

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Основи теплотехніки

методичні рекомендації

для виконання практичних робіт здобувачами початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв

2023

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 30.03.2023, протокол № 8.

Укладачі:

Сидорика Ігор – канд. тех. наук доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївського національного аграрного університету;

Рецензенти:

Грубань Василь. – канд. тех. наук, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації та технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.

Ставинський Андрій – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальні вказівки до практичної роботи.....	5
2. Тематичний план практичних занять.....	6
3. Приклади розв'язання задач.	
Тема № 1. Основні параметри робочого тіла. Рівняння стану ідеальних газів. Термодинамічні процеси	7
Тема 2. Властивості реальних газів. h_s -Діаграма водяної пари. Розрахунки процесів з реальними газами.	13
Тема № 3. Розрахунки теплообмінних апаратів. Розрахунки циклів ГТУ та ДВЗ.	19
4. Індивідуальні розрахункові завдання	23
Література.....	26
Додатки.....	27

ВСТУП

“Основи теплотехніки” – це загальнотехнічна дисципліна, що вивчає методи одержання, перетворення, передачі і використання теплоти, а також принципи дії і конструктивних особливостей тепло- і парогенераторів, теплових машин, апаратів і пристроїв.

Курс "Основи теплотехніки" складається з 2-х основних розділів:

- основи технічної термодинаміки;
- теорія теплообміну.

Термодинаміка вивчає закони перетворення енергії в різних фізико-хімічних процесах, що відбуваються в макроскопічних системах і супроводжуються тепловими ефектами. У залежності від задач дослідження визначають загальну, хімічну, технічну термодинаміку, термодинаміку біологічних систем та інше.

Технічна термодинаміка розглядає процеси взаємного перетворення теплоти і роботи. Вона встановлює зв'язок між тепловими, механічними і хімічними процесами, що відбуваються в теплових і холодильних машинах, вивчає процеси, що відбуваються в газах і парах, а також властивості цих тіл при різних фізичних умовах.

Теорія теплообміну вивчає самодовільні необоротні процеси поширення теплоти у просторі.

Технічна термодинаміка та теорія теплообміну є теоретичним фундаментом теплотехніки.

1 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

Мета викладання курсу – вивчення студентами основних законів технічної термодинаміки і теплопередачі та використання їх при проектуванні технологічного обладнання та процесів.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен **знати**:

- основні закони термодинаміки;
- термодинамічні процеси;
- властивості реальних газів;
- закони теплопередачі теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням;
- особливості термодинаміки відкритих систем;
- цикли теплосилових установок.

Студент повинен **вміти**:

- користуватись довідковою літературою при розв'язанні задач;
- виконувати практичні вимірювання основних теплофізичних величин за допомогою спеціальних приладів;
- виконувати теплотехнічні розрахунки;
- моделювати теплові процеси.

Курс “Основи теплотехніки” включає лекції, практичні заняття та самостійну роботу над вивченням теоретичного матеріалу. У кінці семестру студенти складають іспит. Курс складається з двох смислових модулів:

- 1) основи технічної термодинаміки;
- 2) теорія теплообміну.

Згідно з кредитно-модульною системою навчання кожний модуль оцінюється у 100 балів. Оцінка за модуль складається з оцінок за виконання та захист індивідуальних розрахункових завдань та оцінки за контрольні роботи.

Контрольна робота з кожного модуля охоплює головні теоретичні положення з даного розділу курсу і основні типи розрахункових завдань.

2. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

2.1 Практичні заняття проводяться з метою закріплення, розширення та поглиблення теоретичних знань та навичок, які одержав студент на лекціях та лабораторних заняттях, набуття вміння самостійно розв'язувати задачі. Тематичний план практичних занять наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Тематичний план практичних занять

№	Зміст заняття	Література
1.	Основні параметри робочого тіла. Рівняння стану ідеальних газів. Термодинамічні процеси.	[1, с.6–20; 12, с.3–85]
2.	Властивості реальних газів. <i>h</i> s- Діаграма водяної пари. Розрахунки процесів з реальними газами.	[1, с.36–42; 12, с.133–163] [1, с.36–42; 12, с.133–163]
3.	Розрахунки теплообмінних апаратів. Розрахунки циклів ГТУ та ДВЗ	[1, с.197–200; 12, с.96–117]

На заняттях розглядається найбільш складний матеріал курсу. Студенти мають можливість одержати необхідний довідковий матеріал, допомогу в рішенні індивідуальних завдань та захистити контрольні завдання.

