\text{C}$   | 23,38 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,18 \text{ МПа}, T_l=300 \text{ К}, \varepsilon =18, \rho=1,3, \lambda=1,7.$  | 21,33 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=5 \text{ мм}., \delta_n=1\text{мм}., t_r = 850^\circ\text{C}, t_B=30^\circ\text{C}, \alpha_r=34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$   | 26,40 |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 650^\circ\text{C}, t_n=25^\circ\text{C}, D_3=80 \text{ мм}, d_B=70 \text{ мм}, L=8 \text{ м}.$   | 16,10 |
| 16 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{O}_2$ (кисень), $t_l=120^\circ\text{C}, V_2=4\text{м}^3, m=5\text{кг}., p_l=0,2\text{МПа}, p_2=1,9\text{МПа}.$  | 6,10  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=20\%, \text{CO}=80\%, t_l = 300^\circ\text{C}, T_2=500^\circ\text{C}$   | 27,39 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,16 \text{ МПа}, T_l=305 \text{ К}, \varepsilon =18, \rho=1,4, \lambda=1,7.$  | 15,14 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=3 \text{ мм}., \delta_n=0,7\text{мм}., t_r = 975^\circ\text{C}, t_B=38^\circ\text{C}, \alpha_r=34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$ | 9,5   |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 640^\circ\text{C}, t_n=35^\circ\text{C}, D_3=84 \text{ мм}, d_B=76 \text{ мм}, L=5 \text{ м}.$   | 4,8   |
| 17 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{N}_2$ (азот), $t_l=100^\circ\text{C}, V_2=5\text{м}^3, m=6\text{кг}., p_l=1,8\text{МПа}, p_2=0,4\text{МПа}.$  | 9,15  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{O}_2=13\%, \text{H}_2=87\%, t_l = 200^\circ\text{C}, T_2=500^\circ\text{C}$  | 22,31 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_l=0,2 \text{ МПа}, T_l=280 \text{ К}, \varepsilon =16, \rho=1,3, \lambda=1,7.$   | 17,18 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=4 \text{ мм}., \delta_n=0,9\text{мм}., t_r = 850^\circ\text{C}, t_B=20^\circ\text{C}, \alpha_r=34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \alpha_B=750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$ | 30,1  |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 640^\circ\text{C}, t_n=35^\circ\text{C}, D_3=82 \text{ мм}, d_B=72 \text{ мм}, L=5 \text{ м}.$   | 39,12 |
| 18 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – $\text{CO}_2$ , $t_l=200^\circ\text{C}, V_2=7\text{м}^3, m=7\text{кг}., p_l=0,24\text{МПа}, p_2=1,6\text{МПа}.$  | 5,14  |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: $\text{N}_2=16\%, \text{H}_2=94\%, t_l = 300^\circ\text{C}, t_2=800^\circ\text{C}$  | 33,25 |

