

Міністерство освіти і науки України  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Щесюк О. В., Прищепов О. Ф.,  
Шенкевич В. М., Лісков Д. А.**

**Методичні вказівки до практичних занять і  
самостійної роботи з курсу «Основи  
термодинаміки, теплотехніки та  
гідрогазодинаміки  
(розділ «Технічна термодинаміка»)»**

*Методичні вказівки*

**Випуск 433**



Миколаїв – 2023

УДК 536.24  
ББК 31.3(07)  
**M54**

*Рекомендовано до друку вченою радою Чорноморського національного університету імені Петра Могили (протокол № 16 від 23 грудня 2021 р).*

**Рецензент:**

**Димо Б. В.**, канд. техн. наук, професор кафедри технічної теплофізики та суднових паро виробних установок НУК ім. адмірала Макарова.

**M54** Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»: метод. вказівки / О. В. Щесюк, О. Ф. Прищепов, В. М. Шенкевич, Д. А. Лісков. – Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2023. – 72 с. – (Методична серія ; вип. 433).

У цьому практикумі наведено основні поняття і визначення технічної термодинаміки, розрахункові залежності, контрольні задачі та приклади їх розв'язання. Збірник складено відповідно до програми курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки». Призначений для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», а також може бути корисний студентам інших технічних спеціальностей.

УДК 536.24  
ББК 31.3(07)

© Щесюк О. В., Прищепов О. Ф.,  
Шенкевич В. М, Лісков Д. А., 2023  
© ЧНУ ім. Петра Могили, 2023

ISSN 1811- 492X

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1. Методичні вказівки до розв'язання задач .....	5
1.1. Вимоги до оформлення звіту .....	5
1.2. Елементи теорії обчислень .....	6
2. Технічна термодинаміка.....	12
2.1. Основні положення і визначення .....	12
2.2. Приклади розв'язання задач .....	17
2.3. Задачі для розв'язання .....	25
Додаток .....	41
Бібліографічний список .....	71

## ВСТУП

Термодинаміка, яка є розділом фізики, являє собою одну з найбільших областей сучасного природознавства – науку про перетворення різних видів енергії. Одним з підрозділів термодинаміки є технічна термодинаміка, яка вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти в роботу. У теоретичній частині технічна термодинаміка є загальним розділом науки про енергію, а в прикладній частині представляє собою теоретичний фундамент всієї теплотехніки, яка вивчає процеси в теплових двигунах і холодильних машинах [1, 2, 3].

Виконання практичних завдань з технічної термодинаміки визначено навчальним планом спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» при вивченні дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки».

Практикум містить опис основних положень і визначень технічної термодинаміки, розрахункові залежності, контрольні задачі для розв'язання і приклади робіт, які виконуються студентами за вказаним курсом.

Додаток містить довідковий матеріал у вигляді таблиць і діаграм, який покликано сприяти набуванню студентами навичок самостійного відшукування необхідних величин. Довідковий матеріал зібрано в обсязі, достатньому для розв'язання задач.

Автори висловлюють подяку доц. О. О. Сироті за допомогу в роботі над практикумом.

# 1. Методичні вказівки до розв'язання задач

## 1.1 Вимоги до оформлення звіту

Згідно з навчальним планом студенти виконують самостійну роботу, яка включає розв'язання 20 задач відповідно до варіанту, якого необхідно суворо дотримуватися. Номер варіанту визначається залежно від номера студента по списку в журналі обліку. Наприклад, якщо в журналі по списку студента записано під номером 22, то його варіант – 22.

При розв'язанні задач необхідно, по-перше, встановити, які фізичні закономірності лежать в основі цієї задачі. Потім, за допомогою формул, які виражають ці закономірності, знайти рішення задачі в буквенному вигляді. Після цього можна перейти до підстановки чисельних даних, які визначені обов'язково в одній і тій же системі одиниць фізичних величин. У техніці, крім Міжнародної системи одиниць (СІ), використовують одиниці інших систем, а також позасистемні одиниці (наприклад, тиск вимірюється в атмосферах, мм вод. ст., мм рт. ст. тощо). Тому в умовах задач фізичні величини не завжди приведені в одиницях СІ. Співвідношення між одиницями різних систем наведені в таблиці в додатку. Для розв'язання задач в СІ всі дані, які наведені в умовах задач, а також взяті із довідкових таблиць, повинні бути переведені в одиниці СІ.

При отриманні чисельної відповіді потрібно звертати увагу на ступень точності кінцевого результату. Точність відповіді не повинна перевищувати точності, з якої наведені початкові величини. У чисельних відповідях одразу, як тільки замість буквених позначень підставляються числа, необхідно писати найменування одиниці фізичної величини.

У тих задачах, де потрібно накреслити графік, необхідно обрати розмірність фізичної величини, масштаб і початок координат. У відповідях до деяких задач графіки подаються без вказівки масштабу, тобто приводиться тільки якісний характер шуканої залежності.

Розв'язання задач слід супроводжувати стислими поясненнями та детальними розрахунками.

За результатами самостійної роботи студент оформляє індивідуальний звіт.

Звіт повинен містити:

- вступ;
- умови і розв'язання задач;

## Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»

---

- висновки;
- список використаної літератури.

Звіт оформлюється на аркушах формату А4. Титульний аркуш повинен бути оформлений відповідно до ГОСТ 2.04, форма 2, наступні аркуші звіту – за формою 2а. Шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал між строками 1,5. Формули повинні мати нумерацію. Рисунки, графіки і таблиці повинні мати нумерацію і назву відповідно до правил оформлення технічної документації за ЄСКД.

Вибір теплофізичних властивостей, використання формул, запозичених з літературних джерел, мають супроводжуватися посиланнями на літературу, список якої подається в кінці звіту. Умовні літерні позначення і термінологія повинні відповідати загальноприйнятим стандартам.

### 1.2 Елементи теорії обчислень

#### 1.2.1 Правила наближених обчислень

При додаванні та відніманні наближених чисел обидва доданки заокруглюють до однакового порядку десяткових знаків. Кількість десяткових знаків, яку необхідно зберегти, визначається доданком, який має найменше число цих знаків.

Щоб штучно не збільшувати похибку за рахунок заокруглення, треба робити однакову кількість заокруглень як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення доданків чисел або зберігати один зайвий десятковий знак.

Наприклад,  $A = 19063,41 + 0,431 - 48,756 - 4,3678$ .

Найменшу кількість десяткових знаків має число 19063,41 (два). Після заокруглення всіх чисел отримаємо  $A = 19063,41 + 0,43 - 48,76 - 4,37 = 19010,71$ .

При множенні та діленні наближених чисел всі співмножники заокруглюють до однакового числа значущих цифр. Кількість значущих цифр, яку необхідно залишити, визначається числом, яке утримує найменшу кількість знаків.

Значущими цифрами (або просто знаками) називаються всі цифри поданого числа, починаючи з першої зліва, від'ємної від нуля, до останньої, яка може бути і нулем. Наприклад, число 0,00047 має дві значущі цифри (4 і 7), а число 0,00320 – три цифри (3; 2; 0).

При послідовному множенні та діленні, а також додаванні та відніманні декількох наближених чисел проміжні результати потрібно заокруглити, залишаючи одну зайву значущу цифру. Кінцевий

результат заокруглюють, залишаючи в ньому стільки значущих цифр, скільки їх має наближене число з найменшою кількістю знаків. Нехай, наприклад, треба обчислити

$$A = \frac{14,75}{8,6 \cdot 1,27 \cdot 0,5256}$$

Найменшу кількість знаків має число 8.6. Тому заокруглюємо всі числа до двох значущих цифр

$$A = \frac{15}{8,6 \cdot 1,3 \cdot 0,53}$$

Проміжні обчислення:  $8,6 \cdot 1,3 = 11,18$ . Округлюємо число 11,18, залишаючи один зайвий знак до третьої значущої цифри, і множимо на 0,53:

$$11,2 \cdot 0,53 = 5,936 = 5,94.$$

Тоді

$$A = \frac{15}{5,94} = 2,52$$

Після округлення кінцевого результату до двох значущих цифр отримаємо  $A = 2,5$ . В цьому прикладі ділення виконали з одним зайвим знаком, щоб знати, в яку сторону заокруглювати кінцевий результат.

При округленні остання цифра, яка зберігається, не змінюється, якщо перша відкинута менше 5. Остання цифра, яка зберігається, збільшується на одиницю, якщо перша відкинута більше або дорівнює 5 (за виключенням тих випадків, коли сама п'ятірка є результатом заокруглення в сторону збільшення).

При піднесенні до степеню (не вище четвертого) в результаті потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має основа.

При добуванні кореня (не вище четвертого степеня) в результаті потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має підкореневе число.

Для вказівки границь, в яких лежить шукана величина, вирішальне значення має перша значуща цифра абсолютної похибки. Тому похибка обчислюється до другої значущої цифри, а потім заокруглюється до першої.

В отриманому наближеному значенні шуканої величини зберігають правильні та сумнівні знаки, а останні заокруглюють.

Сумнівним знаком називається знак, що співпадає по розряду з першою значущою цифрою абсолютної похибки. Всі знаки ліворуч від сумнівного будуть правильними.

## Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»

---

Наприклад, в результаті обчислень отримано:  $a = 6,786$ ,  $\Delta a = 0,026$ . Тут цілі та десяткові є правильними знаками, соті – сумнівними, а тисячні лежать в області помилки. Округлюючи похибку до першої значущої цифри, а саме число до сумнівного знаку, отримуємо  $a = 6,79 \pm 0,03$ .

Якщо в десятковому дробі останні правильні знаки – нулі, то при запису дробу вони зберігаються. Знаки, які лежать в області помилки та відкинуті при заокругленні, нулями не замінюються. Наприклад,  $B = 4.502$ ;  $\Delta B = 0.01$ . Заокруглюючи наближене значення величини  $B$  до сумнівного знаку, отримуємо  $B = 4.50 \pm 0.01$ . При заокругленні цілого числа відкинуті знаки потрібно не замінювати нулями, а застосувати множення на 10 у відповідному степені. Наприклад,  $c = 847625$ ,  $\Delta c = 235$ . Тут сотні є сумнівним знаком, оскільки перша ліворуч значуща цифра абсолютної похибки знаходиться у розряді сотень. Тому, округливши похибку до першої значущої цифри  $\Delta c = 2 \cdot 10^2$ , а саме число до сумнівного знаку ( $8476 \cdot 10^2$ ), отримуємо  $c = (8476 \pm 2) \cdot 10^2 = (8,476 \pm 0,002) \cdot 10^5$ .

### *1.2.2 Графічне оформлення робіт. Побудова поля похибок*

Часто метою роботи є отримання графічної залежності одної фізичної величини від другої  $A=f(x)$ . Наприклад потрібно дослідити залежність коефіцієнта внутрішнього тертя рідини від температури  $\eta = f(t)$ . Для цього роблять виміри при різних температурах і обчислюють коефіцієнт внутрішнього тертя.

Роботу оформлюють графічно, по осі абсцис відкладають температуру (аргумент), а по осі ординат коефіцієнт внутрішнього тертя (функцію). Графік бажано будувати на міліметровці. Масштаб вибирається так, щоб було легко переходити до нього від природи, тобто, щоб в одному сантиметрі укладалося  $1 \cdot 10^n$  або  $2 \cdot 10^n$ , або  $4 \cdot 10^n$ , або  $5 \cdot 10^n$  одиниць вимірюваної величини, де  $n$  – будь-яке ціле число. Для зручності користування графіком по осям проставити число одиниць через кожні 1-2 см.

Співвідношення між масштабами по осям повинно бути таким, щоб крива не була дуже пологою і дуже крутою (зазвичай нахил графіків в межах 30–50°) Це означає, що якщо вимірювання аргументу викликає невелике змінювання функції, то по осі ординат потрібно взяти більший масштаб, ніж по осі абсцис.

Після нанесення експериментальних точок на графік будують поле похибок, тобто в масштабі графіка відкладають ліворуч і праворуч від



експериментальних точок похибку виміру аргументу  $\Delta x$ , а вверх і вниз похибку виміру шуканої величини  $\Delta A$ . Потім проводять горизонтальні та вертикальні лінії довжиною  $2\Delta x$  і  $2\Delta A$  або будують прямокутники з сторонами  $2\Delta x$  і  $2\Delta A$ . Довжина цих ліній повинна бути порядку 1-5 мм.

В експериментальних кривих часто спостерігається деякий розкид точок, який обумовлений похибками вимірів. При побудові графіка необхідно нанести всі точки (розмір точок повинен бути не менше 1 мм) відповідно вимірам; побудувати поле похибок для кожної точки, а потім провести плавну криву так, щоб точки рівномірно розташовувалися по обидві сторони кривої і крива проходила через поле похибок експериментальних точок. Якщо поле похибок однієї-двох точок не перетинаються пальною кривою, то це свідчить про грубу помилку в поданому вимірі.

Приклад. Нехай при вимірній залежності в'язкості гліцерину від температури отримані такі значення в'язкості з відносною похибкою 3% :

$t, 0^{\circ}\text{C}$	11	12	14	15	18	20	23	25	28	30
$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	3,8	3,3	2,68	2,30	1,80	1,35	1,20	1,06	1,00	1,00
$\Delta\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	0,1	0,1	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03

Похибка вимірювання температури  $\Delta t = 0,5^{\circ}\text{C}$ . Інтервал вимірювання температури  $10\text{-}30^{\circ}\text{C}$ , тобто  $20^{\circ}\text{C}$ . Вибираємо масштаб  $10^{\circ}\text{C}$  на 5 см, тоді довжина графіка буде 10 см, а  $2\Delta t$  зобразиться лінією довжиною 5 мм.

Інтервал вимірювання  $\eta = 1,0 - 3,8 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ , тобто  $2,8 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ; вибравши масштаб  $1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  на 5 см, отримаємо розмір графіка по вертикалі 14 см; довжина лінії при  $2\Delta\eta = 0,2 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  буде 10 мм. Для того, щоб не збільшувати розміри креслення, початок осі  $t$  вибираємо в точці  $10^{\circ}\text{C}$ , а початок осі  $\eta$  в точці  $1,0 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ , потім проводимо осі координат, на осях відмічаємо значення аргументу і функції через 1– 2 см так, щоб навпроти п'ятисантиметрових ліній стояли округлені значення; наносимо експериментальні точки, будуємо поле похибок і проводимо гладку криву.

### 1.2.3 Користування довідковими таблицями

Часто в робочу формулу окрім вимірних величин входять і такі величини, які беруться з довідкових таблиць (питома теплоємність, прискорення сили тяжіння  $g$ , число  $\pi$  та інші).

## Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»

---

Оскільки в числових значеннях, які приведені в таблицях, залишені лише правильні знаки, то абсолютна похибка числа, яке взято з таблиці, не може перевищувати половини одиниці останньої значущої цифри цього числа.

Наприклад, в таблиці вказано, що питома теплоємність міді  $c = 395$  Дж/(кг · град). В цьому випадку її абсолютна похибка  $\Delta c = 0,5$  Дж/(кг · град)

В деяких випадках в таблиці наведено більше значущих цифр, ніж потрібно для розрахунку (відповідно правилам наближених обчислень). Тоді табличну величину округлюють, залишаючи в ній необхідну кількість знаків, а абсолютну похибку округлення вважають рівною похибці округлення.

Наприклад, при визначенні об'єму циліндра висота і діаметр його були виміряні до четвертої значущої цифри. Тоді число  $\pi$ , яке дорівнює 3,1415826525, потрібно округлити до такої ж кількості знаків, тобто воно буде дорівнювати 3,142. Похибка округлення в цьому випадку  $\Delta \pi = 4 \cdot 10^{-4}$ . Ця похибка вже лежить в п'ятому знаку, в той час, як останні в четвертому, тому нею можна знехтувати.