3. Приклади розв'язання задач.

Тема № 1. Основні параметри робочого тіла. Рівняння стану ідеальних газів. Термодинамічні процеси.

Приклад 1.1. Визначити абсолютний тиск пари в котлі, якщо манометр показує $P = 1,3$ бар, а атмосферний тиск за ртутним барометром складає 680 мм рт. ст. при $t = 25^\circ\text{C}$.

Рішення. Барометричний тиск необхідно перерахувати до 0°C :

$$P_0 = P_t (1 - 0,000172 t) = 680 (1 - 0,000172 \cdot 25) = 677,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Тепер можна визначити абсолютний тиск пари в котлі:

$$P_{абс} = 130000 + 677,1 \cdot 133,3 = 220257 \text{ Па} = 0,22 \text{ МПа.}$$

Приклад 1.2. Масові долі кисню та азоту в атмосферному повітрі відповідно дорівнюють – 0,232 і 0,768. Визначити об'ємні долі кисню та азоту, газову постійну і молекулярну масу повітря, парціальні тиски кисню та азоту, якщо тиск повітря за барометром складає 760 мм рт. ст.

Рішення. Газові постійні кисню та азоту знаходимо за додатком А. Визначаємо газову постійну повітря:

$$R_{сум} = g_{O_2} \cdot R_{O_2} + g_{N_2} \cdot R_{N_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Розраховуємо об'ємні долі компонентів суміші:

$$r_{O_2} = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{сум}} = \frac{0,232 \cdot 259,8}{287} = 0,21.$$
$$r_{N_2} = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{сум}} = \frac{0,768 \cdot 296,8}{287} = 0,79.$$

Молекулярну масу суміші визначаємо за формулою

$$\mu_{сум} = \sum_1^n r_i \cdot \mu_i = r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9 \text{ кг/кмоль}$$

або за формулою

$$\mu_{сум} = \frac{8314}{R_{сум}} = \frac{8314}{287} = 28,9 \text{ кг/кмоль.}$$

Визначаємо парціальні тиски:

$$P_{O_2} = r_{O_2} \cdot P = 0,21 \cdot 760 = 159,4 \text{ мм рт. ст.}$$

$$P_{N_2} = r_{N_2} \cdot P = 0,79 \cdot 760 = 600,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Приклад 1.3. Балон с киснем ємністю 20 л знаходиться під тиском 10 МПа при 15°C. Після витрати частки кисню тиск зменшився до 7,6 МПа, а температура до 10°C. Визначити масу кисню, яку витратили.

Рішення. Визначаємо початкову та кінцеву масу кисню за рівнянням Клапейрону:

$$m_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг}; \quad m_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг.}$$

Таким чином витрата кисню складає:

$$\Delta m = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг.}$$

Приклад 1.4. Визначити густину оксиду вуглецю при 20°C і 710 мм рт. ст., якщо при 0°C і 760 мм рт. ст. вона складає 1,251 кг/м³.

Рішення. Запишемо рівняння Клапейрону для двох станів. Згадаємо, що густина – це величина, яка оборотна питомому об'єму. Тоді одержуємо:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = 1,251 \cdot \frac{710 \cdot 273}{760 \cdot (273 + 20)} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 1.5. Повітря знаходиться в замкнутій посудині ємністю 90 л при тиску 8 бар і температурі 30°C. За рахунок підведення теплоти тиск збільшився до 16 бар. Визначити кількість підведеної теплоти. Розрахунки провести для двох випадків: а) теплоємність повітря враховувати нелінійно залежною від температури; б) теплоємність повітря враховувати незалежною від температури. Визначити похибку розрахунку теплоємності за двома методами.