|    |   |       |
|----|---|-------|
|    | <b>Задача №3.</b> $p_I=0,12$ МПа, $T_I=345$ К, $\varepsilon=18$ , $\rho=1,2$ , $\lambda=1,5$ .  | 37,40 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=4,5$ мм., $\delta_H=1,1$ мм., $t_r = 990^\circ\text{C}$ , $t_B=54^\circ\text{C}$ , $\alpha_T=34$ Вт/(м <sup>2</sup> · К), $\alpha_B=750$ Вт/(м <sup>2</sup> · К), | 7,23  |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 625^\circ\text{C}$ , $t_n=25^\circ\text{C}$ , $D_3=64$ мм, $d_B=58$ мм, $L=4$ м.   | 35,11 |
| 19 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – O <sub>2</sub> (кисень), $t_I=150^\circ\text{C}$ , $V_2=8\text{м}^3$ , $m=5$ кг., $p_I=0,14$ МПа, $p_2=1,6$ МПа.   | 2,6   |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: CO <sub>2</sub> =14%, H <sub>2</sub> =86%, $t_I = 200^\circ\text{C}$ , $t_2=400^\circ\text{C}$  | 13,28 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_I = 0,2$ МПа, $T_I = 345$ К, $\varepsilon = 16$ , $\rho = 1,5$ , $\lambda=1,8$ .   | 21,26 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=2$ мм., $\delta_H=0,6$ мм., $t_r = 950^\circ\text{C}$ , $t_B=35^\circ\text{C}$ , $\alpha_T=34$ Вт/(м <sup>2</sup> · К), $\alpha_B=750$ Вт/(м <sup>2</sup> · К),   | 19,4  |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 640^\circ\text{C}$ , $t_n=35^\circ\text{C}$ , $D_3=80$ мм, $d_B=72$ мм, $L=4$ м.   | 24,32 |
| 20 | <b>Задача №1.</b> 1. Газ – N <sub>2</sub> (азот), $t_I=130^\circ\text{C}$ , $V_2=7\text{м}^3$ , $m=7$ кг., $p_I=0,12$ МПа, $p_2=1,5$ МПа.   | 3,8   |
|    | <b>Задача №2.</b> Склад суміші: повітря=10%, O <sub>2</sub> =90%, $t_I = 200^\circ\text{C}$ , $t_2=500^\circ\text{C}$   | 10,16 |
|    | <b>Задача №3.</b> $p_I=0,14$ МПа, $T_I=325$ К, $\varepsilon=15$ , $\rho=1,3$ , $\lambda=1,6$ .  | 20,26 |
|    | <b>Задача №4.</b> $\delta=3$ мм., $\delta_H=1$ мм., $t_r = 850^\circ\text{C}$ , $t_B=40^\circ\text{C}$ , $\alpha_T=34$ Вт/(м <sup>2</sup> · К), $\alpha_B=750$ Вт/(м <sup>2</sup> · К),     | 27,29 |
|    | <b>Задача №5.</b> $t_r = 700^\circ\text{C}$ , $t_n=45^\circ\text{C}$ , $D_3=92$ мм, $d_B=84$ мм, $L=6$ м.   | 34,38 |

### Контрольні питання

1. Основні параметри стану робочого тіла в термодинаміці.
2. Робота, виконана газом при зміні його об'єму.
3. Внутрішня енергія газу.
4. Перший закон термодинаміки.
5. Другий закон термодинаміки.
6. Рівняння стану ідеального газу.
7. Теплоємність газу: масова, об'ємна, при сталому тиску та об'ємі.
8. Об'ємні та масові частки суміші.
9. Уявна молярна маса газової суміші.
10. Обчислювання теплоти в термодинамічному процесі.
11. Середня теплоємність газу в інтервалі температур.
12. Рівняння Майєра.
13. Фізичне тлумачення універсальної газової сталої.
14. Обчислення термодинамічних параметрів при політропному процесі.
15. Обчислення термодинамічних параметрів при адіабатичному процесі.
16. Обчислення термодинамічних параметрів при ізохорному процесі.
17. Обчислення термодинамічних параметрів при ізотермічному процесі.
18. Обчислення термодинамічних параметрів при ізобарному процесі.
19. Термодинамічний цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти.
20. Термодинамічний цикл ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти.
21. Термодинамічний цикл ДВЗ з змішаним підведенням теплоти.
22. Цикл Карно, його К.К.Д.
23. Зворотний цикл Карно його К.К.Д.
24. Порівняння циклів двигунів внутрішнього згорання.
25. Коефіцієнт корисної дії холодильної машини.
26. Способи передавання теплоти.
27. Тепловіддача при вільному русі рідини.
28. Тепловіддача при вимушеному русі рідини.
29. Ізопроцеси в реальних газах.
30. Чим відрізняється ідеальний газ від дійсного.
31. Чим відрізняється коефіцієнт тепловіддачі від коефіцієнта теплопередачі.
32. Поняття про ентропію.
33. Кількість теплоти. Рівняння теплового балансу.
34. Теплопередача і її види.
35. Оборотні та необоротні процеси. Колові процеси (цикли).
36. Реальні гази та відхилення їх властивостей від ідеального газу.
37. Конвективний теплообмін.
38. Ідеальні цикли ДВЗ.
39. Порівняння циклів ДВЗ.
40. Середня теплоємність газу в інтервалі температур.