В константах краще залишити кількість знаків, яка дорівнює чи більше на один, ніж в вимірних величинах. В останньому випадку похибкою заокруглення можна знехтувати.

В деяких таблицях відображена залежність двох фізичних величин, одна з яких вимірюється безпосередньо. Наприклад, залежність густини ріднини від температури, температури кипіння від тиску тощо.

Абсолютна похибка такої величини обумовлена похибкою вимірювання аргументу. Наприклад, температура води  $t=22^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t=0,5^\circ\text{C}$ . Потрібно визначити густину ( $\rho$ ) води і її абсолютну похибку ( $\Delta\rho$ ).

По таблицям визначаємо: при  $t=22^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 997,80$  кг/м<sup>3</sup>;  $t_1=21^\circ\text{C}$ ;  $\rho_1 = 998,02$  кг/м<sup>3</sup>;  $t_2=23^\circ\text{C}$ ;  $\rho_2 = 997,57$  кг/м<sup>3</sup>. Знаходимо  $b$  – середню швидкість зміни функції

$$b = \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} = \frac{997,57 - 998,02}{23 - 21} = -0,22 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{K}^{-1},$$

тоді похибка  $\Delta\rho = |b| \cdot \Delta t = 0,22 \cdot 0,5 \text{ кг/м}^3 = 0,11 \text{ кг/м}^3$ .

Округливши абсолютну похибку до першої значущої цифри, а саме значення густини до сумнівного знаку, отримаємо

$$\rho = (997,8 \pm 0,1) \text{ кг/м}^3.$$

#### 1.2.4 Лінійне інтерполювання

Часто в таблицях немає значення аргументу, для якого знаходиться функція, а є значення аргументу більше або менше. Знаходження значення функції в цьому випадку робиться методом інтерполювання.

Лінійне інтерполювання можна застосовувати у тих випадках, де з достатньою точністю залежність функції від аргументу виявляється лінійною, тобто має вигляд  $f(x) = f(x_1) + b(x - x_1)$ . В інших випадках застосовується більш складне інтерполювання.

В таблиці подані такі залежності: при  $t_1 = 15^\circ\text{C}$   $\alpha_1 = 73,26 \cdot 10^{-3} \text{H/м}$ ;  $t_2 = 20^\circ\text{C}$   $\alpha_2 = 72,53 \cdot 10^{-3} \text{H/м}$ . Потрібно визначити коефіцієнт поверхневого натягу при температурі  $18^\circ\text{C}$

Приймаючи, що в межах  $\pm 5^\circ\text{C}$   $\alpha$  залежить від температури лінійно, тобто  $\alpha = \alpha(t_1) + b(t - t_1)$ , знаходимо

$$b = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$$

що відповідає зміні поверхневого натягу при зміні температури на 1К. Тобто

$$b = \frac{(72,53 - 73,26) \cdot 10^{-3} \text{H/м}}{(20 - 15)\text{K}} = -0,15 \cdot 10^{-3} \text{H/м} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Потім знаходимо значення функції  $\alpha$  по формулі  $\alpha = \alpha(t_1) + b(t - t_1)$  або

$$\begin{aligned} \alpha &= 73,26 \cdot 10^{-3} \text{H/м} + (-0,15 \cdot 10^{-3} \text{H/м} \cdot \text{K}^{-1}) \cdot (18 - 15)\text{K} \\ &= 72,81 \cdot 10^{-3} \text{H/м} \end{aligned}$$

Якщо температура була виміряна з похибкою  $\Delta t = 0,5 \text{K}$ , похибка  $\Delta\alpha$  дорівнює:

$$\Delta\alpha = |b| \cdot \Delta t = 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 0,075 \cdot 10^{-3} = 0,08 \cdot 10^{-3} (\text{H/м})$$

Кінцевий результат визначення  $\alpha$  записується так:

$$\alpha \pm \Delta\alpha = (72,81 \pm 0,08) \cdot 10^{-3} \text{H/м}.$$

## 2. Технічна термодинаміка

### 2.1. Основні положення і визначення

*Термодинаміка* – це 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 [1]. *Технічна термодинаміка* вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, а також властивості тіл, що беруть участь у цих перетвореннях, і теплові процеси, що протікають у різних апаратах і установках, теплових і холодильних машинах.

*Термодинамічна система* – це сукупність матеріальних тіл, що знаходяться в тепловій і механічній взаємодії одне з одним і з оточуючим цю систему зовнішніми тілами (навколишнє середовище).

*Ізольована (закрита) система* – це система, що не обмінюється з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною. Якщо система не обмінюється з навколишнім середовищем теплою, її називають *теплоізольованою* або *адіабатною*.

*Параметри стану* – це макроскопічні величини, що визначають стан термодинамічної системи в даний момент. Розрізняють *термічні* (абсолютний тиск, питомий об'єм, абсолютна термодинамічна температура) і *калоричні* (внутрішня енергія, ентальпія, ентропія) параметри стану системи.

*Рівноважний стан системи* – це стан ізольованої термодинамічної системи, що характеризується сталістю параметрів стану в часі і по всьому об'єму системи.

*Тиск* – це результат ударів об стінку мікрочастинок робочого тіла, що хаотично рухаються. Чисельно тиск дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні тіла в напрямку внутрішньої нормалі до неї. Одиницею виміру тиску є Па (паскаль). Тиск поділяють на *абсолютний*  $p$ , *атмосферний*  $p_a$ , *надлишковий*  $p_n$  і *вакууметричний*  $p_v$ . Якщо  $p > p_a$ , то  $p_n = p - p_a$ , а коли  $p < p_a$ , то  $p_v = p_a - p$ .

*Абсолютна термодинамічна температура* – це міра інтенсивності теплового руху частинок робочого тіла. Одиницею виміру абсолютної термодинамічної температури є градус Кельвіна (К). Зв'язок між термодинамічною температурою  $T$  і температурою  $t$  в градусах Цельсія (°C), такий:

$$T = t + 273,15. \quad (2.1)$$

*Питомий об'єм* – це об'єм, що займає одиниця маси речовини. Одиницею виміру питомого об'єму є м<sup>3</sup>/кг. Величина, обернена питомому об'ємові, – густина.

*Рівняння стану для довольної кількості ідеального газу* (рівняння Клапейрона – Менделєєва)

$$pV = mRT, \quad (2.2)$$

де  $p$  – тиск газу,  $V$  – об'єм газу,  $m$  – маса газу,  $R$  – питома газова стала,

$T$  – термодинамічна температура.

*Тиск суміші ідеальних газів* (закон Дальтона)

$$p_n = \sum_{k=1}^n p_k, \quad (2.3)$$

де  $p_n$  – тиск суміші;  $p_k$  – парціальний тиск  $k$ -го компонента суміші, що дорівнює тискові, що мав би даний компонент, якщо він займав би увесь об'єм при температурі суміші;  $n$  – число компонентів суміші.

*Маса суміші газів* дорівнює сумі мас компонентів:

$$m_n = \sum_{k=1}^n m_k, \quad (2.4)$$

де  $m_n$  – маса суміші газів;  $m_k$  – маса  $k$ -го компонент суміші;  $n$  – число компонентів суміші.

*Рівняння стану для газової суміші*

$$p_n V = m_n R_n T. \quad (2.5)$$

*Рівняння стану  $k$ -го компонента суміші* можна записати:

$$p_n V_k = m_k R_k T. \quad (2.6)$$

*Термодинамічний процес* – це зміна стану термодинамічної системи внаслідок впливу на неї зовнішнього середовища.

*Внутрішня енергія* реального газу залежить від температури і об'єму, а ідеального газу – тільки від температури.

*Питома робота*, яка виконана системою, що містить 1 кг газу, визначається за формулою:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \quad (2.7)$$

де  $p$  – тиск газу,  $v_1, v_2$  – питомий об'єм на початку і в кінці процесу.

*Перший закон термодинаміки* для ізольованих систем, що містять 1 кг робочого тіла має такий вигляд:

$$q = \Delta u + l, \quad (2.8)$$

де  $q$  – кількість теплоти,  $\Delta u$  – зміна внутрішньої енергії,  $l$  – робота.

*Теплоємність тіла* – це відношення кількості теплоти, що підводиться до тіла або відводиться від нього в термодинамічному процесі до зумовленої цим підводом або відводом зміни температури:

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (2.9)$$

де  $Q$  – кількість теплоти,  $\Delta T = T_2 - T_1$  – зміна температури.

*Питома теплоємність* – це величина теплоємності, яку відносять до одиниці кількості речовини. Для термодинамічних процесів, що протікають при постійному об'ємі, питому теплоємність позначають  $c_v$ , а для процесів при постійному тиску –  $c_p$ .

*Закон Майєра* –  $c_p - c_v = R$ .  
(2.10)

*Показник адиабати (коефіцієнт Пуассона)* –  $k = \frac{c_p}{c_v}$ .  
(2.11)

Для одноатомних газів  $k = 1,667$ , для двоатомних  $k = 1,4$ , для триатомних  $k = 1,29$ .

*Ентальпія* – це сума внутрішньої енергії системи  $U$  і добутку тиску  $p$  на величину об'єму системи  $V$ :

$$H = U + pV. \quad (2.12)$$

*Ентропія* – це функція стану, яка є мірою розсіювання тепла (міра безладу в термодинамічній системі). Внаслідок ентропії, частина енергії термодинамічної системи не може бути використана для виконання роботи, оскільки пов'язана з незворотними процесами розсіювання.

*Зміна ентропії в термодинамічній системі при оборотному процесі* – це відношення загальної кількості теплоти  $\Delta Q$ , отриманої або втраченою системою, до величини абсолютної температури  $T$ :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad (2.13)$$

*Ізохорний процес* характеризується постійним питомим об'ємом:  $v = \text{const}$ ,  $dv = 0$ . При  $dv = 0$  робота розширення (стиску) не відбувається. Уся підведена (відведена) теплота йде на зміну внутрішньої енергії тіла:

$$q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1) \quad (2.14)$$

Зміна ентропії в ізохорному процесі визначається по формулі

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (2.15)$$

*Ізобарний процес* характеризується постійним значенням тиску:  $p = \text{const}$ . Робота 1 кг газу дорівнює

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1). \quad (2.16)$$

Кількість теплоти, що підводиться (відводиться) до робочого тіла в ізобарному процесі при  $c_p = \text{const}$

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p(T_2 - T_1). \quad (2.17)$$

Зміна ентропії в ізобарному процесі визначається по формулі

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (2.18)$$

*Ізотермічний процес* характеризується постійною температурою:  $T = const$ . Робота 1 кг газу дорівнює

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = RT \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (2.19)$$

В ізотермічному процесі вся підведена до робочого тіла теплота витрачається на здійснення роботи:  $q = l$ .

Зміна ентропії в ізотермічному процесі:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right). \quad (2.20)$$

*Адіабатний процес* – це процес, що протікає без теплообміну із навколишнім середовищем:  $q = 0$ ,  $\Delta s = 0$ . Робота розширення здійснюється за рахунок внутрішньої енергії:

$$l = -\Delta u = c_v (T_1 - T_2) = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (2.21)$$

*Політропний процес* характеризується тим, що він протікає в ідеальному газі при постійному значенні теплоємності, яка може мати будь-яке числове значення від  $-\infty$  до  $+\infty$ . Робота політропного процесу:

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (2.22)$$

де  $n$  – показник політропи.

Теплоємність ідеального газу в політропному процесі:

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}. \quad (2.23)$$

Зміна ентропії в політропному процесі:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_n \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (2.24)$$

Політропний процес містить у собі всю сукупність основних і часткових термодинамічних процесів і тому має узагальнююче значення.

Зображення термодинамічних процесів в  $p-v$  – координатах використовується для визначення роботи, а в  $T-s$  – для визначення кількості теплоти.

*Насичена пара* – це пара, яка знаходиться в термічній і динамічній рівновазі з рідиною, з якої вона утворилася.

*Волога насичена пара* – це двофазна суміш пари і рідини.

*Суха насичена пара* – це пара, що має температуру насичення при даному тиску і не містить рідкої фази.

## Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»

*Ступінь сухості пари* – це масова частка сухої насиченої пари у вологій парі.

*Стан вологої насиченої пари* визначається двома параметрами: тиском (або температурою) і ступенем сухості пари.

*Перегріта пара* – це пара, температура якої перевищує температуру насиченої пари, того ж тиску.

*Нижня гранична крива в  $p - v$  – діаграмі рідини* – це крива, що характеризує стан киплячої рідини (ступінь сухості пари  $x = 0$ ).

*Верхня гранична крива в  $p - v$  – діаграмі рідини* – це крива, що характеризує стан сухої насиченої пари (ступінь сухості пари  $x = 1$ ).

Стан киплячої води і сухої насиченої пари визначається одним параметром (тиском або температурою насичення), і тому з таблиць для води і водяної пари за тиском або температурою знаходять значення питомого об'єму, ентальпії і ентропії.

*Теплота пароутворення для сухої насиченої пари* дорівнює кількості теплоти, необхідної для перетворення при постійному тиску 1 кг киплячої рідини в суху насичену пару, тобто

$$r = h'' - h', \quad (2.25)$$

де  $h'$ ,  $h''$  – значення ентальпії на нижньої і верхньої граничних кривих відповідно.

Волога насичена пара, як двофазна система, підкоряється закону адитивності, і тому його параметри визначається за формулами:

$$v_x = v' + x(v'' - v') \quad (2.26)$$

$$h_x = h' + xr \quad (2.27)$$

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_n}. \quad (2.28)$$

*Теплота перегріву пари*

$$q_{\text{пер}} = c_{pn}(T_{\text{пер}} - T_n), \quad (2.29)$$

де  $c_{pn}$  – середня теплоємність перегрітої пари.

*Ентальпія перегрітої пари*

$$h_{\text{пер}} = h'' + c_{pn}(T_{\text{пер}} - T_n). \quad (2.30)$$

*Ентропія перегрітої пари*

$$s_{\text{пер}} = s'' + c_{pn} \ln\left(\frac{T_{\text{пер}}}{T_n}\right). \quad (2.31)$$

*Вологе повітря* – це суміш сухого повітря і водяної пари.

*Абсолютний тиск вологого повітря* (дорівнює, як правило, атмосферному тиску) – це сума парціальних тисків сухого повітря  $p_{\text{с.п}}$  і водяної пари  $p_{\text{п}}$ :

$$p = p_{\text{с.п}} + p_{\text{п}}. \quad (2.32)$$



*Вологе ненасичене повітря* – це суміш сухого повітря і перегрітої водяної пари.

*Вологе насичене повітря* – це суміш сухого повітря і насиченої водяної пари.

*Температура точки роси* – це температура, до якої повинно охолонути вологе ненасичене повітря, щоб перегріта пара в ньому стала насиченою.

*Вологовміст повітря* – це відношення маси водяної пари  $m_{\text{п}}$  у вологому повітрі до маси сухого повітря  $m_{\text{с.п}}$ :

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.п}}}. \quad (2.33)$$

*Абсолютна вологість повітря* – це маса водяної пари в  $1 \text{ м}^3$  вологого повітря, що дорівнює густині пари  $\rho_{\text{п}}$  при парціальному тиску пари  $p_{\text{п}}$ .

*Відносна вологість повітря* – це відношення дійсної абсолютної вологості повітря  $\rho_{\text{п}}$  до максимально можливої абсолютної вологості повітря  $\rho_{\text{п}}^{\text{н}}$  при тій же температурі:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}^{\text{н}}}. \quad (2.34)$$

Значення відносної вологості повітря може змінюватися від 0 для абсолютно сухого повітря до 1 (або 100 %) для насиченого повітря.

