

**Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Технічна термодинаміка»
(частина 1)
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» заочної форми навчання**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Технічна термодинаміка»
(частина 1)
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» заочної форми навчання

Вінниця
ВНТУ
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 23.04.2015 р.)

Рецензенти:

С. М. Василенко, доктор технічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни «Технічна термодинаміка» (частина 1) для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» заочної форми навчання / Уклад. О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 42 с.

В методичних вказівках викладено програму вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика»). Подано приклади розв'язання задач з дисципліни із властивостей ідеальних газів і газових сумішей, термодинамічних процесів ідеальних газів, термодинамічних процесів з водяною парою та термодинамічних процесів з вологим повітрям.

Методичні вказівки призначені для виконання контрольних робіт студентів заочної форми навчання та містять практичні завдання контрольних робіт і перелік контрольних запитань для самоперевірки.

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ.....	5
1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни.....	5
1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни.....	6
2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ.....	11
2.1 Властивості ідеальних газів і газових сумішей. Термодинамічні процеси ідеальних газів.....	11
2.2 Термодинамічні процеси з водяною парою.....	14
2.3 Термодинамічні процеси з вологим повітрям.....	17
3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ.....	21
4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	24
Рекомендована література.....	27
Додатки.....	28

ПЕРЕДМОВА

Однією з головних задач напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика» (спеціальності «Теплоенергетика») є задача раціонального використання енергоресурсів в теплотехнічних та теплоенергетичних установках, в основу роботи яких покладені певні термодинамічні цикли. Виходячи з цього, витікає необхідність застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Технічна термодинаміка», для вирішення конкретних інженерних задач в галузі теплотехнології та теплоенергетики за допомогою методів термодинамічного аналізу.

Поставлена мета може бути досягнута тільки при усвідомленому виконанні завдань студентами. Для виконання контрольних робіт студентами заочної форми навчання необхідно розуміти фізичну суть термодинамічних процесів, які складають задану схему теплотехнологічної або теплоенергетичної установки, володіти методами розрахунків процесів і циклів з використанням термодинамічних діаграм і таблиць стану, систематично працювати з рекомендованою літературою.

«Методичні вказівки...» передбачають завдання для виконання контрольних робіт для студентів заочної форми навчання: контрольні запитання для самоперевірки знань студентів за основними темами та варіанти практичних завдань для контрольних робіт. «Методичні вказівки...» містять необхідні додатки, що полегшує їх використання для вирішення практичних завдань. Це дозволить студентам працювати самостійно і творчо.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даних «Методичних вказівок...» до друку.

1 ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Програма вивчення навчальної дисципліни складена з урахуванням вимог освітньо-професійних програм підготовки бакалаврів напряму підготовки 6.050601 – «Теплоенергетика» за спеціальністю «Теплоенергетика».

Предметом вивчення навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» є фундаментальні газові закони, закони перетворення енергії в термодинамічних процесах ідеальних і реальних газів, циклах теплосилових і холодильних машин і комбінованих установках; методи розрахунків термодинамічних процесів і циклів та їх аналіз.

Міждисциплінарні зв'язки. Вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» базується на матеріалах таких дисциплін: «Вища математика», «Фізика». Дана дисципліна дозволяє поглибити вивчення таких дисциплін: «Тепломасообмін», «Холодильна техніка та технологія», «Джерела теплопостачання промислових підприємств».

Програма навчальної дисципліни складається з дванадцяти змістових модулів.

Змістовий модуль 1. Основні поняття технічної термодинаміки.

Змістовий модуль 2. Перший закон термодинаміки.

Змістовий модуль 3. Другий закон термодинаміки.

Змістовий модуль 4. Аналіз основних процесів ідеального газу.

Змістовий модуль 5. Реальні гази і процеси з реальними газами.

Змістовий модуль 6. Вологе повітря.

Змістовий модуль 7. Процеси течії газів і рідин.

Змістовий модуль 8. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок.

Змістовий модуль 9. Газосилові та комбіновані цикли та установки.

Змістовий модуль 10. Паросилові цикли та установки. Парогазові установки.

Змістовий модуль 11. Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.

Змістовий модуль 12. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.

1.1 Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» полягає в тому, щоб дати студентам знання з фундаментальних газових законів, законів перетворення енергії в термодинамічних процесах ідеальних і реальних газів, циклах теплосилових і холодильних машин і комбінова-

них установках; виробити у студентів навички розрахунків термодинамічних процесів і циклів та методів їх аналізу.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» є:

- формування у студентів навичок розрахунків та методів аналізу термодинамічних процесів ідеальних і реальних газів, циклів теплосилових і холодильних машин і комбінованих установок;
- навчання практичних способів роботи з діаграмами реальних газів;
- розуміння і засвоєння принципів роботи циклів теплосилових установок, холодильних машин і теплонасосних установок;
- отримання навичок аналізу одержаних рішень;
- одержання теоретичних навичок для вивчення дисциплін, які викладаються в подальшому.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми, студенти повинні:

- **знати:** основні газові закони, закони збереження енергії в термодинамічних системах; методику розрахунків термодинамічних процесів ідеальних і реальних газів, циклів та комбінованих установок;
- **вміти:** виконувати розрахунки процесів ідеальних та реальних газів за допомогою таблиць і відповідних діаграм, виконувати аналіз досконалості роботи окремих процесів і циклів з використанням довідкової і наукової літератури, аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами цих розрахунків, знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань, визначати раціональні схеми енергокомбінування.

1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Основні поняття технічної термодинаміки.

Тема 1. Термодинамічні системи. Параметри стану.

Види термодинамічних систем (ТДС) та їх особливості. Види енергії та форми енергообміну в ТДС. Стан ТДС. Параметри і функції стану. Термодинамічні процеси. Координати стану і потенціали взаємодії.

Тема 2. Види термодинамічних процесів. Поточні процеси. Рівняння стану робочого тіла.

Види термодинамічних процесів. Рівноважні та нерівноважні, оборотні та необоротні термодинамічні процеси. Поточні процеси та їх особливості. Робоче тіло. Ідеальний газ. Реальні гази. Рівняння стану робочого тіла. Рівняння стану ідеальних і реальних газів.

Тема 3. Форми енергообміну та їх взаємоперетворення в ТДС.

Внутрішня енергія і ентальпія. Робота. Робота зміни об'єму і зміни тиску. Теплота і теплоємності.

Змістовий модуль 2. Перший закон термодинаміки.

Тема 4. Закони збереження енергії в ТДС. Замкнені термодинамічні процеси і цикли. Цикл Карно.

Перший закон термодинаміки. Рівняння першого закону термодинаміки для закритих та відкритих ТДС. Теплоємність. Визначення теплоємності за молекулярно-кінетичною теорією та за допомогою таблиць.

Тема 5. Суміші ідеальних газів.