Рішення. Зі співвідношення параметрів ізохорного процесу (газ знаходиться в замкнутому сосуді) визначаємо кінцеву температуру повітря:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К}; \quad t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{С}.$$

Масу повітря, яка знаходиться в сосуді, визначаємо із рівняння Клапейрона (газова постійна R , додаток А):

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг}.$$

Для розрахунку теплоємності за першим методом (нелінійна залежність від температури) знаходимо теплоємність повітря в інтервалі температур від 0°С до 30°С та від 0°С до 333°С (додаток Б, табл. Б.2)

$$\bar{c}_v \Big|_{0^\circ\text{С}}^{30^\circ\text{С}} = 0,717 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad \bar{c}_v \Big|_{0^\circ\text{С}}^{333^\circ\text{С}} = 0,735 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо середню масову теплоємність повітря при постійному об'ємі для інтервалу температур від 30 до 333°С :

$$\bar{c}_v \Big|_{30^\circ\text{С}}^{333^\circ\text{С}} = \frac{0,735 \cdot 333 - 0,717 \cdot 30}{333 - 30} = 0,7368 \text{ кДж}.$$

Кількість теплоти, яка підведена до повітря, дорівнює

$$Q = 0,8278 \cdot 0,7368(333 - 30) = 184,8 \text{ кДж}.$$

Для розрахунку теплоємності за другим методом (теплоємність не залежить від температури) теплоємність повітря розраховуємо за формулою

$$\bar{c}_v = \frac{R}{k - 1}.$$

Газову постійну знаходимо за додатком А. Показник адіабати дорівнює $1,4$ (повітря – двоатомний газ). Розраховуємо теплоємність:

$$\bar{C}_v = \frac{287}{1,4 - 1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Кількість теплоти, яку підведено до повітря, дорівнює

$$Q = 0,8278 \cdot 717,5 (333 - 30) = 179966 \text{ Дж.}$$

Відносна похибка розрахунку теплоємності за двома методами складає

$$\delta = \frac{736,8 - 717,5}{736,8} \cdot 100 = 2,6 \%.$$

Приклад 1.6. Повітря об'ємом 0,01 м³ при тиску 2 бар і температурі 25°C розширюється до тиску 1 бар. Визначити кінцевий об'єм, кінцеву температуру, роботу, яку виконує газ, підведене тепло, якщо розширення здійснюється за: 1) ізотермою, 2) адіабатою, 3) політропою з показником політропи $n = 1,3$.

Рішення. 1) Ізотермічне розширення

Зі співвідношення параметрів ізотермічного процесу визначаємо кінцевий об'єм:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} = 0,01 \cdot \frac{2}{1} = 0,02 \text{ м}^3.$$

Процес здійснюється при $T = \text{const}$, тому кінцева температура дорівнює початковій:

$$t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}.$$

Визначаємо роботу ізотермічного процесу розширення:

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot \ln 2 = 1386 \text{ Дж.}$$

Кількість підведеної теплоти згідно з першим законом термодинаміки дорівнює роботі тому, що внутрішня енергія не змінюється.

2) Адіабатне розширення.

Адіабатним називають процес, який здійснюється без теплообміну з навколишнім середовищем, тобто $Q=0$.

Кінцевий об'єм визначаємо із співвідношення параметрів процесу (для двоатомного газу показник адіабати дорівнює 1,4):

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 2^{\frac{1}{1,4}} = 0,016 \text{ м}^3.$$

Кінцева температура повітря зі співвідношення параметрів процесу:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 244 \text{ К}; \quad t_2 = -29^\circ \text{ С}.$$

Визначаємо роботу адіабатного процесу розширення:

$$L = \frac{1}{1,44 - 1} \cdot (2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,016) = 46000 \text{ Дж}.$$

3) Політропне розширення.

Кінцевий об'єм визначаємо із співвідношення параметрів процесу:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 2^{\frac{1}{1,3}} = 0,017 \text{ м}^3.$$

Кінцева температура повітря із співвідношення параметрів процесу:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} = 253 \text{ К}; \quad t_2 = -19^\circ \text{ С}.$$

Визначаємо роботу адіабатного процесу розширення:

$$L = \frac{1}{1,3 - 1} \cdot (2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,017) = 60939 \text{ Дж}.$$

Визначаємо кількість підведеної теплоти (без урахування впливу температури на теплоємність):

$$Q = \frac{R}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1} (253 - 298) = 10645 \text{ Дж.}$$

Для закріплення матеріалу заняття рекомендується самостійно розрахувати задачі № 1.1–1.10.

Завдання для самостійного розв'язання.

Тема № 1.

Задача 1.1. Визначити питомий об'єм і густину азоту, якщо надлишковий тиск $P_{над}=0,2$ ат, температура $t=127^\circ\text{C}$, а барометричний тиск $P_{атм}=780$ мм рт.ст.