*Теплоємність при постійному тиску вологого повітря*

$$c_p = c_{p\text{с}} + c_{p\text{п}}d. \quad (2.35)$$

*Ентальпія вологого повітря*

$$h = c_{p\text{с}}t + h_{\text{п}}d, \quad (2.36)$$

а для випадку перегрітої водяної пари

$$h = t + (2500 + 1,9t)d. \quad (2.37)$$

Для розв'язання практичних задач використовується  $h - d$  – діаграма вологого повітря.

## 2.2. Приклади розв'язання задач

**Приклад 1.** Скільки необхідно витратити теплоти для нагрівання повітря масою  $m = 4 \text{ кг}$  при сталому тиску від температури  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  до температури  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ ? Молекулярна маса повітря  $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$ .

*Розв'язання.* Кількість теплоти для нагрівання  $1 \text{ кг}$  газу при сталому тиску визначається за формулою

$$q_p = c_{p\text{m}2}t_2 - c_{p\text{m}1}t_1,$$

де  $c_{p\text{m}} = c_{p\mu}/\mu$  – середня масова теплоємність газу при постійному тиску для даної температури.

## Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»

У табл. 3 знаходимо значення середньої молярної теплоємності повітря при постійному тиску для температур  $t_1=100^\circ\text{C}$  і  $t_2=500^\circ\text{C}$ :

$c_{p\mu_1} = 29,152$  кДж/(кмоль · К),  $c_{p\mu_2} = 30,095$  кДж/(кмоль · К), тоді середня масова теплоємність повітря для даних температур буде  $c_{p_{m1}} = 29,152/29 = 1,005$  кДж/(кг · К),  $c_{p_{m2}} = 30,095/29 = 1,038$  кДж/(кг · К).

У розглянутому випадку кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг повітря в ізобарному процесі

$$q_p = 1,038 \cdot 500 - 1,005 \cdot 100 = 418,5 \text{ кДж/кг.}$$

Для нагрівання 4 кг повітря необхідно теплоти

$$Q_p = m q_p = 4 \cdot 418,5 = 1674 \text{ кДж.}$$

**Приклад 2.** Яку кількість балонів ємністю по  $V_6=100$  л кожний необхідно для перевезення кисню масою  $M=200$  кг, якщо при температурі  $t=27^\circ\text{C}$  тиск газу в балоні дорівнює по манометру  $p_{\text{ман}}=16$  МПа? Барометричний тиск  $p_{\text{бар}}=760$  мм рт. ст.

*Розв'язання.* Кількість газу (кисню) в одному балоні визначається з рівняння Клапейрона – Менделєєва (рівняння стану газу)

$$m = \frac{pV_6}{R_k T}$$

де  $p = p_{\text{ман}} + p_{\text{бар}}$  – абсолютний тиск кисню,  $R_k = \frac{8314}{\mu_k}$  – питома газова стала кисню,  $\mu_k$  – молекулярна маса кисню, яка дорівнює 32 кг/кмоль (див. табл. 2),  $T = t + 273,15$  – термодинамічна температура кисню.

Тоді кількість кисню в одному балоні буде

$$m = \frac{\left(16 \cdot 10^6 + \frac{760}{750} 10^5\right) 100}{1000 \frac{8314}{32} (27 + 273,15)} = 20,6 \text{ кг.}$$

Необхідна кількість балонів

$$n = \frac{M}{m} = \frac{200}{20,6} = 9,7 \approx 10 \text{ шт.}$$

**Приклад 3.** Газова суміш складається з двох компонентів: кисню (масова доля  $g_k = 23,2\%$ ) і азоту (масова доля  $g_a = 76,8\%$ ). Визначити середню молярну масу  $\mu_c$  і питому газову сталу  $R_c$  суміші, об'ємні доли кисню  $z_k$  і азоту  $z_a$ , їх парціальні тиски  $p_k$  та  $p_a$  при тиску суміші  $p_c = 1 \cdot 10^5$  Па.

*Розв'язання.* Середня молекулярна маса суміші газів (кисню і азоту) визначається по формулі:

$$\mu_c = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{g_k}{\mu_k} + \frac{g_a}{\mu_a}}$$

де  $\mu_k = 32$  кг/кмоль,  $\mu_a = 28$  кг/кмоль, відповідно, молекулярна маса кисню і азоту (див. табл. 2).

Тоді середня молекулярна маса суміші кисню і азоту буде

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 29 \text{ кг/кмоль}$$

Питома газова стала суміші газів

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = \frac{8314}{29} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Об'ємна доля  $i$ -го газу в суміші газів визначається по формулі:

$z_i = \frac{g_i}{\mu_i} \mu_c$ , з якої для кисню маємо  $z_k = \frac{g_k}{\mu_k} \mu_c = \frac{0,232}{32} 29 = 0,21$ , а для азоту

$$z_a = \frac{g_a}{\mu_a} \mu_c = \frac{0,768}{28} 29 = 0,79.$$

Парціальний тиск  $i$ -го компоненту газу в суміші газів визначається по формулі:

$$p_i = z_i \cdot p_c.$$

тоді парціальний тиск кисню  $p_k = z_k \cdot p_c = 0,21 \cdot 1 \cdot 10^5 = 0,21 \cdot 10^5$  Па, а парціальний тиск азоту  $p_a = z_a \cdot p_c = 0,79 \cdot 1 \cdot 10^5 = 0,79 \cdot 10^5$  Па.

**Приклад 4.** Об'єм кисню  $V_1$ , який має масу  $m = 10$  кг і температуру  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ , при нагріванні при постійному тиску  $p = 0,3$  МПа збільшується у 1,5 рази ( $\frac{V_2}{V_1} = 1,5$ ). Визначити кінцеву температуру газу  $t_2$ , роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну калоричних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta I$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі.

*Розв'язання.* Запишемо рівняння стану для початку і кінця процесу:  $p_1 V_1 = RT_1$ ;  $p_1 V_2 = RT_2$ . З цих рівнянь визначимо кінцеву температуру газу  $T_2 = \frac{T_1 V_2}{V_1} = (273 + 27)1,5 = 450 \text{ K}$  або  $t_2 = 177^\circ\text{C}$ .

Робота 1 кг газу в ізобарному процесі визначається по формулі:

$$L_p = p(V_2 - V_1) = R_k(T_2 - T_1),$$

де  $R_k = \frac{8314}{\mu_k} = \frac{8314}{32} = 259,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$  – питома газова стала кисню,  $\mu_k$ -молекулярна маса кисню (див. табл. 2).

Робота  $m$  кг газу

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

$$L_p = m l_p = m R_k (T_2 - T_1) = 10 \cdot 259,8(450 - 300) = 389700 \text{ Дж} \\ \approx 390 \text{ кДж}.$$

Кількість теплоти, що підводиться до 1 кг газу в ізобарному процесі

$$q_p = c_{p_{m2}} t_2 - c_{p_{m1}} t_1,$$

де  $c_{p_m} = c_{p_{\mu}} / \mu$  – середня масова теплоємність газу при постійному тиску для даної температури.

З табл. 3 знаходимо значення середньої молярної теплоємності кисню при постійному тиску для температур  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  і  $t_2 = 177^\circ\text{C}$ :

$c_{p_{\mu 1}} = 29,34 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ ,  $c_{p_{\mu 2}} = 29,84 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ , тоді середня масова теплоємність кисню для даних температур буде  $c_{p_{m1}} = 29,34/32 = 0,92 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_{p_{m2}} = 29,84/32 = 0,93 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

У розглянутому випадку кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг кисню в ізобарному процесі

$$q_p = 0,93 \cdot 177 - 0,92 \cdot 27 = 139,8 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Для нагрівання 10 кг кисню необхідно теплоти

$$Q_p = m q_p = 10 \cdot 139,8 = 1398 \text{ кДж}.$$

Зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U = Q_p - L_p = 1398 - 390 = 1008 \text{ кДж}.$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H = Q_p = 1398 \text{ кДж}.$$

Зміна ентропії 1 кг газу при сталому тиску

$$\Delta s = c_{p_m} \ln \frac{T_2}{T_1},$$

де  $c_{p_m} = \frac{c_{p_{m1}} + c_{p_{m2}}}{2} = \frac{0,92 + 0,93}{2} = 0,925 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – середня масова теплоємність кисню в інтервалі температур 27...177°C.

Зміна ентропії 10 кг кисню

$$\Delta S = m \cdot \Delta s = 10 \cdot 0,925 \ln \frac{450}{300} = 3,75 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

**Приклад 5.** Визначити стан і калоричні параметри (внутрішня енергія  $u$ , ентальпія  $h$  і ентропія  $s$ ) водяної пари при  $p = 1,6 \text{ МПа}$  і  $t = 500^\circ\text{C}$ .

*Розв'язання.* При заданому тиску  $p = 1,6 \text{ МПа}$  по таблиці теплофізичних властивостей водяної пари на лінії насичення (табл. 4) знаходимо температуру насичення пари  $t_n = 201^\circ\text{C}$ , яка менше  $t = 500^\circ\text{C}$ , а значить пара перегріта.

По таблиці калоричних параметрів перегрітої водяної пари (табл. 5) залежно від тиску і температури знаходимо:

$$v = 0,2202 \text{ м}^3/\text{кг}; h = 3471,8 \text{ кДж/кг}; s = 7,5395 \text{ кДж/кг}.$$

Внутрішня енергія водяної пари

$$u = h - pv = 3471,8 - 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,2202 \cdot 10^{-3} = 3119,5 \text{ кДж/кг}.$$

**Приклад 6.** Водяна пара з абсолютним тиском  $p_1 = 1,6$  МПа і ступенем сухості  $x_1 = 0,97$  нагрівається при постійному тиску і її температура підвищується до  $t_2 = 350^\circ\text{C}$ . Визначити кількість теплоти, яке підводиться до  $m = 1,2$  кг пари і зміну її внутрішньої енергії  $\Delta U$ . Розрахунки зробити за допомогою таблиць властивостей водяної пари.

*Розв'язання.* Питома ентальпія, температура насичення і питомий об'єм водяної пари в початковому стані визначаються з таблиці властивостей насиченої водяної пари і води на кривій насичення (табл. 6) і формул (2.25) ... (2.27):

$$h_1 = h_x = h' + rx_1 = 858,3 + 1935 \cdot 0,97 = 2735 \text{ кДж/кг};$$

$$v_1 = v_x = xv'' = 0,97 \cdot 0,1238 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$t_{н1} = 201,36^\circ\text{C}$  – температура насичення водяної пари в початковому стані.

Оскільки,  $t_2 > t_{н1}$ , то в кінці процесу пара буде перегріта.

З таблиці властивостей перегрітої пари (табл. 5) знаходимо питому ентальпію і питомий об'єм водяної пари в кінцевому стані при ізобарному процесі ( $p_2 = p_1 = 1,6$  МПа і  $t_2 = 350^\circ\text{C}$ ):

$$h_2 = 3142 \text{ кДж/кг}; v_2 = 0,1743 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кількість теплоти підведеної до 1,2 кг водяної пари в процесі

$$Q = mq = m(h_2 - h_1) = 1,2 \cdot (3142 - 2735) = 488 \text{ кДж}.$$

Зміна внутрішньої енергії 1,2 кг пари в процесі

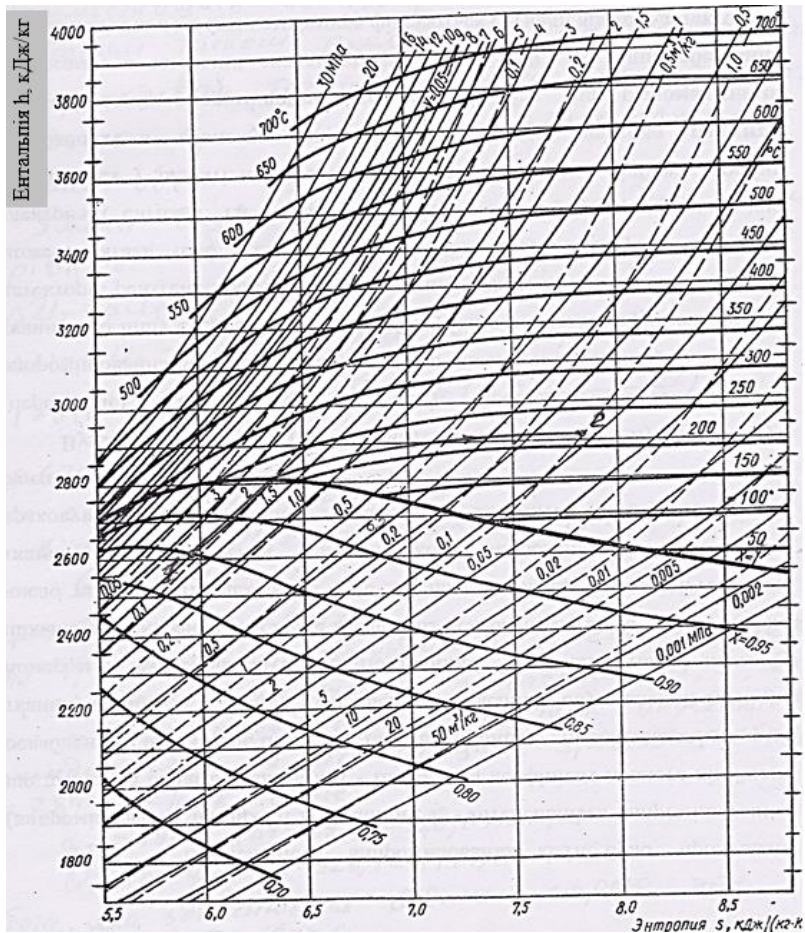
$$\Delta U = U_2 - U_1 = m[(h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)] = 1,2 \left[ \left( 3142 - 1,6 \cdot \frac{10^6}{10^3} \cdot 0,1743 \right) - \left( 2735 - 1,6 \cdot \frac{10^6}{10^3} \cdot 0,12 \right) \right] = 384 \text{ кДж}.$$

**Приклад 7.** Водяна пара в кількості  $m = 1,2$  кг з початковими параметрами: тиск  $p_1 = 2,0$  МПа, ступень сухості  $x_1 = 0,9$ , ізотермічно розширюється до  $p_2 = 0,12$  МПа. Визначити кількість теплоти підведеної до пари, виконану роботу і зміну внутрішньої енергії, використовуючи  $h - s$  – діаграму. Побудувати цей процес в діаграмі.

*Розв'язання.* Питомий об'єм водяної пари в початковому стані (точка 1) по заданим параметрам знаходимо з  $h - s$  – діаграми (рис. 2.1):  $v_1 = 0,09 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Перемістившись по ізотермі 1-2 до перетину з заданим

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

тиском  $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$  знаходимо точку 2 (кінцевий стан). Спроектувавши точки 1 і 2 на вісь ординат, знаходимо  $h_1 = 2610 \text{ кДж/кг}$ ,  $h_2 = 2910 \text{ кДж/кг}$  і питомий об'єм  $v_2 = 2,0 \text{ м}^3/\text{кг}$ .



**Рис.2.1.** Ізотермічний процес 1-2 в  $h - s$  – діаграмі  
Зміна внутрішньої енергії 1,2 кг пари в ізотермічному процесі

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m[(h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)] = 1,2 \left( 2910 - \frac{0,12 \cdot 10^6 \cdot 2,0}{10^3} \right) - \left( 2610 - \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0,09}{10^3} \right) = 288 \text{ кДж/кг.}$$

Кількість теплоти підведеної до 1,2 кг водяної пари в процесі

$$Q_T = mq = mT_2(s_2 - s_1), \text{кДж,}$$

де  $T_2$  – температура пари в кінцевому стані (точка 2),  $s_1, s_2$  – відповідно, ентропія в початковому і кінцевому стані.