Основні означення. Властивості сумішей ідеальних газів. Калоричні параметри сумішей ідеальних газів. Теплоємність суміші газів.

Змістовий модуль 3. Другий закон термодинаміки.

Тема 6. Другий закон термодинаміки. Замкнені термодинамічні процеси і цикли. Цикл Карно.

Другий закон термодинаміки. Узагальнені рівняння термодинаміки. Перший і другий закони термодинаміки для замкнених процесів. Цикл Карно. Теорема Карно. Ентропія і другий закон термодинаміки. Ентропія і термодинамічна вірогідність. Термодинамічна шкала температур. Зміна ентропії в оборотних процесах. Зміна ентропії в необоротних процесах. Зміна ентропії в ustalених потоках речовини. Визначення зміни ентропії. Рівняння Гюї-Стодоли. T-s діаграма та її властивості. Втрата роботоспроможності робочого тіла. Задачі вивчення термодинамічних процесів.

Тема 7. Ефективність енергоперетворень в ТДС. Ексергетичний аналіз.

Обмеження перетворюваності енергії. Ексергія та анергія. Ексергетичні втрати і ексергетичні коефіцієнти корисної дії.

Змістовий модуль 4. Аналіз основних процесів ідеального газу.

Тема 8. Термодинамічні процеси ідеальних газів та їх аналіз.

Основні математичні методи. Рівняння Максвелла. Частинні похідні внутрішньої енергії та ентальпії. Диференціальні рівняння теплоємності. Алгоритм аналізу будь-якого термодинамічного процесу. Політропний процес, його основні співвідношення і властивості. Окремі випадки політропних процесів: ізотермічний, ізобарний, ізохорний, адіабатний процеси. Аналіз термодинамічних процесів.

Змістовий модуль 5. Реальні гази і процеси з реальними газами.

Тема 9. Термодинамічні властивості і процеси реальних газів. Реальні гази. Водяна пара. Процеси генерації пари.

Фазові діаграми. Умови рівноваги двофазних систем та закономірності фазових переходів. Водяна пара. Процес пароутворення і параметри водяної пари. Процеси генерації пари. Термодинамічні таблиці води і водяної пари. Діаграми станів реальних речовин.

Тема 10. H-s діаграма водяної пари та принципи її побудови.

h-s діаграма водяної пари (діаграма Мольє) та принцип її побудови. Визначення параметрів водяної пари за допомогою діаграми.

Тема 11. Термодинамічні процеси з водяною парою на h-s діаграмі.

Основні термодинамічні процеси водяної пари на h-s діаграмі: ізохорний процес, ізобарний процес, ізотермічний процес, ізентропний (адіабатний) процес, процес при сталій мірі сухості пари, процес дроселювання водяної пари, процес змішування потоків водяної пари з різними параметрами.

Змістовий модуль 6. Вологе повітря.

Тема 12. Парогазові суміші. Вологе повітря.

Властивості парогазових сумішей. Вологе повітря. Основні характеристики вологого повітря. Калоричні параметри вологого повітря.

Тема 13. h-d діаграма вологого повітря. Основні процеси з вологим повітрям.

h-d діаграма вологого повітря. Основні процеси з вологим повітрям, загальні характеристики.

Тема 14. Тепловологісні процеси на h-d діаграмі.

Основні процеси з вологим повітрям: загальні характеристики, процеси в теоретичній сушарці, ізобарне охолодження вологого повітря, ізобарне змішування двох потоків вологого повітря, зволоження повітря парою, зволоження повітря водою.

Змістовий модуль 7. Процеси течії газів і рідин.

Тема 15. Процеси течії і дроселювання газів і пари. Процеси в соплах та дифузорах.

Загальні положення процесів течії. Адіабатна течія ідеальних газів в каналах. Сопло Лавалю. Баланс енергій для витікання газу із сопла. Баланс енергій при течії газу в дифузорі.

Тема 16. Процеси дроселювання і процеси в ежекторах.

Дроселювання газів і пари. Дроселювання реальних газів. Процеси в ежекторах.

Змістовий модуль 8. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок.

Тема 17. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок (ТСУ). Класифікація циклів теплових машин. Простий ідеальний цикл ТСУ. Реальний простий цикл ТСУ.

Змістовий модуль 9. Газосилові та комбіновані цикли та установки.

Тема 18. Стиснення газів в компресорах.

Процеси стиснення в компресорах: одноступінчастий і багатоступінчастий компресори, їх переваги і недоліки, компресори об'ємного і динамічного стиснення.

Тема 19. Цикли газотурбінних установок та їх ефективність. Розрахунки циклів газотурбінних установок.

Цикли газотурбінних установок (ГТУ). ГТУ відкритого та закритого типу. Цикл ГТУ з ізобарним підведенням теплоти (цикл Брайтона). Теоретичні та реальні цикли ГТУ.

Тема 20. Регенеративні цикли газотурбінних установок.

Регенеративні цикли газотурбінних установок. Переваги регенеративних циклів ГТУ. Цикл ГТУ зі ступінчастим стисненням, нагріванням робочого тіла та регенерацією.

Тема 21. Цикли двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та реактивних двигунів.

Цикли двигунів внутрішнього згоряння: цикл Отто (карбюраторні ДВЗ), цикл Дизеля, цикл Тринклера (безкомпресорні дизелі), техніко-економічні показники роботи ДВЗ.

Змістовий модуль 10. Паросилові цикли та установки. Парогазові установки.

Тема 22. Цикли паротурбінних установок (ПТУ). Цикл Ренкіна та його ефективність.

Цикл найпростішої паротурбінної установки. Теоретичні та дійсні цикли ПТУ.

Тема 23. Засоби підвищення ККД циклів ПТУ.

Вплив параметрів пари на ефективність циклу ПТУ. Засоби підвищення ККД циклів ПТУ.

Тема 24. Регенеративні цикли паротурбінних установок.

Регенеративні цикли паротурбінних установок. Визначення показників ефективності циклу ПТУ з регенерацією.

Тема 25. Цикли ПТУ з проміжним перегрівом пари.

Цикли ПТУ з проміжним перегрівом пари. Умови ефективного застосування проміжного перегріву в циклі ПТУ.

Тема 26. Теплофікаційні цикли ПТУ.

Теплофікаційні цикли ПТУ, їх переваги та недоліки порівняно з конденсаційними циклами.

Тема 27. Цикли парогазових установок (ПГУ).

Цикли парогазових установок (ПГУ). Схеми ПГУ з вприскуванням води і пари, з контактними економайзерами.

Тема 28. Методи розрахунків циклів ПГУ.

Методи розрахунків циклів ПГУ. Порівняння показників роботи комбінованих установок, ПТУ та ГТУ.

Змістовий модуль 11. Цикли холодильних машин і теплонасосних установок.