ДОДАТКИ

1. Грецький алфавіт

| Позначення букв | Назва букв | Позначення букв | Назва букв |
|-----------------|------------|-----------------|------------|
| Α, α            | Альфа      | Ν, ν            | Ню         |
| Β, β            | Бета       | Ξ, ξ            | Кси        |
| Γ, γ            | Гамма      | Ο, ο            | Омікрон    |
| Δ, δ            | Дельта     | Π, π            | Пи         |
| Ε, ε            | Епсілон    | Ρ, ρ            | Ро         |
| Ζ, ζ            | Дзета      | Σ, σ            | Сігма      |
| Η, η            | Ета        | Τ, τ            | Тау        |
| Θ, θ            | Тета       | Υ, υ            | Іпсилон    |
| Ι, ι            | Йота       | Φ, φ            | Фі         |
| Κ, κ            | Каппа      | Χ, χ            | Хі         |
| Λ, λ            | Лямбда     | Ψ, ψ            | Пси        |
| Μ, μ            | Мю         | Ω, ω            | Омега      |

2. Одиниці СІ, що мають спеціальні найменування

| Величина                   |             | Одиниця      |            |  |
|----------------------------|-------------|--------------|------------|--|
| Найменування               | Розмірність | Найменування | Позначення | Вираження через основні та додаткові одиниці |
| Довжина                    | L           | метр         | м          |  |
| Маса                       | M           | кілограм     | кг         |  |
| Час                        | t           | секунда      | с          |  |
| Термодинамічна температура | T           | кельвін      | К          |  |
| Кількість речовини         | v           | моль         | моль       |  |
| Тиск                       | P           | Паскаль      | Па         |  |

3. Густина газів (при нормальних умовах)

| Газ     | Густина, кг/м³ | Газ    | Густина, кг/м³ |
|---------|----------------|--------|----------------|
| Водень  | 0,09           | Гелій  | 0,18           |
| Повітря | 1,29           | Кисень | 1,43           |
|         |                |        |                |

4. Густина рідин

| Рідина         | Густина, кг/м <sup>3</sup> | Рідина       | Густина, кг/м <sup>3</sup> |
|----------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Вода (при 4°С) | 1,00· 10 <sup>3</sup>      | Сірковуглець | 1,26· 10 <sup>3</sup>      |
| Гліцерин       | 1,26· 10 <sup>3</sup>      | Спирт        | 0,80· 10 <sup>3</sup>      |
| Ртуть          | 13,6·10 <sup>3</sup>       |              |                            |

5. Теплоємності газів за нормальних умов  
Теплоємність повітря

| Температура<br>°С, | Молярна<br>теплоємність |                       | Масова теплоємність   |                       | Об’ємна теплоємність   |                        |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|                    | <i>c<sub>μP</sub></i>   | <i>c<sub>μV</sub></i> | <i>c<sub>mP</sub></i> | <i>c<sub>mV</sub></i> | <i>c’<sub>mP</sub></i> | <i>c’<sub>mV</sub></i> |
| 0                  | 29,073                  | 20,758                | 1,0036                | 0,7164                | 1,2971                 | 0,9261                 |
| 100                | 29,266                  | 20,951                | 1,0061                | 0,7193                | 1,3004                 | 0, 9295                |
| 200                | 29,676                  | 21,361                | 1,0115                | 0,7243                | 1,3071                 | 0,9362                 |
| 300                | 30,266                  | 21,951                | 1,0191                | 0,7319                | 1,3172                 | 0,9462                 |
| 400                | 30,949                  | 22,634                | 1,0283                | 0,7415                | 1,3289                 | 0,9579                 |
| 500                | 31,640                  | 23,325                | 1,0387                | 0,7519                | 1,3427                 | 0,9718                 |
| 600                | 32,303                  | 23,986                | 1,0496                | 0,7624                | 1,3565                 | 0,9856                 |
| 700                | 32,900                  | 24,585                | 1,0605                | 0,7733                | 1,3708                 | 0,9998                 |
| 800                | 33,432                  | 25,117                | 1,0710                | 0,7842                | 1,3842                 | 1,0112                 |
| 900                | 33,905                  | 25,590                | 1,0815                | 0,7942                | 1,3976                 | 1,0262                 |
| 1000               | 34,315                  | 26,000                | 1,0907                | 0,8039                | 1,4097                 | 1,0387                 |
| 1100               | 34,679                  | 26,394                | 1,0999                | 0,8127                | 1,4214                 | 1,0505                 |