Відповідь: $v=0,96$ м³/кг, $\rho=1,04$ кг/м³.

Задача 1.2. Об'єм вуглекислого газу при $P=5$ ат и $t=120^\circ\text{C}$ складає $V=3$ м³. Привести об'єм газу до нормальних умов.

Відповідь: $V_n=10,1$ м³.

Задача 1.3. При якій температурі густина азоту (тиск 1,5 МПа) буде дорівнювати 3 кг/м³?

Відповідь: $t = 1412^\circ\text{C}$.

Задача 1.4. Маса порожнього балона для кисню ємністю 50 л дорівнює 80 кг. Визначити масу балона після заповнення його киснем при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ до тиску 100 бар.

Відповідь: $m = 86,57$ кг.

Задача 1.5. У балоні ємністю 80 л знаходиться повітря під тиском 10000 кПа та температурі 27°C . Після використання частини повітря для пуску двигуна тиск зменшився до 5000 кПа, а температура упала до 17°C . Визначити масу використаного повітря.

Відповідь: $m = 4,5$ кг.

Задача 1.6. Визначити абсолютний тиск у паровому котлі, якщо манометр показує 2,45 бар, а атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює 700 мм рт.ст. при $t = 20^\circ\text{C}$.

Відповідь: $P = 3,38$ бар.

Задача 1.7. Приєднаний до газоходу парового котла тягомір показує розрядження, яке дорівнює 80 мм вод.ст. Визначити абсолютний тиск димових газів, якщо показання барометра при температурі 0°C дорівнює 770 мм рт.ст.

Відповідь: $P = 101856$ Па.

Задача 1.8. Визначити масу кисню, що міститься в балоні ємністю 60 л, якщо тиск кисню за манометром дорівнює 10,8 бар, а показання ртутного барометра – 745 мм рт.ст. при температурі 25°C .

Відповідь: $m = 0,91$ кг.

Задача 1.9. До якого тиску за манометром необхідно стиснути суміш, яка містить за об'ємом 18% , 12% O_2 , 70% , щоб при температурі $t=180^\circ\text{C}$ 8 кг цієї суміші займали $V=4 \text{ м}^3$? Атмосферний тиск взяти $P_{\text{атм}}=760 \text{ мм рт.ст.}$ при температурі 0°C .

Відповідь: $P_{\text{над}}=142 \text{ кПа}$.

Задача 1.10. Знайти середню теплоємність C_p і C_v в інтервалі температур від $t_1=200^\circ\text{C}$ до $t_2=800^\circ\text{C}$ для азоту, вважаючи, що залежність $C=f(t)$ є лінійною.

Відповідь: $C_p=1,068 \text{ кДж/(кг К)}$, $C_v=0,965 \text{ кДж/(м}^3 \text{ К)}$.

Тема 2. Властивості реальних газів. hs-Діаграма водяної пари. Розрахунки процесів з реальними газами.

Приклад 2.1. Визначити параметри водяної пари, якщо тиск $P=10 \text{ бар}$, ступінь сухості $x=0,95$.

Рішення. Користаючись hs-діаграмою, знаходимо точку 1, що характеризує даний стан пари (Додаток 2). Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії $h_1=2675 \text{ кДж/кг}$. Проектуючи цю ж точку на вісь абсцис, знаходимо значення ентропії $s_1=6,38 \text{ кДж/кг }^\circ\text{К}$.

Для визначення температури пари знаходимо температуру насичення пари при заданому тиску. Для цього шукаємо точку 2 перетинання ізобари 10 бар з верхньою межевою кривою. Через цю точку проходить ізотерма 180°C ; це і є температура пари, яка характеризує будь-яку точку в області насиченої пари, що належить цієї ізобари.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою hs-діаграми $v_1=0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ (Додаток 2). Значення u знаходимо за формулою

$$u=h-Pv=2675000-1000000 \cdot 0,2=2475000 \text{ Дж/кг.}$$

Приклад 2.2. Визначити параметри водяної пари і ступінь її перегріву, якщо $P=20 \text{ бар}$, $t=350^\circ\text{C}$.