Тема 29. Цикли холодильних машин. Газова холодильна машина.

Цикли холодильних машин та теплонасосних установок. Цикл газової холодильної машини.

Тема 30. Газова холодильна машина з проміжним газоохолодником.

Цикл газової холодильної машини з проміжним газоохолодником та його переваги.

Тема 31. Цикли парокомпресійних холодильних машин.

Робочі тіла для парокомпресійних холодильних машин. Цикли парокомпресійних холодильних машин. Цикли парокомпресійних холодильних машин з регенерацією теплоти.

Тема 32. Цикли парострумінних та абсорбційних холодильних машин.

Цикли парострумінних холодильних машин. Цикли абсорбційних холодильних машин.

Тема 33. Цикли теплонасосних установок.

Цикли теплонасосних установок. Робочі тіла. Цикли парокомпресійних теплонасосних установок. Цикли абсорбційних теплонасосних установок.

Змістовий модуль 12. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.

Тема 34. Ексергетичні баланси стаціонарних поточних процесів.

Ексергія усталеного потоку речовини. Ексергетичні баланси. Внутрішні та зовнішні втрати ексергії, ексергетичні коефіцієнти корисної дії.

2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

2.1 Властивості ідеальних газів і газових сумішей. Термодинамічні процеси ідеальних газів

Приклад 2.1. Зміна ентропії триатомного газу з теплоємністю $C_{pm} = 0,819$ кДж/(кг·К) в процесі, де теплоємність дорівнює нескінченності, складає $0,199$ кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу і зміну ексергії, якщо початкова густина $\rho_1 = 1,333$ кг/м³; кінцевий тиск $P_2 = 0,125$ МПа, а $t_{nc} = 20$ °С.

Розв'язання

Оскільки за умовою задачі $C = \frac{dq}{dT} = \infty$ – це можливе у випадку $dT = 0$

та $T = \text{const}$, отже, цей процес – ізотермічний.

Для ізотермічного процесу $du = C_v \cdot dT = 0$, $dh = C_p \cdot dT = 0$ та $dl = dq$.

Ізохорна теплоємність газу

$$C_v = \frac{C_p}{k} = \frac{0,819}{1,33} = 0,62 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Із рівняння Майєра визначимо газову сталу

$$C_p = C_v + R \Rightarrow R = C_p - C_v = 0,819 - 0,62 = 0,199 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Початковий питомий об'єм газу

$$v_1 = 1/\rho_1 = 1/1,333 = 0,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кінцевий питомий об'єм газу

$$\ln(v_2) - \ln(v_1) = \Delta s/R \Rightarrow \ln(v_2) = \Delta s/R + \ln(v_1)$$

$$\ln(v_2) = 0,199/0,199 + \ln(0,75) = 1 + (-0,28) = 0,72$$

$$v_2 = 2,72^{0,72} = 2,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

З рівняння ізотермічного процесу визначимо початковий тиск газу

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot v_2}{v_1} = \frac{0,125 \cdot 2,06}{0,75} = 0,34 \text{ МПа}.$$

Температура газу

$$T = \frac{P_1 \cdot v_1}{R} = \frac{0,34 \cdot 10^3 \cdot 0,75}{0,199} = 1291 \text{ К.}$$

Питома робота в ізотермічному процесі

$$l_v = l_p = q = T \cdot \Delta s = 1291 \cdot 0,199 = 256,9 \text{ кДж/кг.}$$

Молярна маса газу

$$\mu = \frac{R_\mu}{R} = \frac{8,314}{0,199} \approx 42 \text{ кг/кмоль.}$$

Питома зміна ексергії в процесі

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{nc} \cdot \Delta s = 0 - 293 \cdot 0,199 = -58,31 \text{ кДж/кг.}$$

Приклад 2.2. Густина 1кг двооксиду вуглецю зростає в 3,5 раза, а температура збільшується на 100 °С. Визначити кінцеві параметри газу, теплоту, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, ексергії, роботу зміни об'єму і зміну тиску, якщо початкові параметри газу складають: $P_1 = 0,5 \text{ МПа}$, $v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_{nc} = 17 \text{ °С}$.

Розв'язання

Газова стала CO_2

$$R = \frac{R_\mu}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{8,314}{44} = 0,189 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

де μ_{CO_2} – молярна маса CO_2 з додатка А.

Ізохорна та ізобарна масові теплоємності газу

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{0,189}{1,33-1} = 0,57 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$C_p = k \cdot C_v = 1,33 \cdot 0,57 = 0,76 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

За умовою задачі $\Delta t = 100 \text{ °С}$.

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = m \cdot C_v \cdot \Delta t = 1 \cdot 0,57 \cdot 100 = 57 \text{ кДж.}$$

Початкова температура газу

$$T_1 = \frac{P_1 \cdot v_1}{R} = \frac{0,5 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{0,189} = 794 \text{ К.}$$

Кінцева температура газу

$$T_2 = T_1 + \Delta T = 794 + 100 = 894 \text{ К,}$$

оскільки $\Delta T = \Delta t$.

Кінцевий питомий об'єм газу

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 3,5 \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = 3,5;$$

$$v_2 = \frac{v_1}{3,5} = \frac{0,3}{3,5} = 0,09 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Із рівняння політропного процесу визначимо значення показника політропи

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{(n-1)} \Rightarrow \frac{894}{794} = (3,5)^{(n-1)} \Rightarrow 1,13 = (3,5)^{(n-1)}$$

$$\ln(1,13) = (n-1) \ln(3,5) \Rightarrow n = \frac{\ln(1,13)}{\ln(3,5)} + 1 = 1,1.$$

Теплоємність політропного процесу

$$C_{\pi} = C_v \frac{n - k}{n - 1} = 0,57 \frac{1,1 - 1,33}{1,1 - 1} = -1,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Теплота процесу

$$Q = m \cdot C_{\pi} \cdot \Delta t = 1 \cdot (-1,31) \cdot 100 = -131 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії

$$\Delta H = m \cdot C_p \cdot \Delta t = k \cdot \Delta U = 1,33 \cdot 57 = 75,8 \text{ кДж.}$$

Робота зміни об'єму

$$L_v = Q - \Delta U = (-131) - 57 = -188 \text{ кДж.}$$

Робота зміни тиску

$$L_p = L_v \cdot n = Q - \Delta H = (-131) - 75,8 = -206,8 \text{ кДж.}$$

Зміна ентропії

$$\Delta S = m \cdot C_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 1 \cdot (-1,31) \cdot \ln(1,13) = -0,154 \text{ кДж/К.}$$

Зміна ексергії в процесі

$$\Delta E_x = \Delta H - T_{nc} \cdot \Delta S = 75,8 - 290 \cdot (-0,154) = 120,46 \text{ кДж.}$$

Кінцевий тиск газу

$$P_2 = P_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = 0,5 \cdot 10^3 \cdot (3,5)^{1,1} = 1983 \text{ кПа.}$$

2.2 Термодинамічні процеси з водяною парою

Приклад 2.3. Водяна пара з параметрами $P_1 = 8 \text{ МПа}$, $x_1 = 0,95$ перегрівається за рахунок підведення $0,25 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ енергії. Визначити теплоту, витрачену на перегрів, середню теплоємність в процесі, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії та ексергії, якщо $t_{nc} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Процес перегріву пари – ізобарний. Задачу розв'язуємо з використанням $h - s$ діаграми (рис. 2.1). Початкову точку 1 визначаємо на перетині ізобари P_1 з кривою міри сухості x_1 .