По  $h - s$  – діаграмі знаходимо  $T_2 = 217 + 273 = 490 \text{ K}$ , а також  $s_1$  і  $s_2$ , для чого з початкової і кінцевої точок опускаються перпендикуляри на вісь абсцис:  $s_1 = 5,95 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ,  $s_2 = 7,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ .

$$\text{Отже } Q_T = 1,2 \cdot 490(7,84 - 5,95) = 1111 \text{ кДж.}$$

Робота яка здійснюється водяною парою при розширенні, дорівнює:

$$L = ml_T = Q_T - \Delta U = 1111 - 288 = 823 \text{ кДж.}$$

**Приклад 8.** Визначити ентальпію вологого повітря при  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 70\%$  і барометричному тиску  $p_6 = 745 \text{ мм рт. ст.}$

*Розв'язання.* З таблиці основних фізичних характеристик повітря при тиску 760 мм рт. ст. (табл. 8) знаходимо парціальний тиск водяної пари, яка насичує повітря, при заданій температурі  $t = 25^\circ\text{C}$  і барометричному тиску  $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ , що дорівнює  $p_n = 23,756 \text{ мм рт. ст.}$

Визначаємо з формули  $\varphi = (p_n/p_6) \cdot 100\%$  парціальний тиск водяної пари для заданого стану повітря

$$p_n = p_6 \frac{\varphi}{100} \left( \frac{p_6}{760} \right) = 23,756 \cdot 70/100 \cdot 745/760 = 16,3 \text{ мм рт. ст.}$$

Знаходимо вологовміст повітря з формули:

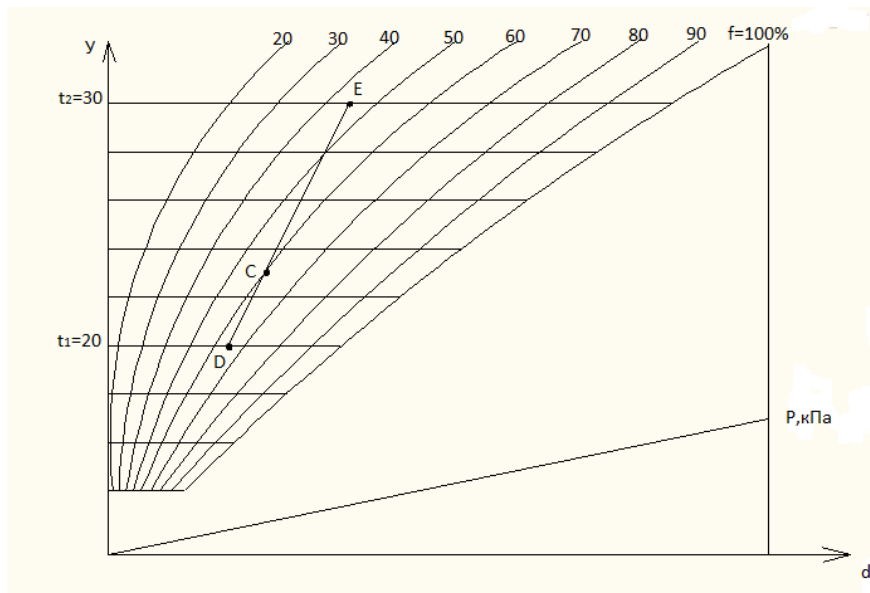
$$d = 622 \frac{p_n}{p_6 - p_n} = 622 \cdot 16,3/(745 - 16,3) = 13,9 \text{ г/кг} = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг.}$$

Ентальпію вологого повітря визначаємо з формули:

$$\begin{aligned} h &= 1,0t + (2500 + 1,89t)d \\ &= 1,0 \cdot 25 + (2500 + 1,89 \cdot 25) \cdot 13,9 \cdot 10^{-3} = \\ &= 60,41 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

**Приклад 9.** Визначити параметри суміші повітря (температуру  $t_c$ , відносну вологість  $\varphi_c$ , ентальпію  $h_c$  і вологовміст  $d_c$ ), якщо змішуються  $m_1 = 4500 \text{ кг}$  повітря з параметрами  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  і  $\varphi_1 = 65\%$  із  $m_2 = 1500 \text{ кг}$  повітря з параметрами  $t_2 = 30^\circ\text{C}$  і  $\varphi_2 = 45\%$ . Розрахунки зробити за допомогою  $h - d$  – діаграми і аналітичним методом.

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**



**Рис.2.2.** Процес змішування повітря

*Розв'язання.* А) Розрахунки за допомогою  $h - d$  - діаграми. Знаходимо на  $h - d$  - діаграмі (рис.2.2) точку D по  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_1 = 65\%$  і точку E по  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_2 = 45\%$ . З'єднуємо точки D та E прямою лінією.

Визначаємо відношення масових частин суміші повітря

$$n = \frac{m_1}{m_2} = \frac{4500}{1500} = 3.$$

Вимірюємо довжину відрізка DE, який в даному випадку дорівнює 46 мм, і розділяємо його на  $(n + 1) = 3 + 1 = 4$  частини. Відкладаємо відрізок, який дорівнює 1 частині ( в даному випадку  $46/4 = 11,5$  мм) від точки D і знаходимо точку C, яка визначає параметри суміші повітря:  $t_c = 22,5^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_c = 60\%$ ;  $h_c = 47$  кДж/кг;  $d_c = 9,6$  г/кг.

Знайдена точка C суміші повітря завжди знаходиться ближче до параметрів тієї частини змішаного повітря, яка має більшу масу ( в даній задачі до повітря в точці D).

Б) Розрахунки аналітичним методом. По формулам для суміші газів визначаємо параметри суміші повітря:



$$t_c = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \frac{4500 \cdot 20 + 1500 \cdot 30}{4500 + 1500} = 22,5^\circ\text{C};$$

$$\varphi_c = \frac{m_1 \varphi_1 + m_2 \varphi_2}{m_1 + m_2} = \frac{4500 \cdot 0,65 + 1500 \cdot 0,45}{4500 + 1500} \times 100\% = 60\%;$$

$$h_c = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2} = \frac{4500 \cdot 42,8 + 1500 \cdot 59,0}{4500 + 1500} = 46,9 \text{ кДж/кг};$$

$$d_c = \frac{m_1 d_1 + m_2 d_2}{m_1 + m_2} = \frac{4500 \cdot 9,0 + 1500 \cdot 11,3}{4500 + 1500} = 9,6 \text{ г/кг}.$$

Значення ентальпії і вологовмісту в точках D та E визначаються з  $h - d$  – діаграми.

### 2.3. Задачі для розв'язання

**Задача 2.1.** В одному з апаратів теплової машини тиск по манометру складає  $p_1$ , а в іншому апараті розрідження по вакуумметру складає  $p_2$ . Визначити абсолютний тиск в апаратах  $p_{\text{абс1}}$  і  $p_{\text{абс2}}$ , якщо показання барометра складає  $p_{\text{бар}}$ .

Вихідні дані

№ Вар	$p_1$ , МПа	$p_2$ , мм рт. ст.	$p_{\text{бар}}$ , мм рт. ст.	№ Вар	$p_1$ , МПа	$p_2$ , мм рт. ст.	$p_{\text{бар}}$ , мм рт. ст.
1	1,2	530	735	16	3,9	300	720
2	1,4	520	734	17	4,0	550	736
3	1,6	510	733	18	4,2	560	737
4	1,8	500	732	19	4,5	570	738
5	2,1	495	731	20	4,8	580	739
6	2,3	490	730	21	5,0	600	740
7	2,5	450	729	22	5,3	610	745
8	2,9	440	728	23	5,5	630	746
9	3,2	430	727	24	5,7	650	747
10	3,3	420	726	25	5,8	660	748
11	3,4	410	725	26	6,0	680	749

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

№ Вар	$p_1$ , МПа	$p_2$ , мм рт. ст.	$p_{бар}$ , мм рт. ст.	№ Вар	$p_1$ , МПа	$p_2$ , мм рт. ст.	$p_{бар}$ , мм рт. ст.
12	3,5	405	724	27	6,3	700	750
13	3,6	400	723	28	6,4	703	725
14	3,7	344	722	29	6,6	705	730
15	3,8	330	721	30	6,8	710	747

**Задача 2.2.** Скільки необхідно витратити теплоти для нагрівання газу масою  $m$ , кг при сталому тиску від температури  $t_1$ , °C до температури  $t_2$ , °C? Молекулярна маса газу  $\mu$ , кг/кмоль.

Вихідні дані

№ Вар	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	№ Вар	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C
1	H <sub>2</sub>	0,5	100	500	16	N <sub>2</sub>	12	400	700
2	N <sub>2</sub>	4	200	300	17	O <sub>2</sub>	22	100	1100
3	O <sub>2</sub>	14	300	500	18	Повітря	31	200	500
4	Повітря	56	400	600	19	CO <sub>2</sub>	112	300	1000
5	CO <sub>2</sub>	73	100	1600	20	H <sub>2</sub> O	18	100	400
6	H <sub>2</sub> O	8	100	200	21	CO	41	400	500
7	CO	31	200	300	22	H <sub>2</sub>	1,2	400	800
8	H <sub>2</sub>	0,8	200	700	23	N <sub>2</sub>	16	500	900
9	N <sub>2</sub>	7	300	500	24	O <sub>2</sub>	26	200	1300
10	O <sub>2</sub>	16	400	1000	25	Повітря	48	100	400
11	Повітря	63	100	200	26	CO <sub>2</sub>	126	300	700
12	CO <sub>2</sub>	90	200	600	27	H <sub>2</sub> O	20	200	500
13	H <sub>2</sub> O	12	100	300	28	CO	3	100	700
14	CO	22	300	600	29	H <sub>2</sub>	1,5	100	200
15	H <sub>2</sub>	1,0	300	400	30	N <sub>2</sub>	20	600	1700

**Задача 2.3.** Яку кількість балонів ємністю по  $V_6$ , л кожний необхідно для перевезення газу масою  $M$ , кг, якщо при температурі  $t$ , °C тиск газу в балоні дорівнює по манометру  $p_{ман}$ , МПа? Барометричний тиск  $p_{бар}$ , мм.рт.ст.

Вихідні дані

№ вар	Газ	$V_6$ , л	$M$ , кг	$t$ , °C	$p_{ман}$ , МПа	$p_{бар}$ , мм.рт.ст	№ вар	Газ	$V_6$ , л	$M$ , кг	$t$ , °C	$p_{ман}$ , МПа	$p_{бар}$ , мм.рт.ст
1	H <sub>2</sub>	100	15	10	12	765	16	CH <sub>4</sub>	60	90	28	20	756
2	N <sub>2</sub>	200	180	12	12,5	760	17	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	70	130	29	21	758
3	O <sub>2</sub>	150	200	15	13	755	18	He	40	41	30	22	761
4	Повітря	100	100	16	13,5	750	19	H <sub>2</sub>	150	18	31	23	763
5	CO <sub>2</sub>	75	220	17	14	745	20	N <sub>2</sub>	16	220	32	9,5	766
6	CO	50	160	18	15	740	21	O <sub>2</sub>	190	45	33	9	768
7	CH <sub>4</sub>	80	80	19	15,5	735	22	Повітря	150	140	34	8,5	770
8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	90	115	20	16	735	23	CO <sub>2</sub>	150	270	35	8	740
9	He	60	26	21	16,5	730	24	CO	110	120	9	7,5	735
10	H <sub>2</sub>	120	13	22	17	732	25	CH <sub>4</sub>	90	105	8	16,2	730
11	N <sub>2</sub>	180	200	23	17,5	737	26	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	115	145	7	15,7	725
12	O <sub>2</sub>	210	220	24	18	738	27	He	20	37	6	14,3	720
13	Повітря	120	120	25	18,5	742	28	H <sub>2</sub>	180	20	5	12,7	741
14	CO <sub>2</sub>	100	250	26	19	748	29	O <sub>2</sub>	175	300	4	11,8	745
15	CO	80	140	27	19,5	752	30	Повітря	200	160	3	10,9	763

**Задача 2.4.** Склад газової суміші  $\Gamma_1 = a_1$  мас %,  $\Gamma_2 = a_2$  мас % і  $\Gamma_3 = a_3$  мас %. Визначити середню молярну масу  $\mu_c$  і газову постійну суміші  $R_c$ , об'ємні долі  $z_{\Gamma_i}$  і парціальні тиски компонентів  $p_{\Gamma_i}$  при заданому тиску суміші  $p_c$ .

Вихідні дані

№ вар	$\Gamma_1$	$a_1$ , мас %	$\Gamma_2$	$a_2$ , мас %	$\Gamma_3$	$a_3$ , мас %	$p_c$ , $\cdot 10^5$ Па	№ вар	$\Gamma_1$	$a_1$ , мас %	$\Gamma_2$	$a_2$ , мас %	$\Gamma_3$	$a_3$ , мас %	$p_c$ , $\cdot 10^5$ Па
1	He	2,2	H <sub>2</sub>	60,0	N <sub>2</sub>	37,8	0,7	16	He	18,0	N <sub>2</sub>	61,8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20,2	1,85
2	O <sub>2</sub>	26,2	CO	39,8	CH <sub>4</sub>	34,0	0,8	17	O <sub>2</sub>	48,4	H <sub>2</sub>	47,3	He	4,3	1,75
3	H <sub>2</sub>	21,1	N <sub>2</sub>	22,8	O <sub>2</sub>	56,1	0,9	18	H <sub>2</sub>	31,6	N <sub>2</sub>	37,6	CO	30,8	1,65
4	N <sub>2</sub>	49,8	CO <sub>2</sub>	42,6	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	7,6	1,0	19	N <sub>2</sub>	73,2	CO	19,9	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	6,9	1,55
5	CO	19,6	He	6,6	N <sub>2</sub>	73,8	1,1	20	CO	17,0	N <sub>2</sub>	-	O <sub>2</sub>	83,0	1,45
6	CO <sub>2</sub>	18,9	CH <sub>4</sub>	26,8	N <sub>2</sub>	54,3	1,2	21	CO <sub>2</sub>	16,0	H <sub>2</sub>	61,0	CH <sub>2</sub>	23,0	1,35

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

№ вар	$\Gamma_1$	$a_1$ , мас %	$\Gamma_2$	$a_2$ , мас %	$\Gamma_3$	$a_3$ , мас %	$p_c \cdot 10^5$ Па	№ вар	$\Gamma_1$	$a_1$ , мас %	$\Gamma_2$	$a_2$ , мас %	$\Gamma_3$	$a_3$ , мас %	$p_c \cdot 10^5$ Па
7	CH <sub>4</sub>	19,1	He	4,6	O <sub>2</sub>	76,3	1,3	22	CH <sub>4</sub>	6,0	CO <sub>2</sub>	86,0	H <sub>2</sub>	8,0	1,25
8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	34,8	CH <sub>2</sub>	32,1	H <sub>2</sub>	33,1	1,4	23	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,0	N <sub>2</sub>	68,0	O <sub>2</sub>	31,0	1,15
9	He	12,3	CO	13,1	N <sub>2</sub>	74,6	1,5	24	He	22,8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20,8	N <sub>2</sub>	56,4	1,05
10	O <sub>2</sub>	26,1	H <sub>2</sub>	5,6	N <sub>2</sub>	68,3	1,6	25	O <sub>2</sub>	23,2	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	-	N <sub>2</sub>	76,8	0,95
11	H <sub>2</sub>	29,7	CO	36,6	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	33,7	1,7	26	H <sub>2</sub>	33,2	O <sub>2</sub>	43,4	CO	23,4	0,85
12	N <sub>2</sub>	74,7	O <sub>2</sub>	12,7	CO <sub>2</sub>	12,6	1,8	27	N <sub>2</sub>	69,6	CO	24,8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5,6	0,75
13	CO	22,0	CO <sub>2</sub>	40,0	O <sub>2</sub>	38,0	1,9	28	CO	30,0	CO <sub>2</sub>	30,0	He	40,0	1,0
14	CO <sub>2</sub>	64,3	He	13,3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	22,4	2,0	29	CO <sub>2</sub>	8,4	N <sub>2</sub>	72,0	O <sub>2</sub>	19,6	0,98
15	CH <sub>4</sub>	20,2	CO <sub>2</sub>	29,9	N <sub>2</sub>	49,9	1,9	30	CH <sub>4</sub>	4,0	CO	84,0	H <sub>2</sub>	12,0	0,96

**Задача 2.5.** Об'єм газу  $V_1$ , який має масу  $m$ , кг і температуру  $t_1$ , °C при нагріванні (або охолодженні) при постійному тиску  $p$ , МПа змінюється у  $n$  рази ( $\frac{V_2}{V_1} = n$ ). Визначити кінцеву температуру газу  $t_2$ , роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну калоричних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta H$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі. Теплоємність газу прийняти постійною. Показати процес на діаграмах  $p - v$  і  $T - s$ .