Рішення. Користаючись hs-діаграмою, знаходимо точку 3, що характеризує даний стан пари, на перетинанні ізобари 20 бар та ізотерми 350°C (Додаток 2). Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії

$h_3=3140$ кДж/кг. Проектуючи цю ж точку на вісь абсцис, знаходимо значення ентропії $s_3=6,95$ кДж/кг °С.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_3=0,14$ м³/кг. Значення u_3 знаходимо за формулою

$$u=h-Pv=3140000-2000000 \cdot 0,14=2860000 \text{ Дж/кг.}$$

Для визначення ступеня перегріву знаходимо температуру насичення при заданому тиску. Це значення ізотерми, яка проходить через точку **4** – точку перетинання ізобари 20 бар з кривою насичення, тобто кривою сухої насиченої пари. Значення цієї ізотерми 215 °С. Звідси ступінь перегріву дорівнює

$$\Delta t=350-215=135 \text{ °С.}$$

Приклад 2.3. 2 м³ пари розширюються за адіабатою від початкових параметрів стану $P_n=5$ бар і $t_n=450$ °С до $P_k=0,01$ МПа. Знайти значення ентальпії і питомого об'єму в початковому і кінцевому станах, ступінь сухості в кінцевій точці і роботу пари в процесі.

Рішення. За допомогою h_s -діаграми знаходимо точку, що характеризує початковий стан пари, – точка **5** (Додаток 2). Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії $h_5=3375$ кДж/кг.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_5=0,65$ м³/кг.

Адіабатний процес на h_s -діаграмі зображується вертикальною лінією. Тому кінцеву точку процесу **6** знаходимо на перетинанні вертикальної лінії, яку проведено із точки **5**, з ізобарою $P=0,1$ бар. Проектуючи точку **6** на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії в кінцевій точці $h_6=2520$ кДж/кг.

Ступінь сухості у кінцевому стані знаходимо за допомогою ліній постійного ступеня сухості $x_6=0,97$.

Значення кінцевого питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_6=15$ м³/кг і ступеня сухості

$$v_k = v_6 \cdot x_6 = 15 \cdot 0,97 = 14,55 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Внутрішню енергію розраховуємо аналітично:

$$u_n = 3375000 - 500000 \cdot 0,65 = 3050000 \text{ Дж/кг}.$$

$$u_k = 2525000 - 10000 \cdot 14,55 = 2379000 \text{ Дж/кг}.$$

Робота пари у адіабатному процесі дорівнює зміні внутрішньої енергії з оборотним знаком. Тому розраховуємо її за формулою

$$L = ml = -m\Delta u = -\frac{V}{v_n}(u_k - u_n) = \frac{V}{v_n}(u_n - u_k);$$

$$L = \frac{2}{0,65}(3050000 - 2379000) = 2076923 \text{ Дж}.$$

Приклад 2.4. Перегріта пара з тиском $P_n=100$ бар і температурою 600°C дроселюється до $P_k=5$ бар. Визначити, як зміняться ентальпія, ентропія і питомий об'єм пари в цьому процесі.

Рішення. Процес дроселювання зображується на h_s -діаграмі горизонтальною лінією. Для визначення кінцевої точки процесу проводимо горизонталь з точки 7 до перетинання з ізобарою $P=5$ бар (Додаток 2).

Зміна ентальпії при дроселюванні дорівнює нулю.

Ентропію початкового і кінцевого станів визначаємо, проектуючи точки 7 і 8 на вісь абсцис $s_n=6,90$ кДж/кгК, $s_k=8,28$ кДж/кгК.

$$\Delta s = 8,28 - 6,9 = 1,38 \text{ кДж/кгК}.$$

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_n=0,038$ м³/кг, $v_k=0,8$ м³/кг.

$$\Delta v = 0,8 - 0,038 = 0,762 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Приклад 2.5. На одержання пари з тиском $P=75$ ат витрачено теплоту кількістю 480 ккал/кг. Визначити стан пари і її густину, якщо пара отримана з води з температурою 150°C.

Рішення. Ентальпія киплячої води при температурі 150 оС (табл. Д.1 додатка Д) складає $h'=632,2$ кДж/кг.

Ентальпія пари

$$h=h'+q=632,2+480\cdot4,186=2641,5 \text{ кДж/кг.}$$

Водяна пара при тиску 75 ат (7,5 МПа) має наступні характеристики (додаток 2):

$$h'=1231 \text{ кДж/кг; } h''=2758,6 \text{ кДж/кг; } r=1492 \text{ кДж/кг; } \rho''=38,6 \text{ кг/м}^3.$$

Порівнюючи ентальпію отриманої пари h з ентальпією сухої пари h'' , встановлюємо, що це волога пара.