Параметри пари в точці 1 з діаграми: $t_1 = 295 \text{ }^\circ\text{C}$; $h_1 = 2690 \text{ кДж/кг}$; $v_1 = 0,024 \text{ м}^3/\text{кг}$; $s_1 = 5,63 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

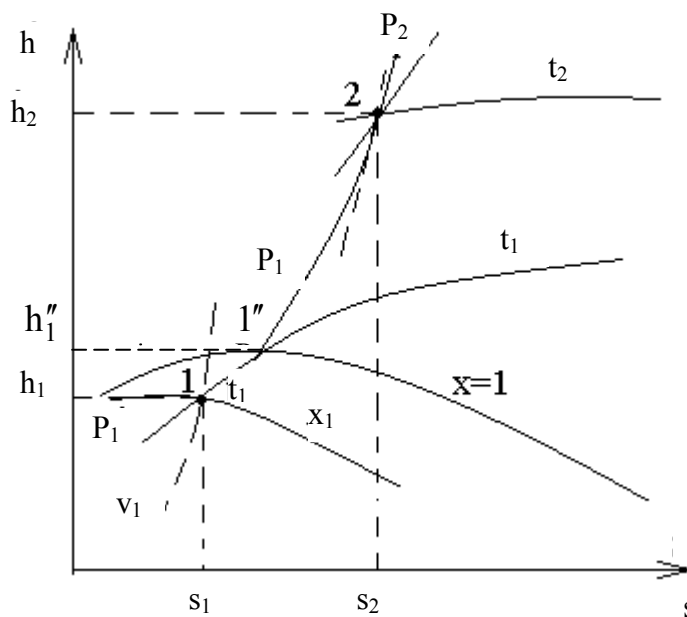


Рисунок 2.1 – Побудова процесу на $h - s$ діаграмі

Оскільки $P_1 = P_2 = \text{const}$, то для ізобарного процесу 1–2 можна записати $q_{1-2} = h_2 - h_1 = \Delta h$.

Питома теплота, витрачена на перегрів пари в процесі 1–2

$$q_{1-2} = 0,25 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 0,25 \cdot 3600 = 900 \text{ кДж/кг.}$$

Ентальпія пари в точці 2

$$h_2 = h_1 + q_{1-2} = 2690 + 900 = 3590 \text{ кДж/кг.}$$

Точку 2 на діаграмі будуємо на перетині ізобари P_1 з ізоентальпою h_2 .

Параметри пари в точці 2: $h_2 = 3590 \text{ кДж/кг}$; $v_2 = 0,047 \text{ м}^3/\text{кг}$; $s_2 = 6,97 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. $t_2 = 577 \text{ }^\circ\text{C}$.

На перетині ізобари $P_1 = P_2 = \text{const}$ з лінією міри сухості $x = 1$ будуємо точку 1'', що відповідає стану сухої насиченої пари при даному тиску та визначаємо ентальпію сухої насиченої пари для тиску $P_1 = P_2 = \text{const}$: $h_1'' = 2760 \text{ кДж/кг}$.

Питома теплота, яка витрачена на перегрів пари

$$q_{\text{пер}} = h_2 - h_1'' = 3590 - 2760 = 830 \text{ кДж/кг.}$$

Середня теплоємність в процесі 1–2

$$C_p = q_{1-2}/(t_2 - t_1) = 900/(577 - 295) = 3,192 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питома робота зміни об'єму

$$l_v = P (v_2 - v_1) = 8000(0,047 - 0,024) = 184 \text{ кДж/кг.}$$

Питома зміна внутрішньої енергії

$$\begin{aligned} \Delta u &= (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = (h_2 - h_1) - P(v_2 - v_1) = \\ &= q_{1-2} - l_v = 900 - 184 = 716 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Питома зміна ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 6,97 - 5,63 = 1,34 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питома зміна ексергії

$$\Delta e_x = h_2 - h_1 - T_{\text{nc}} \Delta s = 3590 - 2690 - 293 \cdot 1,34 = 507,38 \text{ кДж/кг.}$$

Приклад 2.2. До водяної пари з параметрами: $P_1 = 3,5$ МПа і $\rho_1 = 20$ кг/м³ ізотермічно підводиться 0,1147 кВт·год енергії. Визначити роботу процесу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ексергії, теплоту пароутворення для початкового тиску. Температура навколишнього середовища 25 °С.

Розв'язання

Задачу розв'язуємо з використанням $h - s$ діаграми (рис. 2.2.). Початкову точку 1 визначимо на перетині ізохори $v_1 = 1/\rho_1 = 1/20 = 0,05$ м³/кг з ізобарою $P_1 = 3,5$ МПа.

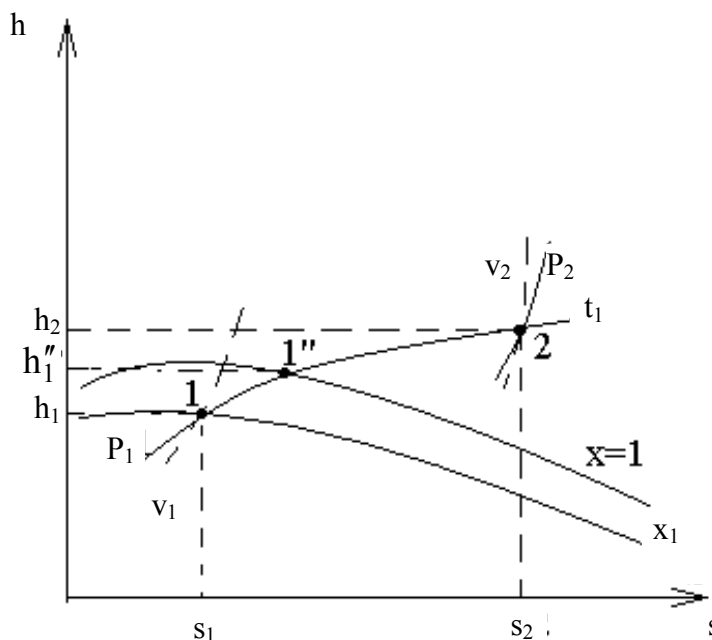


Рисунок 2.2 – Побудова процесу на $h - s$ діаграмі

Параметри пари в точці 1:

$$s_1 = 5,7 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); h_1 = 2580 \text{ кДж}/\text{кг}; t_1 = 243 \text{ }^\circ\text{С}; x_1 = 0,873.$$