**Вихідні данні**

№ вар.	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n$ , рази	№ вар.	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n$ , рази
1	He	2	30	0,5	0,18	16	CO	11,4	370	0,47	0,8
2	H <sub>2</sub>	2,8	220	0,4	0,6	17	Пов.	13,1	20	0,46	5,6
3	N <sub>2</sub>	9,1	16	0,3	3,5	18	H <sub>2</sub> O	15,6	120	0,38	1,5
4	O <sub>2</sub>	7,3	310	0,2	0,5	19	CO <sub>2</sub>	3,2	420	0,36	0,33
5	CO	10,3	15	0,25	3,8	20	CH <sub>4</sub>	6,3	27	0,34	1,3
6	Пов.	12,3	150	0,35	0,8	21	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5,3	380	0,28	0,6
7	H <sub>2</sub> O	14,8	400	0,45	0,7	22	SO <sub>2</sub>	1,4	140	0,26	1,8
8	CO <sub>2</sub>	2,4	10	0,55	2,6	23	N <sub>2</sub>	10,3	35	0,25	2,2
9	CH <sub>4</sub>	5,4	140	0,53	0,4	24	O <sub>2</sub>	2,8	12	0,24	2,8
10	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	13,8	12	0,22	2,2	25	CO	12,2	26	0,18	1,5

№ вар.	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n$ , рази	№ вар.	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n$ , рази
11	SO <sub>2</sub>	0.8	900	0.31	0.3	26	Пов.	14.0	270	0.17	0.2
12	He	3	200	0.41	0.9	27	H <sub>2</sub> O	16.7	380	0.16	0.9
13	H <sub>2</sub>	3.6	0	0.12	4.0	28	CO <sub>2</sub>	6.7	18	0.15	3.6
14	N <sub>2</sub>	9.8	470	0.44	0.6	29	CH <sub>4</sub>	7.8	320	0.14	0.4
15	O <sub>2</sub>	8.5	10	0.53	2.8	30	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	8.1	3.6	0.29	4.8

**Задача 2.6.** Об'єм газу  $V_1$ , який має масу  $m$ , кг і температуру  $t_1$ , °C, при нагріванні при постійному тиску  $p$ , МПа збільшується у  $n$  рази ( $\frac{V_2}{V_1} = n$ ). Визначити кінцеву температуру газу  $t_2$ , роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну калоричних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta H$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі.

Вихідні дані

№ ва р	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n=V_2/V_1$	№ ва р	Газ	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$p$ , МПа	$n=V_2/V_1$
1	O <sub>2</sub>	5	30	0,3	1,3	16	O <sub>2</sub>	6	41	0,39	2,8
2	Повітря	12	18	0,35	1,4	17	H <sub>2</sub>	8	39	0,38	2,9
3	CO <sub>2</sub>	14	19	0,40	1,5	18	N <sub>2</sub>	13	37	0,37	3
4	CO	9	20	0,45	1,6	19	O <sub>2</sub>	9	35	0,36	3,1
5	H <sub>2</sub>	4	22	0,29	1,7	20	Повітря	15	33	0,34	3,2
6	N <sub>2</sub>	18	24	0,28	1,8	21	CO <sub>2</sub>	17	31	0,33	3,3
7	O <sub>2</sub>	16	26	0,27	1,9	22	CO	13	29	0,32	3,4
8	H <sub>2</sub>	7	28	0,26	2	23	Повітря	19	27	0,31	3,5
9	N <sub>2</sub>	12	30	0,25	2,1	24	CO <sub>2</sub>	20	25	0,41	3,6
10	O <sub>2</sub>	8	32	0,24	2,2	25	CO	7	23	0,42	3,7
11	Повітря	14	34	0,23	2,3	26	H <sub>2</sub>	9	21	0,43	3,8
12	CO <sub>2</sub>	16	36	0,22	2,4	27	N <sub>2</sub>	14	18	0,44	3,9
13	CO	12	38	0,21	2,5	28	O <sub>2</sub>	10	17	0,18	4
14	CO <sub>2</sub>	18	40	0,2	2,6	29	Повітря	16	15	0,17	4,1
15	CO	20	42	0,19	2,7	30	CO <sub>2</sub>	20	10	0,16	4,2

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

**Задача 2.7.** Газ, який має масу  $m$ , кг і початкову температуру  $t_1$ , °C, при підведенні (або відведенні) теплоти в ізохорному процесі при постійному об'ємі робочого тіла  $v$ , м<sup>3</sup>, змінює свій тиск у  $n$  разів ( $n = \frac{p_2}{p_1}$ ). Визначити кінцеву температуру газу  $t_2$ , роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну calorичних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta H$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі. Теплоємність газу прийняти постійною. Показати процес на діаграмах  $p - v$  і  $T - s$ .

Вихідні дані

№ Вар	Газ	$v$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$n$ , рази	№ Вар	Газ	$v$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$n$ , рази
1	Повітря	2,1	1,8	500	0,43	16	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,5	4,7	19	2,6
2	H <sub>2</sub> O	4,6	4,0	120	2,22	17	SO <sub>2</sub>	3,1	3,9	400	0,72
3	CO <sub>2</sub>	3,8	7,2	700	0,5	18	He	2,4	2,5	10	5,0
4	CH <sub>4</sub>	2,8	6,3	45	3,1	19	H <sub>2</sub>	0,5	2,4	15	4,0
5	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,8	5,4	800	0,6	20	N <sub>2</sub>	1,5	3,3	450	0,58
6	SO <sub>2</sub>	2,6	4,8	30	1,3	21	O <sub>2</sub>	0,8	4,6	31	1,9
7	He	3,3	2,9	200	0,7	22	CO	0,9	5,5	310	0,6
8	H <sub>2</sub>	3,1	3,0	20	2,2	23	Повітря	1,9	2,9	29	4,8
9	N <sub>2</sub>	2,9	4,0	600	0,9	24	H <sub>2</sub> O	3,7	4,6	600	0,4
10	O <sub>2</sub>	1,5	5,0	25	3,1	25	CO <sub>2</sub>	3,3	6,6	27	1,3
11	CO	1,6	6,0	750	0,95	26	CH <sub>4</sub>	1,5	5,6	450	0,63
12	Повітря	2,2	2,5	15	4	27	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,3	3,2	18	1,9
13	H <sub>2</sub> O	4,4	5,1	820	0,6	28	SO <sub>2</sub>	1,8	3,6	320	0,8
14	CO <sub>2</sub>	3,6	6,8	22	1,7	29	He	2,6	1,5	15	4,1

№ Вар	Газ	$v$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$n$ , раз	№ Вар	Газ	$v$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$t_1$ , °C	$n$ , раз
15	CH <sub>4</sub>	2,1	5,7	430	0,65	30	H <sub>2</sub>	1,2	0,8	320	0,6

**Задача 2.8.** В ізотермічному процесі до робочого тіла (газ), яке має масу  $m$ , кг і початковий тиск  $p_1$ , МПа, підводиться ( або відводиться ) теплота. При цьому об'єм змінюється у  $n$  разів ( $\frac{V_2}{V_1} = n$ ).

Визначити кінцевий тиск газу  $p_2$  у процесі, роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну калоричних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta H$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі. Теплоємність газу прийняти постійною. Показати процес на діаграмах  $p - v$  і  $T - s$ .

Вихідні дані:

№ вар.	Газ	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$n$ , раз	№ вар	Газ	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$n$ , раз
1	CO <sub>2</sub>	0,5	3,2	0,2	0,25	16	He	0,12	0,6	1,0	0,2
2	CH <sub>4</sub>	0,4	4,1	0,2	0,2	17	H <sub>2</sub>	2,6	0,3	1,3	1,3
3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	3,0	4,3	0,65	3	18	N <sub>2</sub>	0,3	1,5	0,3	0,95
4	SO <sub>2</sub>	1,05	3,1	0,05	0,7	19	O <sub>2</sub>	1,6	1,6	0,7	2,7
5	He	7,0	0,8	1,5	2	20	CO	0,5	1,8	0,2	0,8
6	H <sub>2</sub>	6,3	0,5	1,0	1,7	21	Повітря	2,2	3,2	0,3	1,4
7	N <sub>2</sub>	24,0	1,2	0,12	3	22	H <sub>2</sub> O	0,6	3,8	0,95	0,92
8	O <sub>2</sub>	3,75	1,4	0,4	2,2	23	CO <sub>2</sub>	0,9	3,1	1,3	4,6
9	CO	0,8	2,8	0,5	0,85	24	CH <sub>4</sub>	1,3	2,2	0,2	0,8
10	Повітря	1,5	3,7	0,1	0,65	25	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1,15	1,8	1,0	3,2
11	H <sub>2</sub> O	2,1	4,2	0,6	1,35	26	SO <sub>2</sub>	1,4	4,7	1,3	6,8
12	CO <sub>2</sub>	2,3	3,9	1,0	3,6	27	He	2,1	0,2	0,6	0,85
13	CH <sub>4</sub>	1,6	2,6	0,15	0,78	28	H <sub>2</sub>	3,6	0,7	0,6	8,5

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

№ вар.	Газ	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$n$ , раз и	№ вар.	Газ	$V_2$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$n$ , раз и
14	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	3,1	2,1	0,22	1,5	29	N <sub>2</sub>	0,3	1,9	0,9	0,7
15	SO <sub>2</sub>	4,2	4,2	0,25	2,5	30	O <sub>2</sub>	2,6	2,1	9,8	12

**Задача 2.9.** Газ у кількості  $m$ , кг стискується (розширюється) по політропі (показник політропи  $n$ ) із зміною об'єму у  $\alpha$  разів ( $\frac{V_2}{V_1} = \alpha$ ). Визначити роботу  $L_p$  і кількість теплоти  $Q_p$ , а також зміну калоричних параметрів: внутрішньої енергії  $\Delta U$ , ентальпії  $\Delta H$  і ентропії  $\Delta S$  в цьому процесі, якщо задаються початкові температура  $t_1, ^\circ\text{C}$  і тиск  $p_1$ , МПа. Теплоємність газу прийняти постійною. Показати процес на діаграмах  $p - v$  і  $T - s$ .

**Вихідні дані**

№ вар	Газ	$m$ , кг	$n$	$\alpha$ , раз и	$t_1$ , °C	$p_1$ , МПа	№ вар	Газ	$m$ , кг	$n$	$\alpha$ , раз и	$t_1$ , °C	$p_1$ , МПа
1	O <sub>2</sub>	1,5	0,5	0,8	20	0,1	16	N <sub>2</sub>	1,7	1,2	3,9	630	0,35
2	N <sub>2</sub>	2,0	1,1	3	420	0,2	17	CO	1,6	0,3	1,8	40	0,37
3	CO	2,2	0,6	0,7	10	0,25	18	CO <sub>2</sub>	1,9	1,6	7,3	32	0,4
4	CO <sub>2</sub>	2,4	1,2	3,6	500	0,27	19	H <sub>2</sub> O	3,2	1,2	3,7	530	0,7
5	H <sub>2</sub> O	2,6	0,7	0,7	18	0,3	20	SO <sub>2</sub>	0,8	0,9	2,7	40	0,5
6	SO <sub>2</sub>	2,8	1,2	4	700	0,35	21	Повітря	0,5	1,95	3,8	22	0,6
7	Повітря	1,8	1,3	0,2	35	0,2	22	O <sub>2</sub>	2,6	0,8	0,4	45	0,12
8	O <sub>2</sub>	1,9	1,1	6	470	0,15	23	N <sub>2</sub>	1,1	1,33	0,6	18	0,21
9	N <sub>2</sub>	0,5	1,6	0,4	27	0,1	24	CO	1,2	1,7	0,45	710	0,16
10	CO	0,8	0,4	4,5	20	0,12	25	CO <sub>2</sub>	0,8	0,1	0,8	820	0,18
11	CO <sub>2</sub>	1,2	1,8	0,6	600	0,16	26	H <sub>2</sub> O	0,5	1,8	0,4	19	0,21
12	H <sub>2</sub> O	1,4	0,2	5	36	0,18	27	SO <sub>2</sub>	4	2,1	0,6	270	0,23
13	SO <sub>2</sub>	1,6	1,9	0,4	900	0,21	28	Повітря	2,6	1,6	0,45	370	0,27
14	Повітря	1,2	0,9	6	12	0,25	29	O <sub>2</sub>	3,0	4,7	4,8	555	0,32



№ вар	Газ	$m$ , кг	$n$	$\alpha$ , рази	$t_1$ , °C	$p_1$ , МПа	№ вар	Газ	$m$ , кг	$n$	$\alpha$ , рази	$t_1$ , °C	$p_1$ , МПа
15	O <sub>2</sub>	2,2	2,1	2,6	777	0,3	30	N <sub>2</sub>	0,9	1,65	0,6	320	0,25

**Задача 2.10.** Визначити стан і калоричні параметри (внутрішня енергія  $u$ , ентальпія  $i$  і ентропія  $s$ ) водяної пари при  $p$ , МПа і  $t$ , °C.

Вихідні дані

№ вар.	$p$ , МПа	$t$ , °C	№ вар.	$p$ , МПа	$t$ , °C	№ вар.	$p$ , МПа	$t$ , °C
1	0,4	360	11	9,0	560	21	1,6	340
2	0,8	340	12	13,0	360	22	2,0	560
3	1,0	400	13	17,0	420	23	2,5	360
4	1,2	320	14	22,0	440	24	3,0	560
5	1,6	420	15	1,5	480	25	5,0	340
6	2,0	400	16	3,0	500	26	7,0	340
7	2,5	440	17	0,4	560	27	9,0	360
8	3,0	400	18	0,8	480	28	13,0	500
9	5,0	500	19	1,0	540	29	17,0	480
10	7,0	540	20	1,2	540	30	22,0	560

**Задача 2.11.** Водяна пара з абсолютним тиском  $p_1$ , МПа і ступеню сухості  $x_1$  нагрівається при постійному тиску і її температура підвищується до  $t_2$ , °C. Визначити кількість теплоти, яка підводиться до  $m$ , кг пари і зміну її внутрішньої енергії. Розрахунки зробити за допомогою таблиць водяної пари.