Ступінь сухості пари визначаємо за рівнянням

$$x = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{2641,5 - 1231}{1492} = 0,94.$$

Густина отриманої пари

$$\rho_x = \frac{\rho''}{x} = \frac{38,6}{0,94} = 41,06 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 2.6. У посудині об'ємом 0,75 м³ знаходиться суха насичена пара під тиском 1 МПа. Пара підігрівається при незмінному об'ємі, і наприкінці нагрівання її тиск підвищується до 1,4 МПа. Визначити кількість витраченого на нагрівання тепла.

Рішення. Суха насичена пара при $P=1$ МПа має питомий об'єм $v''=0,1945$ м³/кг і ентальпію $h''=2777,8$ кДж/кг (додаток 2). Отже, її внутрішня енергія

$$u'' = h'' - P_1 v'' = 2777,8 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,1945 = 2583,3 \text{ кДж/кг}.$$

Наприкінці нагрівання пара буде перегрітою, причому її ентальпія буде дорівнювати 3190 кДж/кг (визначена за допомогою *hs*-діаграми (додаток Г) для точки перетинання ізохори $v=0,19$ мз/кг з ізобарою $P=14$ бар).

Внутрішня енергія перегрітої пари

$$u = h - P_2 v = 3190 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1945 = 2906,3 \text{ кДж/кг}.$$

Маса пари в посудині

$$m = \frac{V}{v''} = \frac{0,75}{0,1945} = 3,85 \text{ кг}.$$

Визначаємо теплоту, яку було витрачено на нагрівання

$$Q = m (u - u'') = 3,85 \cdot (2906,3 - 2583,3) = 1244 \text{ кДж}.$$

Для закріплення матеріалу заняття рекомендується самостійно розрахувати задачі № 2.1–2.8.

Завдання для самостійного розв'язання.

Тема № 2.

Задача 2.1. Перегріта водяна пара з початковим тиском $P_1=0,1$ МПа і початковою температурою $t_1=230^\circ\text{C}$ стискається ізотермічно до ступеня сухості $x_2=0,85$. Визначити параметри пари в початковому і кінцевому ста-нах, кількість відведеної теплоти від пари, зміну внутрішньої енергії і ро-боту стиску. Зобразити тепловий процес на *hs*-діаграмі.

Відповідь: $P_2=0,28$ МПа; $v_1=0,23$ мз/кг; $v_2=0,06$ мз/кг; $h_1=2900$ кДж/кг; $h_2=2530$ кДж/кг; $q=370$ кДж/кг; $\Delta u=-364$ кДж/кг; $l=594$ кДж/кг.

Задача 2.2. До якого тиску має бути зроблене дроселювання перегрі-тої водяної пари з початковим тиском $P_1=10$ МПа і початковою температу-рою $t_1=400^\circ\text{C}$, щоб питомий об'єм пари збільшився у 1,5 рази. Визначити зменшення

температури при дроселюванні, зміну питомої ентропії 1 кг па-ри. Зобразити тепловий процес на h_s -діаграмі.

Відповідь: $P_2=7$ МПа; $\Delta t=25$ °С; $\Delta s=0,15$ кДж/кгК.

Задача 2.3. Тиск пари дорівнює 4 ат, питомий об'єм 0,421 м³/кг. Яким буде питомий об'єм при тому ж тиску, якщо пара буде сухою насиченою? Яким буде тиск пари при тому ж питомому об'ємі, якщо пара буде сухою насиченою?

Відповідь: $v=0,4708$ м³/кг; $P=0,45$ МПа.

Задача 2.4. Задано параметри водяної пари $P=6$ ат, $s=6$ кДж/кгК. Визначити стан пари і за допомогою h_s -діаграми знайти її параметри.

Відповідь: $v=0,3$ м³/кг; $t=155$ °С; $h=2425$ кДж/кг.

Задача 2.5. Для водяної пари з параметрами $P=10$ ат і $t=220$ °С визначити за допомогою h_s -діаграми ентальпію, ентропію, питомий об'єм, температуру насичення і ступінь перегріву.