Питома підведена теплота в процесі 1–2

$$q_{1-2} = 0,1147 \cdot 3600 = 412,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Для ізотермічного процесу можна записати $q = T \cdot \Delta s$, звідки визначимо питому зміну ентропії

$$\Delta s = s_2 - s_1 = q_{1-2}/T = 412,9/516 = 0,8 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Кінцева питома ентропія в процесі 1–2

$$s_2 = s_1 + \Delta s = 5,7 + 0,8 = 6,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Точку 2 визначимо на перетині ізотерми $t_1 = 243 \text{ }^\circ\text{C}$ з ізоентропою $s_2 = 6,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Параметри пари в кінцевій точці 2: $P_2 = 2100 \text{ кПа}$; $v_2 = 0,11 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_2 = 2890 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Питома зміна ентальпії

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 2890 - 2580 = 110 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Питома зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = \Delta h - (P_2 v_2 - P_1 v_1) = 110 - (2100 \cdot 0,11 - 3500 \cdot 0,05) = 54 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Питома робота ізотермічного процесу

$$l_v = q_{1-2} - \Delta u = 412,9 - 54 = 358,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Питома зміна ексергії

$$\Delta e_x = \Delta h - T_{nc} \cdot \Delta s = 110 - 298 \cdot 0,8 = -128,4 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

На перетині ізотерми $t_1 = 243 \text{ }^\circ\text{C}$ з лінією міри сухості $x = 1$ будуємо точку 1", що відповідає стану сухої насиченої пари при даному тиску та визначаємо ентальпію сухої насиченої пари: $h_1'' = 2810 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Теплота пароутворення для початкового тиску

$$r = (h'' - h_1)/(1 - x_1) = (2810 - 2580)/(1 - 0,873) = 1811 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

2.3 Термодинамічні процеси з вологим повітрям

Приклад 2.3. Вологе повітря з витратою $10800 \text{ м}^3/\text{год}$ і параметрами: $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 0,97938 \text{ м}^3/\text{кг}$ зволожується водою, температура якої $75 \text{ }^\circ\text{C}$, внаслідок чого його відносна вологість зростає на 50%. Визначити витрату води, параметри повітря після зволоження, тепловологісне відношення.

Розв'язання

Задачу розв'язуємо з використанням $h-d$ діаграми (рис. 2.3).

Масова витрата повітря

$$G_{пв} = V/(v_{вп} \cdot 3600) = 10800/(0,97938 \cdot 3600) = 3,06 \text{ кг}/\text{с}.$$

Густина вологого повітря

$$\rho_{вп} = 1/v_{вп} = 1/0,97938 = 1,02 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Густина сухого повітря для початкового стану в точці 1

$$\rho_{\text{сп}} = P/(R \cdot T_1) = 100/(0,287 \cdot 338) = 1,03 \text{ кг/м}^3.$$

Визначимо початковий вологовміст повітря

$$\rho_1 = \rho_{\text{вп}} = \rho_{\text{сп}} \cdot (1 + d_1)/(1 + 1,61 \cdot d_1) \Rightarrow$$

$$d_1 = \frac{\rho_{\text{сп}} - \rho_{\text{вп}}}{1,61 \cdot \rho_{\text{вп}} - \rho_{\text{сп}}} = \frac{1,03 - 1,02}{1,61 \cdot 1,02 - 1,03} = 0,016 \text{ кг/кг}.$$

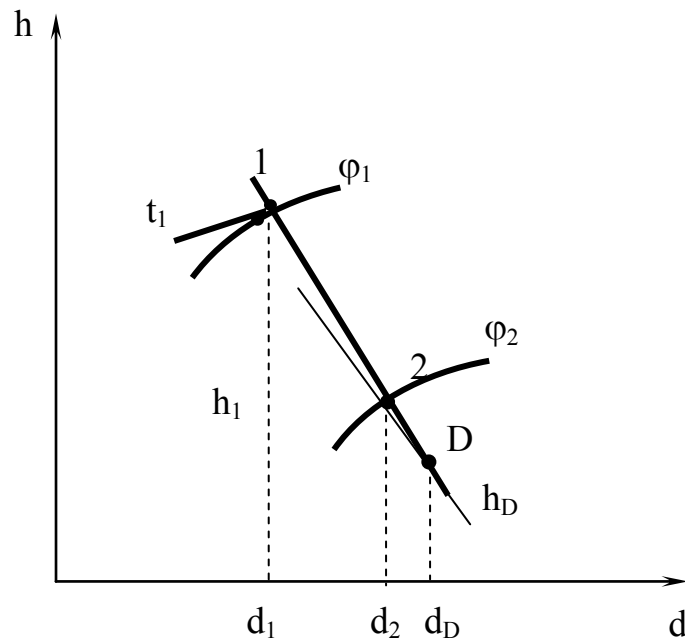


Рисунок 2.3 – Побудова процесів на h – d діаграмі

На діаграмі будуємо т. 1 за значеннями $d_1 = 0,016 \text{ кг/кг} = 16 \text{ г/кг}$ та $t_1 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. З діаграми визначаємо значення відносної вологості повітря $\phi_1 = 10\%$ та ентальпію $h_1 = 110 \text{ кДж/кг}$.

Ентальпія води з температурою $t_b = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, яка застосовується для зволоження повітря

$$h_b = C_b \cdot t_b = 4,19 \cdot 75 = 314,25 \text{ кДж/кг}.$$

В процесі зволоження тепловологісне відношення дорівнює ентальпії води $\varepsilon = \Delta h/\Delta d = h_b$.

Приймаємо $\Delta h = 4 \text{ кДж/кг}$ та визначаємо зміну вологовмісту

$$\Delta d = \Delta h/h_b = 4/314,25 = 0,013 \text{ кг/кг}.$$

Визначаємо параметри допоміжної точки D

$$h_D = h_1 + \Delta h = 110 + 4 = 114 \text{ кДж/кг},$$

$$d_D = d_1 + \Delta d = 0,016 + 0,013 = 0,029 \text{ кг/кг}.$$

На діаграмі будуємо т. D та з'єднуємо її з точкою 1. Шукана точка повітря після зволоження (точка 2) визначається на перетині ліній 1–D з лінією $\varphi_2 = \varphi_1 + 50 = 10 + 50 = 60 \%$. Параметри повітря в точці 2: $h_2 = 115 \text{ кДж/кг}$; $d_2 = 28,5 \text{ г/кг} = 0,0285 \text{ кг/кг}$; $t_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$.