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Вихідні данні

№ Вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг	№ Вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг
1	0,4	0,71	320	1,5	16	0,8	0,70	400	4,3
2	0,8	0,73	340	2,0	17	1,0	0,72	360	4,1
3	1,0	0,75	360	2,2	18	1,2	0,74	340	3,9
4	1,2	0,77	400	2,4	19	1,6	0,76	320	3,7
5	1,6	0,79	420	2,6	20	2,0	0,78	340	3,5
6	2,0	0,81	440	2,8	21	2,5	0,80	360	3,3
7	2,5	0,83	480	3,0	22	3,0	0,82	400	3,1
8	3,0	0,85	500	3,2	3	5,0	0,84	420	2,9
9	5,0	0,97	540	3,4	24	7,0	0,86	440	2,7
10	7,0	0,89	560	3,6	25	9,0	0,88	480	2,5
11	9,0	0,91	540	3,8	26	13,0	0,90	500	2,3
12	13,0	0,93	500	4,0	27	17,2	0,92	540	2,1
13	17,0	0,95	480	4,2	28	22,0	0,94	560	1,9
14	22,0	0,97	440	4,4	29	1,2	0,80	500	1,7
15	0,4	0,68	420	4,5	30	3,0	0,92	360	1,4

**Задача 2.12.** Водяна пара отримує теплоту при постійному тиску  $p_1$ , МПа і ступені сухої  $x_1$ . При цьому вона нагрівається до температури  $t_2$ , °С. Визначити кількість теплоти, яку отримує  $m$ , кг водяної пари і зміну її внутрішньої енергії.

Розрахунки зробити за допомогою  $h - s$  - діаграми і показати на ній цей процес.

Вихідні дані

№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг	№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг
1	0,01	0,95	150	4,0	16	0,5	0,85	350	1,0
2	0,02	0,70	200	3,8	17	1,0	0,86	400	0,8
3	0,05	0,97	250	3,6	18	1,5	0,90	450	0,6
4	0,1	0,77	300	3,4	19	2,0	0,90	550	0,4
5	0,2	0,95	350	3,2	20	0,1	0,85	350	0,5
6	0,5	0,80	400	3,0	21	0,01	0,85	75	0,7
7	1,0	0,93	450	2,8	22	0,02	0,95	100	0,9
8	1,5	0,85	500	2,6	23	0,05	0,75	150	1,1
9	2	0,95	550	2,4	24	0,1	0,93	200	1,3
10	0,1	0,75	400	2,2	25	0,2	0,85	250	1,5
11	0,01	0,90	100	2,0	26	0,5	0,95	300	1,7
12	0,02	0,80	150	1,8	27	1,0	0,81	350	1,9

№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг	№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг
13	0,05	0,85	200	1,6	28	1,5	0,95	400	2,1
14	0,1	0,83	250	1,4	29	2,0	0,85	450	2,3
15	0,2	0,90	300	1,2	30	0,1	0,95	300	2,5

**Задача 2.13.** Початковий стан водяної пари характеризується наступними параметрами: тиск  $p_1$ , МПа і ступень сухості  $x_1$ . Яку кількість теплоти необхідно підвести до  $m$ , кг пари при постійному об'ємі, щоб температура її підвищилася до  $t_2$ . Задачу вирішити за допомогою  $i - s$  – діаграми і показати на ній цей процес.

Вихідні дані

№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг	№ вар.	$p_1$ , МПа	$x_1$	$t_2$ , °С	$m$ , кг
1	0,02	0,70	180	3,2	16	0,2	0,90	300	1,7
2	2,0	0,95	550	0,3	17	0,1	0,85	250	1,8
3	1,5	0,85	500	0,4	18	0,05	0,85	200	1,9
4	1,0	0,93	450	0,5	19	0,02	0,85	100	2,0
5	0,5	0,80	400	0,6	20	0,01	0,90	100	2,1
6	0,2	0,95	350	0,7	21	2,0	0,85	450	2,2
7	0,1	0,77	300	0,8	22	1,5	0,95	400	2,3
8	0,05	0,97	250	0,9	23	1,0	0,81	350	2,4
9	0,02	0,75	200	1,0	24	0,02	0,95	175	2,5
10	0,01	0,95	150	1,1	25	0,5	0,95	300	2,6
11	2,0	0,90	500	1,2	26	0,2	0,85	250	2,7
12	1,5	0,90	450	1,3	27	0,1	0,93	200	2,8
13	0,02	0,80	150	1,4	28	0,05	0,75	150	2,9
14	1,0	0,86	400	1,5	29	0,02	0,97	120	3,0
15	0,5	0,85	350	1,6	30	0,01	0,85	75	3,1

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

**Задача 2.14.** Водяна пара в кількості  $m$ , кг з початковими параметрами: тиск  $p_1$ , МПа і ступень сухості  $x_1$ , ізотермічно розширюється до  $p_2$ , МПа. Визначити кількість теплоти підведеної до пари, виконану роботу і зміну внутрішньої енергії, використовуючи  $h - s$  – діаграму. Побудувати цей процес в діаграмі.

Вихідні дані

№ вар.	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$x$	$p_2$ , МПа	№ вар.	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$x$	$p_2$ , МПа
1	0,5	0,5	0,75	0,01	16	2,0	11,0,0	0,90	0,02
2	0,6	1,0	0,95	0,05	17	2,1	0,02	0,85	0,007
3	0,7	0,3	0,90	0,1	18	2,2	0,5	0,80	0,02
4	0,8	0,2	0,85	0,02	19	2,3	0,01	0,85	0,003
5	0,9	1,5	0,80	0,2	20	2,4	0,2	0,75	0,01
6	1,0	0,1	0,70	0,01	21	2,5	0,01	0,90	0,005
7	1,1	2,0	0,95	0,1	22	2,6	0,5	0,85	0,05
8	1,2	0,05	0,70	0,005	23	2,7	0,02	0,90	0,005
9	1,3	3,0	0,90	0,1	24	2,8	0,1	0,95	0,01
10	1,4	0,02	0,70	0,005	25	2,9	0,05	0,85	0,02
11	1,5	0,01	0,75	0,005	26	3,0	1,5	0,90	0,2
12	1,6	2,0	0,80	0,02	27	3,1	0,1	0,85	0,02
13	1,7	0,02	0,80	0,01	28	3,2	2,0	0,90	0,1
14	1,8	1,5	0,85	0,1	29	3,3	0,2	0,90	0,05
15	1,9	0,05	0,75	0,01	30	3,4	0,02	0,95	0,01

**Задача 2.15.** Перегріта пара масою  $m$ , кг з початковими параметрами: тиск  $p_1$ , МПа і температура  $t_1$ , °С, адіабатично розширюється до  $p_2$ , МПа. Використовуючи  $h - s$  – діаграму водяної пари, визначити початкові параметри: питомий об'єм і ентальпію, кінцеві параметри: температуру, питомий об'єм і ступень сухості водяної пари, а також роботу і зміну внутрішньої енергії в процесі. Показати цей процес на  $h - s$  – діаграмі.

Вихідні дані

№ вар	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , МПа	№ вар	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , МПа
1	4,0	8	650	0,1	16	1,0	0,2	185	0,01
2	3,8	3	550	0,05	17	0,8	0,1	240	0,00275
3	3,6	2	500	0,02	18	0,6	8	650	0,005

№ вар	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , МПа	№ вар	$m$ , кг	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °С	$p_2$ , МПа
4	3,4	1,5	467	0,01	19	0,4	3	550	0,005
5	3,2	0,5	320	0,015	20	3,5	2	500	0,002
6	3,0	8	650	0,05	21	3,3	1	270	0,086
7	2,8	3	550	0,02	22	2,9	4	600	0,05
8	2,6	2	500	0,01	23	2,7	3	550	0,002
9	2,4	1,5	467	0,005	24	2,3	1,5	467	0,05
10	2,2	0,5	320	0,01	25	1,9	1	270	0,031
11	2,0	8	650	0,02	26	1,5	0,5	320	0,007
12	1,8	3	550	0,01	27	1,3	4	600	0,02
13	1,6	2	500	0,005	28	1,1	2	500	0,05
14	1,4	1	270	0,2	29	0,9	1,5	467	0,02
15	1,2	0,5	320	0,02	30	0,7	4	600	0,005

**Задача 2.16.** Визначити парціальний тиск водяної пари  $p_n$  і сухого повітря  $p_c$  в насиченому вологому повітрі при температурі  $t$ , °С і барометричному тиску  $p_6$ , мм.рт.ст.

Вихідні дані

№ вар	$t$ , °С	$p_6$ , мм.рт.ст.	№ вар	$t$ , °С	$p_6$ , мм.рт.ст.	№ вар	$t$ , °С	$p_6$ , мм.рт.ст.
1	3	730	11	13	755	21	23	746,8
2	4	730,5	12	14	758,5	22	24	751,3
3	5	735	13	15	760	23	25	754,4
4	6	733,5	14	16	763,5	24	26	757,2
5	7	740	15	17	765	25	27	760,3
6	8	742,5	16	18	767,5	26	28	762,4
7	9	745	17	19	770	27	29	764,5
8	10	746,5	18	20	771,4	28	30	765,8
9	11	750	19	21	742,4	29	31	766,3
10	12	752,5	20	22	737,3	30	32	767,9

**Задача 2.17.** Визначити ентальпію вологого повітря при температурі  $t$ , °С, відносній вологості  $\varphi$ , % і барометричному тиску  $p_6$ , мм.рт.ст.

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Вихідні дані

№ ва р.	t, оС	φ, %	p <sub>б</sub> , мм.рт.т.ст.	№ ва р.	t, оС	φ, %	p <sub>б</sub> , мм.рт.ст.	№ ва р.	t, оС	φ, %	p <sub>б</sub> , мм.рт.ст.
1	40	15	730	11	35	40	750	21	30	10	762
2	4	95	732	12	9	70	752	22	14	90	764
3	39	20	734	13	34	45	754	23	29	15	766
4	5	90	736	14	10	65	756	24	15	85	768
5	38	25	738	15	33	50	758	25	28	20	770
6	6	85	740	16	11	60	757	26	16	80	749
7	37	30	742	17	32	55	755	27	27	25	747
8	7	80	744	18	12	55	753	28	17	75	745
9	36	35	746	19	31	5	751	29	26	30	743
10	8	75	748	20	13	95	760	30	28	70	741

**Задача 2.18.** Температура повітря у виробничому приміщенні  $t$ , °С і відносна вологість повітря  $\varphi$ , %. Визначити, користуючись  $h - d$  – діаграмою, усі інші параметри вологого повітря, тобто вологовміст, ентальпію, парціальний тиск водяної пари, точку роси і температуру вологого термометра.

Вихідні дані

№ вар	t, °С	φ, %	№ вар	t, °С	φ, %	№ вар	t, °С	φ, %
1	2	85	11	22	75	21	33	20
2	4	80	12	24	70	22	34	15
3	6	70	13	25	60	23	35	10
4	8	60	14	26	55	24	3	90
5	10	50	15	27	50	25	7	80
6	12	60	16	28	45	26	9	70
7	14	40	17	29	40	27	11	60
8	16	30	18	30	35	28	13	50
9	18	25	19	31	30	29	15	40
10	20	75	20	32	25	30	17	30

**Задача 2.19.** Визначити масу сухої частини вологого повітря, якщо дано об'єм вологого повітря  $V$ , м<sup>3</sup> і його параметри: температура  $t$ , °С, відносна вологість  $\varphi$ , % і барометричний тиск  $p_b$ , мм.рт.ст. Знайти

також загальну масу вологого повітря і долю сухого повітря в загальній масі.

Вихідні дані

№ вар.	$V$ , м <sup>3</sup>	$t$ , °C	$\varphi$ , %	$p_6$ , мм.рт.ст	№ вар.	$V_B$ , м <sup>3</sup>	$t$ , °C	$\varphi$ , %	$p_6$ , мм.рт.ст
1	2300	0	90	730	16	5970	37	50	769
2	6800	2	80	735	17	3080	30	80	767
3	2450	5	70	740	18	5830	28	20	734
4	6750	7	60	745	19	3140	24	40	741
5	2520	10	50	750	20	5720	24	80	744
6	6660	15	40	755	21	3260	16	25	746
7	2580	20	30	760	22	5650	14	20	748
8	6410	25	20	765	23	3370	12	10	751
9	2620	30	10	770	24	5530	21	45	753
10	6320	15	10	732	25	3480	31	50	755
11	2740	17	15	737	26	5410	32	80	754
12	6240	13	20	748	27	3590	33	65	737
13	2870	12	25	753	28	5100	34	55	743
14	6110	10	35	757	29	3960	35	15	745
15	2920	40	40	761	30	4500	39	10	749

**Задача 2.20.** Визначити параметри суміші повітря (температуру  $t_c$ , відносну вологість  $\varphi_c$ , ентальпію  $i_c$  і вологовміст  $d_c$ ), якщо змішуються  $m_1$ , кг повітря з параметрами  $t_1$ , °C і  $\varphi_1$ , % із  $m_2$ , кг повітря з параметрами  $t_2$ , °C і  $\varphi_2$ , %. Розрахунки зробити за допомогою  $h - d$  - діаграми і аналітичним методом.

Вихідні дані

№ Ва р.	$m_1$ , кг	$t_1$ , °C	$\varphi_1$ , %	$m_2$ , кг	$t_2$ , °C	$\varphi_2$ , %	№ Ва р.	$m_1$ , кг	$t_1$ , °C	$\varphi_1$ , %	$m_2$ , кг	$t_2$ , °C	$\varphi_2$ , %
1	500 0	10	40	100 0	31	60	16	500 0	15	10	125 0	15	90
2	320 0	10	40	800	36	40	17	345 0	17	80	115 0	40, 8	20
3	210 0	10	40	700	41	26, 4	18	330 0	26	90	550	49, 5	10
4	360 0	10	40	600	44	20	19	325 0	22	20	650	37	70
5	250 0	5	10	500	44	10	20	300 0	11	90	750	29	30

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

№ Ва р.	$m_1$ , кг	$t_1$ , °C	$\varphi_1$ , %	$m_2$ , кг	$t_2$ , °C	$\varphi_2$ , %.	№ Ва р.	$m_1$ , кг	$t_1$ , °C	$\varphi_1$ , %	$m_2$ , кг	$t_2$ , °C	$\varphi_2$ , %.
6	160 0	5	10	400	42	15	21	285 0	8	100	950	43	40
7	150 0	5	10	500	35, 8	20	22	340 0	16	20	850	16	16
8	240 0	5	10	600	38	27	23	525 0	26	90	105 0	39, 5	30
9	350 0	5	10	700	34	40	24	690 0	15	30	115 0	42	30
10	480 0	5	10	800	39	50	25	625 0	2	80	125 0	40	30
11	360 0	5	10	120 0	37	80	26	540 0	18, 7	90	135 0	45, 6	20
12	440 0	15	48	110 0	38, 7	10	27	435 0	5	50	145 0	41	30
13	650 0	12, 5	70	130 0	31, 7	70	28	488 0	9	30	122 0	36	60
14	840 0	16	90	140 0	41, 3	30	29	670 0	9,5	100	134 0	49, 7	10
15	750 0	26, 3	10	150 0	25	70	30	522 0	33	10	870	27	80