Теплоємність азоту (N<sub>2</sub>)

| Температура<br>°С, | Молярна<br>теплоємність |                       | Масова<br>теплоємність |                       | Об’ємна<br>теплоємність |                        |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
|                    | <i>c<sub>μP</sub></i>   | <i>c<sub>μV</sub></i> | <i>c<sub>mP</sub></i>  | <i>c<sub>mV</sub></i> | <i>c’<sub>mP</sub></i>  | <i>c’<sub>mV</sub></i> |
| 0                  | 29,115                  | 20,800                | 1,0392                 | 0,7423                | 1,2987                  | 0,9278                 |
| 100                | 29,199                  | 20,884                | 1,0404                 | 0,7427                | 1,3004                  | 0,9295                 |
| 200                | 29,471                  | 21,156                | 1,0434                 | 0,7465                | 1,3038                  | 0,9328                 |
| 300                | 29,952                  | 21,637                | 1,0488                 | 0,7519                | 1,3109                  | 0,9399                 |
| 400                | 30,576                  | 22,261                | 1,0567                 | 0,7599                | 1,3205                  | 0,9496                 |
| 500                | 31,250                  | 22,935                | 1,0660                 | 0,7691                | 1,3322                  | 0,9613                 |
| 600                | 31,920                  | 23,605                | 1,0760                 | 0,7792                | 1,3452                  | 0,9743                 |
| 700                | 32,540                  | 24,225                | 1,0869                 | 0,7900                | 1,3586                  | 0,9877                 |
| 800                | 33,101                  | 24,786                | 1,0974                 | 0,8005                | 1,3716                  | 1,0006                 |
| 900                | 33,599                  | 25,284                | 1,1078                 | 0,8110                | 1,3845                  | 1,0136                 |
| 1000               | 34,039                  | 25,724                | 1,1179                 | 0,8210                | 1,3971                  | 1,0178                 |
| 1100               | 34,424                  | 26,109                | 1,1271                 | 0,8302                | 1,4089                  | 1,0379                 |

Теплоємність двоокису вуглецю (CO<sub>2</sub>)

| Температура<br>°C, | Молярна теплоєм-<br>ність |             | Масова теплоємність |          | Об’ємна теплоєм-<br>ність |           |
|--------------------|---------------------------|-------------|---------------------|----------|---------------------------|-----------|
|                    | $c_{\mu P}$               | $c_{\mu V}$ | $c_{mP}$            | $c_{mV}$ | $c'_{mP}$                 | $c'_{mV}$ |
| 0                  | 35,960                    | 27,545      | 0,8148              | 0,6259   | 1,5998                    | 1,2288    |
| 100                | 40,206                    | 31,891      | 0,8658              | 0,6770   | 1,7003                    | 1,3293    |
| 200                | 43,689                    | 35,374      | 0,9059              | 0,7214   | 1,7873                    | 1,4164    |
| 300                | 46,515                    | 38,200      | 0,9487              | 0,7599   | 1,8627                    | 1,4918    |
| 400                | 48,860                    | 40,515      | 0,9826              | 0,7938   | 1,9297                    | 1,5587    |
| 500                | 50,815                    | 42,500      | 1,0128              | 0,8240   | 1,9887                    | 1,6178    |
| 600                | 52,452                    | 44,137      | 1,0396              | 0,8508   | 2,0411                    | 1,6701    |
| 700                | 53,826                    | 45,511      | 1,0639              | 0,8746   | 2,0884                    | 1,7174    |
| 800                | 54,977                    | 46,662      | 1,0852              | 0,8964   | 2,1311                    | 1,7601    |
| 900                | 55,952                    | 47,637      | 1,1045              | 0,9157   | 2,1692                    | 1,7982    |
| 1000               | 56,773                    | 48,485      | 1,1225              | 0,9332   | 2,2035                    | 1,8326    |
| 1100               | 57,472                    | 49,157      | 1,1384              | 0,9496   | 2,2349                    | 1,8640    |