Витрата води для зволоження повітря

$$G_B = G_{\text{пв}} \cdot (d_2 - d_1) = 3,06 \cdot (0,0285 - 0,016) = 0,03825 \text{ кг/с}.$$

Приклад 2.4. До вологого повітря з параметрами: $\rho = 1,165 \text{ кг/м}^3$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, підводиться $0,01666 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплоти. Підігріте повітря надходить в теоретичну сушарку, де висушує вологий матеріал, а його відносна вологість зростає до 80%. Визначити параметри повітря на виході із сушарки, тепловологісне відношення, витрату повітря, якщо витрата вологого і сухого матеріалу складають 1080 і 540 кг/год , відповідно.

Розв'язання

Задачу розв'язуємо за допомогою h–d діаграми (рис. 2.4).

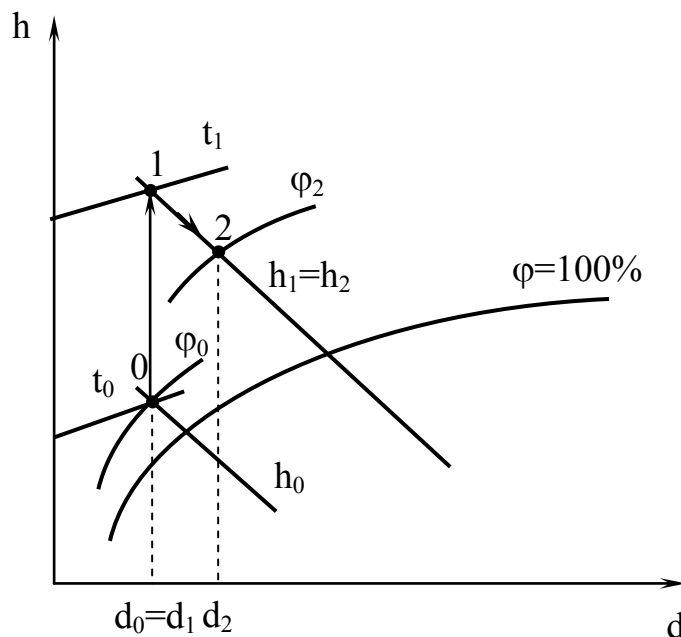


Рисунок 2.4 – Побудова процесів на h – d діаграмі

Витрата випареної вологи

$$W = G_{\text{вм}} - G_{\text{см}} = 1080 - 540 = 540 \text{ кг/год.}$$

Густина сухого повітря для початкового стану в точці 0

$$\rho_{\text{сп}} = P / (R \cdot T_0) = 100 / (0,287 \cdot 298) = 1,17 \text{ кг/м}^3.$$

Визначимо початковий вологовміст повітря

$$\rho_0 = \rho_{\text{вп}} = \rho_{\text{сп}} \cdot (1 + d_0) / (1 + 1,61 \cdot d_0) \Rightarrow$$

$$d_0 = \frac{\rho_{\text{сп}} - \rho_{\text{вп}}}{1,61 \cdot \rho_{\text{вп}} - \rho_{\text{сп}}} = \frac{1,17 - 1,165}{1,61 \cdot 1,165 - 1,17} = 0,007 \text{ кг/кг.}$$

На діаграмі будуємо т. 0 за значеннями $d_0 = 0,007 \text{ кг/кг} = 7 \text{ г/кг}$ та $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. З діаграми визначаємо ентальпію $h_0 = 43 \text{ кДж/кг}$.

В сушарці до повітря підводиться теплота

$$q_{0-1} = 0,01666 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 0,01666 \cdot 3600 = 60 \text{ кДж/кг.}$$

Визначимо ентальпію повітря після сушарки

$$h_1 = q_{0-1} + h_0 = 60 + 43 = 103 \text{ кДж/кг.}$$

На діаграмі будуємо т. 1 за значеннями $d_1 = d_0 = 0,007 \text{ кг/кг} = 7 \text{ г/кг}$ та $h_1 = 103 \text{ кДж/кг}$.

Точка 2 характеризує стан вологого повітря на виході із сушильної камери. На діаграмі будуємо т. 2 за умови $h_1 = h_2 = 103 \text{ кДж/кг}$ та $\varphi_2 = 80 \%$. З діаграми визначаємо вологовміст $d_2 = 0,0265 \text{ кг/кг} = 26,5 \text{ г/кг}$ та температуру повітря $t_2 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$.

Зміна вологовмісту повітря в процесі 1–2

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 0,0265 - 0,007 = 0,0195 \text{ кг/кг} = 19,5 \text{ г/кг.}$$

Витрата повітря

$$G = W / \Delta d = (540 / 3600) / 0,0195 = 7,69 \text{ кг/с.}$$

Тепловологісні відношення

$$\varepsilon_{0-1} = \Delta h / \Delta d = (h_1 - h_0) / (d_1 - d_0) = (103 - 43) / 0 = +\infty;$$

$$\varepsilon_{1-2} = \Delta h / \Delta d = (h_2 - h_1) / (d_2 - d_1) = (103 - 103) / (0,0265 - 0,007) = 0;$$

$$\varepsilon_{0-2} = \Delta h / \Delta d = (h_2 - h_0) / (d_2 - d_0) = (103 - 43) / (0,0265 - 0,007) = 3077 \text{ кДж/кг.}$$

3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Термодинамічні системи (ТДС). Види термодинамічних систем.
2. Види та форми енергії в ТДС. Форми енергообміну в ТДС.
3. Стан термодинамічної системи. Параметри і функції стану ТДС.
4. Наведіть приклади термічних та калоричних параметрів стану ТДС.
5. Наведіть приклади інтенсивних та екстенсивних параметрів ТДС.
6. Чим «функції стану» відрізняються від «параметрів стану» ТДС?
7. Що називають теплотою пароутворення?
8. Координати стану. Координати термічної та деформаційної взаємодії.
9. Як визначити питомий об'єм, ентальпію та ентропію вологої пари?
10. Потенціали взаємодії. Наведіть приклади потенціалів термічної та деформаційної взаємодії.
11. Яка пара називається вологою насиченою і що таке «міра сухості»?
12. Чи можуть бути інтенсивні параметри координатами взаємодії?
13. Чи можуть бути екстенсивні параметри потенціалами взаємодії?
14. Як називається процес, в якому робота здійснюється лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії? Наведіть співвідношення параметрів цього процесу.
15. Як називається процес, в якому підведена до робочого тіла теплота чисельно дорівнює зміні ентальпії? Яка частка підведеної теплоти в цьому випадку витрачається на здійснення роботи? Наведіть співвідношення параметрів цього процесу.
16. Як називається процес, в якому робота здійснюється лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії? Наведіть співвідношення параметрів цього процесу.
17. Рівноважні та нерівноважні процеси. Наведіть приклади.
18. Як називається процес, в якому вся підведена теплота витрачається на здійснення роботи? Наведіть співвідношення параметрів цього процесу.
19. Оборотні та необоротні процеси. Наведіть приклади.
20. Як називається процес, в якому вся підведена теплота витрачається на зміну внутрішньої енергії? Наведіть співвідношення параметрів цього процесу.
21. Зазначте умови оборотності процесів.
22. Наведіть співвідношення між параметрами в політропному процесі.
23. Що називають дисипативними ефектами?