# ДОДАТОК

Таблиця 1

Співвідношення фізичних величин в різних системах одиниць

Величина	Система МКГСС		СІ
	Одиниця величини	Позначення	
Основні і похідні одиниці			
Довжина	метр	м	1 м
	кілограм-сила	кгс	9,81 Н
Час	секунда	с	1 с
Швидкість	метр в секунду	м/с	1 м/с
Прискорення	метр на секунду в квадраті	м/с <sup>2</sup>	1 м/с <sup>2</sup>
Кутова швидкість	радіан в секунду	1/с	1 с
Маса	кілограм-сила-секунда в квадраті на метр	кгс · с <sup>2</sup> /м	9,81 кг
Густина	кілограм-сила-секунда в квадраті на метр в четвертій степені	кгс · с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>	9,81 кг/м <sup>3</sup>
Робота	кілограм-сила-метр	кгс · м	9,81 Дж
	кілограм-сила-метр на секунду	кгс · м/с	9,81 Вт
Динамічний коефіцієнт в'язкості	кілограм-сила-секунда на квадратний метр	кгс · с/м <sup>2</sup>	9,81 Н · с/м <sup>2</sup>
Кінематичний коефіцієнт в'язкості	квадратний метр на секунду	м <sup>2</sup> /с	1 м <sup>2</sup> /с
Тиск	кілограм-сила на квадратний метр	кгс/м <sup>2</sup>	9,81 Н/м <sup>2</sup> (Па)
Позасистемні одиниці			

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Величина	Система МКГСС		СІ
	Одиниця величини	Позначення	
Основні і похідні одиниці			
	технічна атмосфера міліметр ртутного стовпа міліметр водяного стовпа бар	ат (кгс/см <sup>2</sup> ) мм. рт. ст. мм. вод. ст. бар	9,81 · 10 <sup>4</sup> Па 133,3 2 Па 9,81 Па 10 <sup>5</sup> Па
Динамічний коефіцієнт в'язкості	пуаз	П	0,1 П · с/м <sup>2</sup>
Кінематичний коефіцієнт в'язкості	стокс	Ст	10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с

Таблиця 2

Фізико-технічні властивості криогенних речовин

Найменування властивості	Азот (N <sub>2</sub> )	Кисень (O <sub>2</sub> )	Аргон (Ar)	Неон (Ne)	Водень (H <sub>2</sub> )	Гелій (He <sup>4</sup> )	Криптон (Kr)	Ксенон (Xe)	Повітря
Молекулярна маса, кг/кмоль	28,02	32,0	39,94	20,183	2,016	4,003	83,80	131,30	28,96
Газова стала (шпома) R, Дж	296,75	259,88	208,5	411,7	4124,3	2079	100,3	63,84	287
Густина ρ, кг/м <sup>3</sup> : газу при 0°С і 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па	1,252	1,430	1,785	0,9004	0,0899	0,1785	3,745	5,85	1,293
насиченої пари, тКН									
рідини, тКН	4,54	4,48	5,785	9,55	1,3	16,38	8,0	13,6	3,23
твердої фази, тТ	808	1136	1390	1206	70,87	124,8	2400	3060	877
Точка кипіння T <sub>кип.</sub> , К: p = 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па p = 10 <sup>5</sup> Па	947	1370	1624	1442	86,64	380	2900	3640	—
Критична точка: температура T <sub>кр.</sub> , К	77,35 77,24	90,18 90,05	87,29 87,17	27,09 27,04	20,27 20,22	4,215 4,20	119,79 119,6	165,02 164,8	78,981,7 78,7881, 63

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Найменування властивості	Азот (N <sub>2</sub> )	Кисень (O <sub>2</sub> )	Аргон (Ar)	Неон (Ne)	Водень (H <sub>2</sub> )	Гелій (He <sup>4</sup> )	Криптон (Kr)	Ксенон (Xe)	Повітря
тиск P <sub>пр.</sub> · 10 <sup>3</sup> Па Густина ρ <sub>пр.</sub> , кг/м <sup>3</sup>	126,25 33,96 304	154,77 50,87 423	150,86 48,98 535,6	44,40 26,6 483	32,98 12,91 31,45	5,199 2,29 69,0	209,4 55,1 909	289,75 58,8 1105	132,55 37,69 313
Потрійна точка: температура T <sub>тр.</sub> К	63,15 12,53	54,35 0,150	83,78 68,76	25,54 43,4	13,81 7,040	λ-тр. при 2,17К	115,76 73,6	161,37 81,6	64/60 12,3/7,12
Температура фазового переходу, кДж/кг: пароподібна, т. <sub>пл.</sub>	197,6 25,8	212,3 13,90	159,6 29,5	86,1 16,8	445,9 58,2	20,2 5,7 при 3,5 К	107,5 19,5	96,2 17,6	205 —
Температура плавлення, т. <sub>пл.</sub>	1,041	0,916	0,522	1,035	14,3	5,275	0,251	0,159	1,006
Теплоємність c <sub>p</sub> , кДж/(кг · К): газу при 0 °С і 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па	1,190	1,03	0,57	1,8	12,15	8,35	—	—	1,53

Найменування властивості	Азот (N <sub>2</sub> )	Кисень (O <sub>2</sub> )	Аргон (Ar)	Неон (Ne)	Водень (H <sub>2</sub> )	Гелій (He <sup>4</sup> )	Криптон (Kr)	Ксенон (Xe)	Повітря
нагненої пари, $\lambda_{\text{ж}}$ рідини, $\lambda_{\text{р}}$ твердої фази, $\lambda_{\text{т}}$ Показник адиабати $k = c_p/c_v$	1,96 1,67 1,40	1,63 1,42 1,40	1,001 0,84 1,68	1,25 1,25 1,68	9,67 2,93 1,07(12К) 1,407	5,19 — 1,66	0,528 0,42 1,67	3,41 — 1,70	1,865 — 1,40
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м · К): газу при 0°С і 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па нагненої пари, $\lambda_{\text{ж}}$ рідини, $\lambda_{\text{р}}$ твердої фази, $\lambda_{\text{т}}$ В'язкість динамічна $\mu$ , МН · с/м <sup>2</sup> : газу при 0°С і 1,01 · 10 <sup>5</sup> Па	0,02396 0,00761 0,136 — 16,58 5,33 147	0,02443 0,0082 0,1505 — 19,19 7,55 189	0,01635 0,006 0,127 (0,280) 21,01 7,1 280	0,0443 0,0046 0,115 0,300 29,7 4,5 128	0,159 0,0152 0,119 — 8,42 1,12 13,27	0,1501 0,00648 0,0271 — 19,53 1,27 3,0	0,084 0,00395 0,089 0,530 23,2 10,3 373	0,00525 0,00331 0,074 — 21,0 13,6 461	0,02417 0,00735 0,149 — 17,11 5,6 185

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Найменування властивості	Азот (N <sub>2</sub> )	Кисень (O <sub>2</sub> )	Аргон (Ar)	Неон (Ne)	Водень (H <sub>2</sub> )	Гелій (He <sup>4</sup> )	Криптон (Kr)	Ксенон (Xe)	Повітря
насиченої пари, тКН	291(64 К)				3,1(3,8 К)				
рідини, тКН	8,87	13,5	12,54	4,85	1,93	0,09	—	—	—
Поверхневий натяг, тКН σ · 10 <sup>3</sup> Н/м <sup>2</sup>	1,433	1,483	1,520	—	1,229	1,048(4,2К) 1,055(2,6К)	—	—	—
Діелектрична стала рідини ε, тКН									

*Примітка, тКН — точка кипіння при нормальному (1,013 · 10<sup>5</sup> Па) тиску; і.і. — потрібна точка*

Таблиця 3  
Середня молярна теплоємність газів при постійному тиску  $C_{pm}$ ,  
кДж/(кмоль\*К)

$t, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2$	Повітря (сухе абсолютно)
0	29,274	29,019	29,123	35,860	33,499	28,62	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,721	28,93	29,152
200	29,931	29,132	29,303	39,059	34,188	29,07	29,299
300	30,400	29,287	29,517	41,755	34,575	29,12	29,521
400	30,878	29,500	29,789	43,250	35,090	29,19	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,630	29,25	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,753	36,195	29,32	30,405
700	32,150	30,341	30,752	46,813	36,789	29,41	30,723
800	32,502	30,635	31,070	47,763	37,392	29,52	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	29,65	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	29,79	31,59
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	29,94	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,740	39,825	30,11	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	30,29	32,343

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

<b>t, °C</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>Повітря (сухе абсолютно)</b>
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	30,42	32,565
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	30,65	32,774
1600	34,474	32,565	32,051	52,800	42,056	30,83	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	31,01	33,151
1800	34,834	32,917	33,402	53,604	43,070	31,10	33,319
1900	35,006	33,080	33,561	53,959	43,539	31,37	33,48
2000	35,169	33,231	33,708	54,290	43,995	31,55	33,64



Таблиця 4

Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення [11, 34]

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$h'', \text{кДж/кг}$	$g, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\Delta \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,0061	0,00485	2501,0	2501,0	1,86	1,61	1790	8,75	1805	1,02
10	0,0123	0,00940	2519,4	2477,4	1,86	1,69	968	9,15	973,7	1,00
20	0,0234	0,0173	2537,7	2453,8	1,86	1,76	548	9,50	549,4	1,00
30	0,0424	0,0304	2555,9	2430,2	1,87	1,84	268	9,80	266,7	1,00
40	0,0737	0,0512	2574,0	2406,5	1,88	1,93	201	10,30	201,4	1,00
50	0,1234	0,0830	2591,8	2382,5	1,91	2,01	127	10,75	129,4	1,02
60	0,1992	0,130	2609,5	2358,4	1,93	2,10	83,5	11,20	86,0	1,03
70	0,3116	0,198	2626,8	2333,8	1,96	2,20	56,8	11,65	58,8	1,04
80	0,4736	0,293	2643,8	2308,9	1,98	2,30	39,6	11,85	41,1	1,04

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$h'', \text{кДж/кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\Delta \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	<b>Рг</b>
90	0,7011	0,423	2660,3	2283,4	2,02	2,35	27,4	11,90	29,4	1,07
100	1,013	0,597	2676,3	2257,2	2,14	2,37	18,58	12,27	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,18	2,49	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,21	2,59	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,26	2,69	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,32	2,79	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,40	2,88	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,48	3,01	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,58	3,13	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,71	3,27	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,86	3,42	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,02	3,55	1,492	15,99	2,03	1,36

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho'',$ кг/м <sup>3</sup>	$h'',$ кДж/кг	$\Gamma,$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\Delta \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6,$ Н·с/м <sup>2</sup>	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\text{Pr}$
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,20	3,72	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,41	3,90	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,63	4,09	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,0	1766	3,88	4,29	0,658	17,75	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801	1716	4,16	4,52	0,544	18,24	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796	1661	4,47	4,80	0,453	18,83	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2790	1604	4,82	5,12	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2780	1543	5,23	5,49	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766	1476	5,69	5,83	0,261	20,59	0,526	2,01

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$h'', \text{кДж/кг}$	$\Gamma, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\Delta \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	<b>Рг.</b>
300	85,92	46,21	2749	1404	6,28	6,27	0,216	21,28	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,12	6,84	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,21	7,51	0,141	22,85	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,88	8,26	0,108	23,93	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,30	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,70	0,0581	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481	720	23,03	12,79	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2331	438	56,52	17,10	0,0150	33,73	0,166	11,10

Таблиця 5

Перегріта водяна пара (скорочена таблиця)

P, МПа	Пара- метри	Величина параметрів										
		320°C	340°C	360°C	400°C	420°C	440°C	460°C	500°C	540°C	560°C	
0,4	v	0,6783	0,7021	0,7257	0,7726	0,796	0,8193	0,866	0,8893	0,9357	0,959	
	i	3107,8	3148,9	3190,2	3273,2	3315,2	3357,3	3442	3484,7	3572	3615	
	s	7,6372	9,7054	7,7717	7,8991	7,9603	8,0201	8,1357	8,1917	8,099	8,352	
0,8	v	0,3363	0,3484	0,3604	0,3842	0,3961	0,4079	0,4315	0,4432	0,4667	0,4784	
	i	3098,7	3140,7	3182,7	3267,2	3309,5	3352	3437,4	3480,5	3567,2	3610,9	
	s	7,3059	7,3756	7,443	7,5724	7,6344	7,6947	7,8113	7,8677	7,9771	80,302	
1,0	v	0,2678	0,2776	0,2873	0,3066	0,3161	0,3256	0,3446	0,354	0,3729	0,3823	
	i	3094	3136,5	3178,9	3264	3306,6	3349,3	3435,1	3478,3	3565,3	3609,1	
	s	7,1971	7,2675	7,3356	7,4606	7,5288	7,589	7,7061	7,7627	7,8424	7,9256	
1,2	v	0,2222	0,2304	0,2386	0,2548	0,2628	0,2708	0,2867	0,2946	0,3103	0,3182	
	i	3089,3	3132,2	3175,1	3260,9	3303,7	3346,6	3432,8	3476,1	3563,4	3607,3	
	s	7,107	7,1782	7,241	7,3784	7,4411	7,5021	7,6197	7,6765	7,7865	7,8399	
1,6	v	0,1651	0,1714	0,1777	0,1900	0,1961	0,2022	0,2142	0,2202	0,2322	0,238	
	i	3079,7	3123,6	3167,4	3254,5	3297,9	3341,2	3428,1	3471,8	3559,6	3603,7	
	s	6,9621	6,035	7,1051	7,2386	7,302	7,3637	7,4823	7,5395	7,6502	7,7039	
2,0	v	0,1308	0,1360	0,1411	0,1512	0,1561	0,1610	0,1708	0,1756	0,1852	0,1900	
	i	3069,8	3114,9	3159,5	248,1	3291,9	3335,8	3427,4	3467,4	3555,8	3600,2	
	s	6,8466	6,9212	6,9929	7,1285	7,1927	7,255	7,3747	7,4323	7,5437	7,5977	
2,5	v	0,1033	0,1076	0,1119	0,1201	0,1241	0,1281	0,136	0,1399	0,1477	0,1516	
	i	3057,1	3103,6	3149,6	3239,9	3284,5	3328,9	3417,5	34679	3551,0	3595,7	
	s	6,7273	6,8044	6,8781	7,0165	7,0817	7,1449	7,2659	8,324	7,4363	7,4905	

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

P, МПа	Пара-метр	Величина параметрів										
		320°C	340°C	360°C	400°C	420°C	440°C	460°C	500°C	540°C	560°C	
3,0	v		0,0887	0,09232	0,09933	0,10276	0,1061	0,1128	0,1161	0,1227	0,1259	
	i		3092,1	3139,3	3231,6	3276,9	3221,9	3411,6	3456,4	3546,1	3591,1	
	s		6,7060	6,7818	6,9231	6,9894	7,0575	7,1758	7,2345	7,3477	7,4024	
5,0	v		0,0507	0,05316	0,0578	0,06002	0,0622	0,06644	0,06853	0,07262	0,07464	
	i		3042,2	3095,9	3196,9	3245,4	3293,2	3387,2	3433,8	3526,5	3572,8	
	s		6,4077	6,4939	6,6486	6,7196	6,7875	6,9158	6,9768	7,0938	7,1501	
7,0	v		0,0342	0,03623	0,03992	0,04165	0,04332	0,04654	0,0481	0,05116	0,05266	
	i		2985,5	3047,6	3159,7	3212,1	3263,0	3361,9	3410,5	3506,4	3554,1	
	s		6,1797	6,2793	6,4511	6,5278	6,6002	6,7352	6,7988	6,9198	6,9778	
9,0	v		0,02484	0,02669	0,02993	0,03139	0,03280	0,03546	0,03675	0,03923	0,04044	
	i		2919,6	2993,2	3119,7	3176,7	3231,2	3335,7	3386,4	3485,9	3535,0	
	s		5,9771	6,0953	6,2891	6,3725	6,4502	6,5927	6,6592	6,7849	6,8444	
13,0	v		0,01402	0,01604	0,01901	0,02025	0,02139	0,02448	0,02448	0,02637	0,02727	
	i		2738,8	2858,9	3029,3	3098,6	3162,6	3280,4	3336,1	3443,4	3495,8	
	s		5,5589	5,7518	6,0132	6,1142	6,2057	6,3666	6,4395	6,5749	6,6386	
17,0	v		0,009616	0,01303	0,01422	0,01527	0,01527	0,01797	0,01797	0,01954	0,02029	
	i		2653,6	2920,2	3008,6	3085,7	3220,8	3282,6	3399,1	3455,1	3495,8	
	s		5,3475	5,7575	5,8870	5,99682	6,1811	6,2620	6,4090	6,4770	6,4770	
22,0	v				0,00826	0,00959	0,01064	0,01237	0,01312	0,01449	0,01513	
	i				2,739,7	2,872,8	2,975,4	3,139,7	3,210,8	3,341,0	3,402,1	
	s				5,4114	5,6064	7,7523	5,9767	6,0700	6,2342	6,3085	
24,0	v				0,00674	0,008205	0,00929	0,01101	0,01174	0,01305	0,01366	
	i				2,642,0	2,808,2	2,925,7	3,104,9	3,180,5	3,316,9	3,380,2	
	s				5,2439	5,4876	5,6547	5,8096	5,9987	6,1708	6,2478	