Теплоємність окису вуглецю (CO)

| Температура<br>°C, | Молярна теплоєм-<br>ність |             | Масова теплоємність |          | Об’ємна теплоєм-<br>ність |           |
|--------------------|---------------------------|-------------|---------------------|----------|---------------------------|-----------|
|                    | $c_{\mu P}$               | $c_{\mu V}$ | $c_{mP}$            | $c_{mV}$ | $c'_{mP}$                 | $c'_{mV}$ |
| 0                  | 29,123                    | 20,808      | 1,0396              | 0,7427   | 1,2992                    | 0,9282    |
| 100                | 29,262                    | 20,947      | 1,0417              | 0,7448   | 1,3017                    | 0,9307    |
| 200                | 29,647                    | 21,332      | 1,0463              | 0,7494   | 1,3071                    | 0,9362    |
| 300                | 30,254                    | 21,939      | 1,0538              | 0,7570   | 1,3167                    | 0,9458    |
| 400                | 30,974                    | 22,659      | 1,0634              | 0,7666   | 1,3289                    | 0,9579    |
| 500                | 31,707                    | 23,392      | 1,0748              | 0,7775   | 1,3427                    | 0,9718    |
| 600                | 32,402                    | 24,087      | 1,0861              | 0,7892   | 1,3574                    | 0,9864    |
| 700                | 33,025                    | 24,710      | 1,0978              | 0,8009   | 1,3720                    | 1,0011    |
| 800                | 33,574                    | 25,259      | 1,1091              | 0,8122   | 1,3862                    | 1,0153    |
| 900                | 34,055                    | 25,740      | 1,1200              | 0,8231   | 1,3996                    | 1,0287    |
| 1000               | 34,470                    | 26,155      | 1,1304              | 0,8336   | 1,4126                    | 1,0417    |
| 1100               | 34,826                    | 26,511      | 1,1401              | 0,8432   | 1,4248                    | 1,0538    |

Теплоємність кисню (O<sub>2</sub>)

| Температура<br>°C, | Молярна<br>теплоємність |             | Масова теплоємність |          | Об’ємна теплоєм-<br>ність |           |
|--------------------|-------------------------|-------------|---------------------|----------|---------------------------|-----------|
|                    | $c_{\mu P}$             | $c_{\mu V}$ | $c_{mP}$            | $c_{mV}$ | $c'_{mP}$                 | $c'_{mV}$ |
| 0                  | 29,274                  | 20,959      | 0,9148              | 0,6548   | 1,0359                    | 0,9349    |
| 100                | 29,877                  | 21,562      | 0,9232              | 0,6632   | 1,3176                    | 0,9466    |
| 200                | 30,815                  | 22,500      | 0,9353              | 0,6753   | 1,3352                    | 0,9642    |
| 300                | 31,832                  | 23,517      | 0,9500              | 0,6900   | 1,3561                    | 0,9852    |
| 400                | 32,758                  | 24,443      | 0,9651              | 0,7051   | 1,3775                    | 1,0065    |
| 500                | 33,549                  | 25,234      | 0,9793              | 0,7193   | 1,3980                    | 1,0270    |
| 600                | 34,202                  | 25,887      | 0,9927              | 0,7327   | 1,4168                    | 1,0459    |
| 700                | 34,746                  | 26,431      | 1,0048              | 0,7448   | 1,4344                    | 1,0789    |
| 800                | 35,203                  | 26,888      | 1,0157              | 0,7557   | 1,4499                    | 1,0789    |
| 900                | 35,584                  | 27,269      | 1,0258              | 0,7658   | 1,4645                    | 1,0936    |
| 1000               | 35,914                  | 27,599      | 1,0350              | 0,7750   | 1,4775                    | 1,1066    |
| 1100               | 36,216                  | 27,901      | 1,0434              | 0,7834   | 1,4892                    | 1,1183    |