24. Який процес називається політропним? Як визначаються показник політропи та теплоємність політропного процесу?
25. Які термодинамічні процеси характеризуються найвищою досконалістю?
26. Наведіть співвідношення між ізобарною та ізохорною теплоємностями та вирази для їх визначення.
27. Які процеси називаються поточними? Усталені та неусталені поточні процеси.
28. Як визначаються термічний ККД та холодильний коефіцієнт циклу Карно? Які значення приймає термічний ККД циклу Карно?
29. Рівняння нерозривності (суцільності) потоку.
30. Які цикли називаються холодильними? Як оцінюється ефективність холодильних циклів?
31. Поясніть поняття «ідеальний газ»? За яких умов реальні гази наближаються за властивостями до ідеальних?
32. Чим визначається ефективність перетворення теплоти на роботу в круговому процесі?
33. Рівняння стану ТДС. Термічне рівняння стану ТДС. Запишіть рівняння стану в диференціальній формі.
34. Як співвідносяться величини сумарної теплоти та роботи в кругових процесах? Як визначити теплоту та роботу циклу?
35. Що називають газовою сталою? Від чого вона залежить? Як визначити газову сталу за допомогою універсальної газової сталої?
36. Що характеризує зростання ентропії в реальних процесах?
37. Запишіть характеристичне рівняння Клапейрона.
38. Поясніть характер зміни ентропії в оборотних і необоротних процесах.
39. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Для яких газів воно застосовується?
40. Основні (узагальнені) рівняння термодинаміки.
41. Внутрішня енергія. Як визначити зміну внутрішньої енергії в процесі? Чи є внутрішня енергія функцією процесу?
42. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
43. Ентальпія. Як визначити зміну ентальпії в процесі? Чи є ентальпія функцією процесу?
44. Запишіть вираз першого закону термодинаміки для закритих і відкритих ТДС з ідеальними газами.
45. Питома ізохорна та ізобарна теплоємність.
46. Сформулюйте та запишіть вираз закону збереження та перетворення енергії (першого закону термодинаміки).
47. Питома робота проштовхування.

48. В якому випадку теплота та робота додатні в ТДС, а в якому – від’ємні?
49. Робота зміни об’єму. Чи є робота зміни об’єму функцією процесу?
50. Зображення теплоти процесу на тепловій (ентропійній) діаграмі.
51. Які процеси називаються циклами? Прямий та зворотний цикл.
52. Зображення роботи зміни тиску на $P - v$ діаграмі.
53. Робота зміни тиску, визначення її в процесі. Чи є робота зміни тиску роботою робочого тіла?
54. Теплота. Визначення теплоти процесу.
55. Зображення роботи зміни об’єму на $P - v$ діаграмі.
56. Що називається істинною питомою теплоємністю? Наведіть співвідношення між масовою, мольною та об’ємною теплоємностями.
57. Що називається вологим повітрям?
58. Що називається насиченим вологим повітрям?
59. Що називається ненасиченим вологим повітрям?
60. Що називають температурою точки роси?
61. Абсолютна та відносна вологість повітря.
62. Що називається вологовмістом?
63. Як визначити густину вологого повітря?
64. Як визначити теплоємність вологого повітря?
65. Як визначити ентальпію ненасиченого вологого повітря?
66. Як визначити ентальпію насиченого вологого повітря?
67. Що називають тепловологісним відношенням?
68. Зображення процесів в теоретичній сушарці на $h-d$ діаграмі.
69. Зображення процесу ізобарного охолодження вологого повітря на $h-d$ діаграмі.
70. Зображення процесу ізобарного змішування двох потоків вологого повітря на $h-d$ діаграмі.
71. Зображення процесу зволоження повітря парою на $h-d$ діаграмі.
72. Зображення процесу зволоження повітря водою на $h-d$ діаграмі.

4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Номер варіанта в задачах 1–5 визначається за шифром, який задає викладач.

Задача 1

В процесі підведення до газу теплоти Q , внутрішня енергія 1 м^3 газу зменшується на ΔU . Визначити кінцеві параметри газу, роботи зміни об'єму і тиску, зміну ентальпії, ентропії та ексергії, якщо початкові параметри газу становлять: P_1 , МПа та t_1 , °С. Температура навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °С.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Остання цифра шифру	Q , кДж	ΔU , кДж	газ	Передостання цифра шифру	P_1 , МПа	t_1 , °С	$t_{\text{нс}}$, °С
0	150	30	N_2	0	0,4	227	25
0,36	160	34	O_2	1	0,2	100	18
0,37	170	45	SO_2	2	0,25	124	17
0,38	120	32	CO_2	3	0,12	55	23
0,355	110	23	SO	4	0,37	200	20
0,365	100	22	CO	5	0,16	77	21
0,375	143	36	NO_2	6	0,19	88	15
0,344	158	60	повітря	7	0,27	127	28
0,364	135	37	N_2	8	0,14	73	16
0,366	126	28	O_2	9	0,17	93	22

Задача 2

Пара з параметрами: P_1 і x_1 перегрівається на Δt , °С; після чого дрослюється до m -кратного збільшення об'єму. Далі пара розширюється в турбіні до кінцевого значення температури t_k , °С. Визначити зміну внутрішньої енергії та ексергії в процесах, середню теплоємність і роботу пари в першому процесі, роботу пари в турбіні, показник адиабати і теплоту пароутворення в кінцевій точці.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Остання цифра шифру	P_1 , МПа	x_1	Δt , °С	Передостання цифра шифру	m	t_k , °С
0	5	0,91	250	0	2	50
1	1,5	0,95	200	1	3	30
2	2	0,92	220	2	2,5	40
3	2,5	0,94	225	3	3,5	45
4	3	0,88	215	4	4	35
5	3,5	0,86	210	5	2	33
6	4	0,87	195	6	3	43
7	4,5	0,85	245	7	4	30
8	3	0,92	235	8	2,3	40
9	4	0,9	230	9	3,3	50