P, МПа	Пара- метри	Величина параметрів											
		320°C	340°C	360°C	400°C	420°C	440°C	460°C	500°C	540°C	560°C		
30,0	<i>v</i>				0,00281	0,004919	0,006221	0,00798	0,008679	0,009889			0,01043
	<i>i</i>				2159,1	2557,2	2751,7	2992,2	3083,0	3241,7			3312,6
	<i>s</i>				4,4854	5,0694	5,3464	5,6751	5,7954	5,9945			6,0806

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Таблиця 6

Суха насичена пара і вода на кривій насичення (по пісках)

$p, \text{ МПа}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$v', \text{ м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{ м}^3/\text{кг}$	$i', \text{ кДж/кг}$	$i'', \text{ кДж/кг}$	$i''_f, \text{ кДж/кг}$	$r', \text{ кДж/кг}$	$s', \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$s'', \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749	
0,0025	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	2470,1	0,1952	8,8268	
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2159,7	0,2603	8,7227	
0,0025	12,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424	
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784	
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	2438,1	0,3912	8,5222	
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737	
0,0050	32,89	0,0010054	28,23	137,79	2560,9	2423,1	0,764	8,3943	



$P, \text{МПа}$	$t, \text{°C}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$i''_s, \text{кДж/кг}$	$i''_s, \text{кДж/кг}$	$i''_s, \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/(кг*К)}$	$s'', \text{кДж/(кг*К)}$
0,0060	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297		
0,0070	39,02	0,0010075	20,56	163,39	2571,8	2408,4	0,5588	8,2734		
0,0080	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263		
0,0090	43,78	0,0010094	16,22	183,31	2580,5	2397,2	0,6222	8,1854		
0,0100	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,91	2392,1	0,6496	8,1494		
0,012	49,44	0,0010118	12,37	206,96	2590,6	2383,7	0,6966	8,0850		
0,014	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305		
0,016	55,34	0,0010146	9,437	231,63	2601,1	2369,5	0,7722	7,9852		
0,018	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445		

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

$p$ , МПа	$t$ , °С	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r'$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг*К)	$s''$ , кДж/(кг*К)
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075		
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300		
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673		
0,040	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710		
0,050	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923		
0,060	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313		
0,070	89,95	0,0010359	2,367	376,79	2659,8	2283,1	1,1920	7,4799		
0,080	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342		
0,090	96,71	0,0010409	1,871	405,19	2670,2	2265,1	1,2699	7,3936		
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579		

$p$ , МПа	$t$ , °С	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r'$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг*К)	$s''$ , кДж/(кг*К)
0,12	104,80	0,0010472	1,430	439,34	2683,6	2243,6	1,4610	7,2972
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2790,1	2231,7	1,4109	7,2460
0,16	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2796,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,18	116,93	0,0010575	0,9782	490,68	2706,8	2211,1	1,4945	7,1628
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2707,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,22	123,27	0,0010633	0,8103	517,7	2711,0	2193,3	1,5632	7,0953
0,24	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658
0,26	128,73	0,0010684	0,6929	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,28	131,20	0,0010709	0,6463	551,7	2722,3	2170,7	1,6471	7,0152

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

$p$ , МПа	$t$ , °С	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$i''_g$ , кДж/кг	$i''_f$ , кДж/кг	$i''_{fg}$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг*К)	$s''$ , кДж/(кг*К)
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922		
0,35	138,87	0,0010787	0,5241	584,4	2732,3	2147,9	1,7276	6,9404		
0,40	143,62	0,0010836	0,4623	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969		
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	623,0	2743,9	2120,9	1,8204	6,8572		
0,50	151,84	0,0010927	0,3479	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221		
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609		

Таблиця 7

Насичена пара і вода на лінії насичення (по температурі)

$t_n, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r', \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$s'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0006108	0,0010002	206,321	0	2501,0	2501,0	0	9,1565
10	0,0012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
20	0,0023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,6	0,2963	8,6674
30	0,0042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
40	0,0073749	0,0010078	19,548	167,45	2574	2406,5	0,5721	8,2576

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

---

$t_n, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r', \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
50	0,0012335	0,0010121	19,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771
60	0,019919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
70	0,031161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
80	0,047359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,070108	0,00110361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
100	0,101325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
120	0,19854	0,0010606	0,89202	503,07	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310

$t_n, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$z'', \text{кДж/кг}$	$r', \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$s'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
140	0,36136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0		2144,9	1,7390	6,9307
160	0,61804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7		2082,2	1,9425	6,7498
180	1,0027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1		2014,0	2,1393	6,5838
200	1,5551	0,00115665	0,12714	852,4	2791,4		1939,0	2,3307	6,4289
220	2,3201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9		1856,2	2,5178	6,2819
240	3,3480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6		1764,0	2,7021	6,1397

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Таблиця 8

Основні фізичні характеристики повітря при тиску 760 мм рт. ст.

Температура повітря, °C	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°C утворює при t°C об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°C утворює при 0°C об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>H</sub> мм рт. ст.	R' <sub>П</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
-20	1,396	0,927	1,079	0,94	12,6	0,0011	0,0008	0,77
-19	1,39	0,93	1,075	1,015	13,8	0,0012	0,0008	0,86
-18	1,385	0,934	1,071	1,116	15,17	0,0013	0,0009	0,93
-17	1,379	0,938	1,066	1,207	16,41	0,0014	0,001	1,04
-16	1,374	0,941	1,062	1,315	17,78	0,0015	0,0011	1,11
-15	1,368	0,945	1,058	1,429	19,03	0,0016	0,0012	1,2
-14	1,363	0,949	1,054	1,551	21,06	0,0017	0,0013	1,3
-13	1,358	0,952	1,05	1,684	22,84	0,0019	0,0014	1,4
-12	1,353	0,956	1,046	1,826	24,89	0,002	0,0015	1,5



Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря		Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні			
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>н</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
-11	1,348	0,959	1,042	1,979	26,95	0,0022	0,0016	1,65
-10	1,342	0,963	1,038	2,143	28,45	0,0023	0,0017	1,79
-9	1,337	0,967	1,034	2,32	30,82	0,0025	0,0019	1,93
-8	1,332	0,971	1,03	2,509	33,38	0,0027	0,002	2,08
-7	1,327	0,974	1,026	2,712	36,14	0,0029	0,0022	2,25
-6	1,322	0,978	1,023	2,928	39,1	0,0031	0,0024	2,4
-5	1,317	0,982	1,019	3,158	42,32	0,0034	0,0026	2,6
-4	1,312	0,985	1,015	3,404	45,79	0,0036	0,0028	2,8
-3	1,308	0,989	1,011	3,669	49,54	0,0039	0,003	3,1
-2	1,303	0,993	1,007	3,952	53,58	0,0042	0,0032	3,28
-1	1,298	0,996	1,004	4,256	57,96	0,0045	0,0035	3,58
0	1,293	1	1	4,579	62,54	0,0049	0,0038	3,8

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°С утворює при 0°С об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>п</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
+1	1,288	1,004	0,996	4,926	67,16	0,0052	0,0041	4,15
+2	1,284	1,007	0,993	5,294	72,08	0,0056	0,0043	4,48
+3	1,279	1,011	0,989	5,685	77,31	0,006	0,0047	4,77
+4	1,275	1,015	0,986	6,101	82,89	0,0064	0,005	5,1
+5	1,27	1,018	0,982	6,534	88,83	0,0068	0,0054	5,4
+6	1,265	1,022	0,979	7,013	95,14	0,0073	0,0057	5,78
+7	1,261	1,026	0,975	7,513	101,85	0,0077	0,0061	6,21
+8	1,256	1,029	0,972	8,045	108,99	0,0083	0,0066	6,65
+9	1,252	1,033	0,968	8,609	116,56	0,0088	0,007	7,13
+10	1,248	1,037	0,965	9,209	124,6	0,0094	0,0075	7,64
+11	1,243	1,04	0,961	9,844	132,71	0,01	0,008	8,15

Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°С утворює об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>п</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
+12	1,239	1,044	0,958	10,518	142,16	0,0107	0,0086	8,75
+13	1,235	1,048	0,955	11,231	151,75	0,0113	0,0092	9,35
+14	1,23	1,051	0,951	11,987	161,89	0,0121	0,0098	9,97
+15	1,226	1,055	0,948	12,788	172,64	0,0128	0,0105	10,62
+16	1,222	1,059	0,942	13,634	184,02	0,0136	0,0112	11,4
+17	1,217	1,062	0,941	14,53	196,05	0,0145	0,0119	12,11
+18	1,213	1,066	0,938	15,477	208,78	0,0154	0,0127	12,93
+19	1,209	1,070	0,935	16,477	222,22	0,0163	0,0135	13,80
+20	1,205	1,073	0,932	17,533	236,43	0,0173	0,0144	14,71
+21	1,201	1,077	0,929	18,650	251,44	0,0183	0,0153	15,60
+22	1,197	1,081	0,925	19,827	267,26	0,0194	0,0163	16,80
+23	1,193	1,084	0,922	21,068	283,97	0,0206	0,0173	17,70

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°С утворює при 0°С об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>п</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
+24	1,189	1,088	0,919	22,377	301,59	0,0218	0,0184	18,81
+25	1,185	1,092	0,916	23,756	320,16	0,0230	0,0195	20,10
+26	1,181	1,095	0,913	25,209	339,71	0,0244	0,0207	21,40
+27	1,177	1,099	0,910	26,739	360,34	0,0258	0,0220	22,65
+28	1,173	1,103	0,907	28,349	382,08	0,0272	0,0234	24,00
+29	1,169	1,106	0,904	30,043	404,87	0,0288	0,0248	25,60
+30	1,165	1,110	0,901	31,824	428,86	0,0304	0,0263	27,23
+31	1,161	1,114	0,899	33,965	454,15	0,0320	0,0278	28,80
+32	1,157	1,117	0,895	35,663	480,71	0,0338	0,0295	30,61
+33	1,154	1,121	0,892	37,729	508,60	0,0357	0,0312	32,50

Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°С утворює об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>п</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
+34	1,150	1,125	0,889	39,898	537,87	0,0376	0,0331	34,43
+35	1,146	1,128	0,886	42,175	568,64	0,0396	0,0350	36,63
+36	1,142	1,132	0,884	44,563	600,91	0,0417	0,0370	38,08
+37	1,139	1,136	0,881	47,067	607,57	0,0439	0,0392	41,10
+38	1,135	1,139	0,878	49,692	670,26	0,0462	0,0414	43,55
+39	1,132	1,147	0,875	52,442	707,47	0,0486	0,0438	46,10
+40	1,128	1,148	0,872	55,324	746,45	0,0511	0,0463	49,00
+41	1,124	1,150	0,869	58,340	787,29	0,0538	0,0489	51,70
+42	1,121	1,154	0,867	61,500	83,04	0,0565	0,0516	54,80
+43	1,117	1,158	0,864	64,800	874,78	0,0594	0,0545	58,00
+44	1,114	1,161	0,861	68,260	921,61	0,0623	0,0575	61,31
+45	1,110	1,165	0,858	71,880	970,56	0,0654	0,0607	65,26

**Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з курсу «Основи термодинаміки, теплотехніки та гідрогазодинаміки (розділ «Технічна термодинаміка»)»**

Температура повітря, °С	1 м <sup>3</sup> сухого повітря			Парціальний тиск насиченої водяної пари		Вміст водяної пари при повному насиченні		
	маса, кг	взятий при 0°С утворює при t°С об'єм, м <sup>3</sup>	взятий при t°С утворює при 0°С об'єм, м <sup>3</sup>	R <sub>п</sub> мм рт. ст.	R' <sub>п</sub> кгс/м <sup>2</sup>	в 1 м <sup>3</sup> пароповітряної суміші, кг	в 1 кг пароповітряної суміші, кг	в 1 кг сухого повітря, г
+46	1,107	1,169	0,856	75,650	1021,77	0,0687	0,0640	68,91
+47	1,103	1,172	0,853	79,600	1075,27	0,0720	0,0675	72,80
+48	1,100	1,176	0,850	83,710	1131,16	0,0756	0,0711	77,00
+49	1,096	1,180	0,848	88,020	1189,55	0,0792	0,0750	81,51
+50	1,093	1,183	0,845	92,510	1250,50	0,0831	0,0790	86,69

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Драганов Б. Х. Теплотехніка : підручник / Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний. – К. : «ІНКОС». 2005. – 504 с.
2. Дубровська В. В. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. / В. В. Дубровська, В.І. Шкляр. – К.: НТУУ «КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. – 152 с.
3. Константінов С. М. Теоретичні основи теплотехніки: підручник / С. М. Константінов, Є. М. Панов. – К. : «Золоті ворота», 2012. – 592 с.
4. Богданов С. Н. Холодильная техника. Свойства веществ: справочник / С. Н. Богданов, О. П. Иванов, А. В. Куприянова. – Л. : Машиностроение, 1976. – 168 с.
5. Цветков О. Б. Таблицы свойств холодильных агентов / О. Б. Цветков, Ю. А. Лаптев. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХ и БТ, 2013. – 52 с.
6. Рывкин С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник / С. Л. Рывкин, А. А. Александров. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.

*Навчальне видання*

**Олег Володимирович ЩЕСЮК,  
Олег Федорович ПРИЩЕПОВ,  
Володимир Миколайович ШЕНКЕВИЧ  
Дмитро Анатолійович ЛІСКОВ**

**Методичні вказівки до практичних занять і  
самостійної роботи з курсу «Основи  
термодинаміки, теплотехніки та  
гідрогазодинаміки  
(розділ «Технічна термодинаміка»)»**

*Методичні вказівки*

**Випуск 433**

---

Редактор *О. Михайлова*  
Комп'ютерна верстка *К. Гросу-Грабарчук*  
Друк *С. Волинець*. Фальцювальні-палітурні роботи *О. Мішалкіна*.

Підписано до друку 18.12.2023.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсет.  
Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.  
Ум. друк. арк. 4,4. Обл.-вид. арк. 1,8.  
Тираж 50 пр. Зам. № 6717.

Видавець і виготовлювач: ЧНУ ім. Петра Могили.  
54003, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10.  
Тел.: 8 (0512) 50–03–32, 8 (0512) 76–55–81, e-mail: rector@chmnu.edu.ua.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6124 від 05.04.2018.