Теплоємність водню (H<sub>2</sub>)

| Температура<br>°C, | Молярна теплоєм-<br>ність |             | Масова теплоєм-<br>ність |          | Об’ємна теплоєм-<br>ність |           |
|--------------------|---------------------------|-------------|--------------------------|----------|---------------------------|-----------|
|                    | $c_{\mu P}$               | $c_{\mu V}$ | $c_{mP}$                 | $c_{mV}$ | $c'_{mP}$                 | $c'_{mV}$ |
| 0                  | 28,617                    | 20,302      | 14,195                   | 10,071   | 1,2766                    | 0,9056    |
| 100                | 29,128                    | 20,813      | 14,353                   | 10,228   | 1,2908                    | 0,9198    |
| 200                | 29,241                    | 20,926      | 14,421                   | 10,297   | 1,2971                    | 0,9261    |
| 300                | 29,299                    | 21,123      | 14,446                   | 10,322   | 1,2992                    | 0,9282    |
| 400                | 29,396                    | 21,181      | 14,477                   | 10,353   | 1,3021                    | 0,9311    |
| 500                | 29,559                    | 21,244      | 14,509                   | 10,384   | 1,3050                    | 0,9341    |
| 600                | 29,793                    | 21,478      | 14,542                   | 10,417   | 1,3080                    | 0,9370    |
| 700                | 30,099                    | 21,784      | 14,587                   | 10,463   | 1,3121                    | 0,9412    |
| 800                | 30,472                    | 22,157      | 14,641                   | 10,517   | 1,3167                    | 0,9458    |
| 900                | 30,869                    | 22,554      | 14,706                   | 10,581   | 1,3226                    | 0,9516    |
| 1000               | 31,284                    | 22,969      | 14,776                   | 10,652   | 1,3289                    | 0,9579    |

**Примітка:** значення об'ємних теплоємностей в таблиці приведені для одного кубічного метру газу при нормальних умовах.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Теплотехніка : підруч. / [Б. Х. Драганов, О. С. Бессараб, А. А. Долінський та ін.]; за ред. Б.Х. Драганова. -2-ге вид. перероб. і доповн. – К. : ІНОКОС.2005.– 400с.
2. Буляндра О.Ф. Теплотехнічна термодинаміка / О. Ф. Буляндра. – К. : Вища шк., 2001.–320с.
3. Андрющенко А. И. Основы термодинамики реальных процессов / А.И. Андрющенко. – М. : Высшая шк.,1980.–350с.
4. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1973.–344с.
5. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассобмена: учеб. пособ. / В. Н. Афанасьев, С. И. Исаев, И. А. Кожин [и др.]: под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Перажицкого. – М. : Высшая шк.,1986.–383с.
6. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче : учеб. пособ. / А. В. Болгарский, В. И. Голдобсев, Н. С. Идиатуллин, Д. Ф. Толкачев – М. : Высшая шк., 1972.–304с.
7. Драганов Б. Х. Теплотехніка та використання теплоти в сільському господарстві / Б. Х. Драганов – М. : Агропромвидат, 1990, – 463 с.
8. Захаров А. А. Використання теплоти в сільському господарстві / А. А. Захаров. - 3-тє вид. перер. і допов. – М. : Агропромвидат, 1986. – 328 с.
9. Курсове проектування по теплотехніці та використання теплоти в сільському господарстві: навч. посіб. / [Б. Х. Драганов, С. А. Довальов та інш.]; за ред. Б. Х. Драганова. – М. : Агропромвидат, 1991. –176 с.
10. Вукалович М. П. Таблиці теплофізичних властивостей води та водяної пари / М. П. Вукалович, С. А. Ривкін, А. А. Александров. – М. : Видавництво стандартів, 1969 р.

## Зміст

|   | ст. |
|---|-----|
| Вступ   | 3   |
| Розділ I Теоретичні основи теплотехніки       | 6   |
| Розділ II Газові суміші                       | 9   |
| Розділ III Ентропія та ентропійні діаграми    | 11  |
| Розділ IV Термодинамічний процес              | 12  |
| Розділ V Кругові процеси                      | 13  |
| Розділ VI Водяна пара                         | 23  |
| Розділ VII Діаграми ентропій для водяної пари | 30  |
| Приклади розв'язування задач                  | 35  |
| Завдання до контрольної роботи                | 44  |
| Додатки                                       | 52  |
| Література                                    | 56  |

Навчальне видання

## Теплотехніка

Методичні рекомендації

Укладач: **Коваль** Станіслав Володимирович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,64

Тираж 100 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Паризької Комуни, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.