Задача 3

Для m -атомного газу з теплоємністю C_{pm} в процесі, де теплоємність дорівнює C , зміна ентропії складає Δs , кДж/(кг·К). Визначити рід газу, його початкові та кінцеві параметри, роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентальпії, зміну ексергії, якщо початкова густина ρ_1 , кінцевий тиск P_2 , а температура навколишнього середовища $t_{нс}$.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Остання цифра шифру	m	Δs , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	C , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Передостання цифра шифру	C_{pm} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	ρ_1 , кг/м^3	P_2 , МПа	$t_{нс}$, °С
0	1	0	0	0	0,819	1,33	0,16	25
1	2	0,398	∞	1	0,6	1,2	0,19	18
2	3	0	0	2	0,5	1,5	0,27	17
3	4	0,255	∞	3	0,8	1,44	0,14	23
4	4	0	0	4	0,9	1,25	0,17	20
5	2	0,140	∞	5	0,85	1,66	0,4	21
6	3	0	0	6	0,75	1,44	0,2	15
7	1	0,200	∞	7	0,65	1,55	0,25	28
8	4	0	0	8	0,55	1,18	0,12	16
9	3	0,185	∞	9	0,93	1,23	0,37	22

Задача 4

До вологого повітря з початковими параметрами t_0 , φ_0 підводиться q_{0-1} теплоти, після чого воно надходить в теоретичну сушарку, де його відносна вологість збільшується до φ_2 . Визначити витрату повітря, його густину та інші параметри на виході із сушарки, якщо витрата вологого і сухого матеріалів в сушарці $G_{вм}$ і $G_{см}$, кг/год, відповідно.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Остання цифра шифру	t_0 , °C	φ_0 , %	q_{0-1} , кВт·год	Передостання цифра шифру	φ_2 , %	$G_{вм}$, кг/год	$G_{см}$, кг/год
0	20	60	0,0125	0	90	720	360
1	10	50	0,014	1	80	720	540
2	11	55	0,013	2	70	540	360
3	12	45	0,0115	3	85	720	360
4	13	40	0,015	4	75	540	360
5	14	55	0,011	5	80	1080	540
6	15	60	0,0133	6	70	720	540
7	16	50	0,0127	7	90	540	360
8	17	40	0,0118	8	85	720	540
9	18	55	0,0116	9	75	1080	720

Задача 5

Вологе повітря з витратою $V_{пв}$ і параметрами t_1 , φ_1 зволожується водою, температура якої t_v . Визначити питомий об'єм та інші параметри зволоженого повітря, якщо витрата води в m разів менша за витрату повітря.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань до задачі 5

Остання цифра шифру	t_1 , °C	φ_1 , %	t_v , °C	Передостання цифра шифру	$V_{пв}$, м ³ /Год.	m
0	65	20	75	0	7200	100
1	70	30	80	1	3600	120
2	75	40	85	2	5400	80
3	70	25	75	3	1080	90
4	65	35	80	4	7200	110
5	70	20	85	5	3600	115
6	60	30	75	6	5400	125
7	65	40	80	7	1080	95
8	70	25	85	8	7200	85
9	60	35	75	9	3600	105

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : Поділля–2000, 2003. – 368 с.
2. Чепурний М. М. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 150 с.
3. Остапенко О. П. Технічна термодинаміка: лабораторний практикум / Остапенко О. П. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.
4. Техническая термодинамика / [Крутов В. И., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.] ; под ред. В. И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1991. – 375 с.
5. Беляев Н. М. Термодинаміка / Беляев Н. М. – Киев : Вища школа, 1987. – 246 с.
6. Кириллин В. О. Техническая термодинамика / Кириллин В. О., Сычев В. В., Шейдлин О. Е. – М. : Энергоиздат, 1976. – 324 с.
7. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена / [Афанасьев В. Н., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.] ; под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. – М. : Высшая школа, 1986. – 383 с.
8. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства воды и водяного пара / Ривкин Л. С. – М. : Энергия, 1980. – 192 с.
9. Ривкин Л. С. Термодинамические свойства газов / Ривкин Л. С. – М. : Энергия, 1973. – 224 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Основні фізичні властивості деяких газів

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

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Теплоємність окису вуглецю

Температура t, °C	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3575	0,9864
700	33,025	24,710	30,725	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948

Таблиця Б.2 – Теплоємність водню

Температура t, °C	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,350	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	30,488	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964

Таблиця Б.3 – Теплоємність вуглекислого газу

Тем- пера- тура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоєм- ність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,60	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9227	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,588	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644

Таблиця Б.4 – Теплоємність сірчаного газу

Тем- пера- тура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль К)				Масова теплоєм- ність, кДж/(кг К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	38,85	30,52	38,85	30,52	0,607	0,477	1,733	1,361
100	42,41	34,08	40,65	32,32	0,636	0,507	1,813	1,440
200	45,55	37,22	42,33	34,00	0,662	0,532	1,888	1,516
300	48,23	39,90	43,88	35,55	0,687	1,557	1,955	1,587
400	50,24	41,91	45,22	36,89	0,708	0,578	2,018	1,645
500	51,71	43,38	46,39	38,06	0,724	0,595	2,068	1,700
600	52,88	44,55	47,35	39,02	0,737	0,607	2,114	1,742
700	53,76	45,43	48,23	39,90	0,754	0,624	2,152	1,799
800	54,43	46,10	48,94	40,61	0,762	0,632	2,181	1,813
900	55,01	46,68	49,61	41,28	0,775	0,645	2,215	1,842
1000	55,43	47,10	50,16	41,83	0,783	0,653	2,236	1,867
1100	55,77	47,44	50,66	42,33	0,791	0,662	2,261	1,888
1200	56,06	47,73	51,08	42,75	0,795	0,666	2,278	1,908

Таблиця Б.5 – теплоємність водяної пари

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,984	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817

Таблиця Б.6 – Теплоємність повітря

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність, кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	1,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,687	31,862	23,547	1,0999	0,8432	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,976	32,109	23,794	1,1082	0,8127	1,4327	1,0618
1300	35,291	27,231	32,343	24,028	1,1166	0,8215	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,457	32,565	24,250	1,1242	0,8294	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,662	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0999

Таблиця Б.7 – Теплоємність кисню

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоємність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9551	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,246	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,0166
1100	34,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585

Таблиця Б.8 – Теплоємність азоту

Температура	Мольна теплоємність, кДж/(кмоль · К)				Масова теплоємність, кДж/(кг · К)		Об'ємна теплоємність, кДж/(см ³ · К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7427	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7691	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7792	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7900	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,452	22,136	1,0869	0,8005	1,3586	1,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8110	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8210	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789

Додаток В

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

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

Продовження таблиці В.1

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

Продовження таблиці В.1

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

Продовження таблиці В.1

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

Продовження таблиці В.1

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

Продовження таблиці В.1

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

Продовження таблиці В.1

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

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

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

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Технічна термодинаміка»
(частина 1)
для студентів напряму підготовки
«Теплоенергетика» заочної форми навчання

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Укладач Остапенко Ольга Павлівна

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку 15.12.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 2,3.
Наклад 40 пр. Зам. № 2017-.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.