Відповідь: $v=0,22$ м³/кг; $h=2980$ кДж/кг; $s=7$ кДж/кгК; $t_u=180$ °С; $\Delta t=40$ °С.

Задача 2.6. 1 кг водяної пари нагрівається при постійному тиску. Початкові параметри пари $P=10$ ат, $x=0,95$. Кінцева температура пари $t=250$ °С. Визначити $h_1, u_1, v_1, t_1, h_2, v_2, q, \Delta u$.

Відповідь: $h_1=2680$ кДж/кг; $u_1=2490$ кДж/кг; $v_1=0,19$ м³/кг; $t_1=180$ °С; $h_2=2945$ кДж/кг; $v_2=0,23$ м³/кг; $q=265$ кДж/кг; $\Delta u=225$ кДж/кг.

Задача 2.7. Визначити тепло, що йде на перегрів пари в паропере-грівачеві котла, якщо до надходження в нього пара має тиск 60 бар і воло-гість 0,5%, а кінцева температура пари 500°С. Знайти також роботу пари

Задача 2.8. Процес відбувається при незмінній 20%-ій вологості пари від початкового тиску 1 бар до кінцевого 20 бар. Знайти за величиною і знаком теплоту, зміну внутрішньої енергії і роботу процесу.

Відповідь: $q=-250,1$ кДж/кг; $\Delta u=173,5$ кДж/кг; $l=-424000$ кДж/кг.

Тема № 3. Розрахунки теплообмінних апаратів. Розрахунки циклів ГТУ та ДВЗ.

Приклад 3.1. Визначити швидкість витікання азоту, якщо $P_1 = 70$ ат, $P_2=45$ ат, $t_1=50$ °С.

Рішення. Знаходимо відношення кінцевого і початкового тисків:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{45}{70} = 0,64.$$

Порівнюємо його з $\beta_{кр}$, яке дорівнює 0,528, так як азот є двоатомним газом. Так як $\beta > \beta_{кр}$, то швидкість визначаємо за рівнянням

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Питомий об'єм визначаємо з рівняння Клапейрона

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{296,8 \cdot 323}{70 \cdot 0,981 \cdot 10^5} = 0,014 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Розраховуємо швидкість:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot 70 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \cdot 0,014 \times \left[1 - \left(\frac{45}{70} \right)^{0,286} \right]} = 280 \text{ м/с}.$$

Приклад 3.2. Перегріта водяна пара при $P_1=100$ ат і $t_1=500^\circ\text{C}$ витікає до середовища з $P_2=2$ ат. Витрата пари $G=3$ кг/с. Визначити швидкість витікання і площу перерізу насадки.

Рішення. Визначаємо, яке сопло треба взяти для даного випадку витікання. Так як

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2}{100} < \beta_{кр} = 0,546,$$

то для повного використання потенційної енергії пари треба взяти сопло Лавалю.

За допомогою hs -діаграми для витікання за адіабатою визначаємо ентальпії пари у початковому і кінцевому станах:

$$h_1 = 3375 \text{ кДж/кг}; \quad h_2 = 2500 \text{ кДж/кг}.$$

Знаходимо швидкість витікання:

$$\omega = 44,76 \sqrt{3375 - 2500} = 1324 \text{ м/с}.$$

Для вихідного перерізу знаходимо:

$$v_2 = v''_2 x_2 = 0,8 \cdot 0,905 = 0,724 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Площа вихідного перерізу визначаємо за рівнянням

$$f = \frac{Gv_2}{\omega} = \frac{3 \cdot 0,724}{1324} = 0,00164 \text{ м}^2.$$

Задана витрата пари G – максимальна. Величина $f_{\text{мін}}$ визначається за рівнянням

$$Gv_{\text{кр}} = f_{\text{мін}}\omega_{\text{кр}},$$

до якого підставлено значення критичного перерізу, або за рівнянням

$$f_{\text{мін}} = \frac{G}{\sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}}},$$

у якому $f=f_{\text{мін}}$, а $G=G_{\text{мах}}$.

Розраховуємо $f_{\text{мін}}$:

$$f_{\text{мін}} = \frac{3}{\sqrt{2 \frac{1,33}{1,33+1} \left(\frac{2}{1,33+1} \right)^{\frac{2}{1,33-1}} \cdot \frac{100 \cdot 0,981 \cdot 10^5}{0,33}}} = 0,00027 \text{ м}^2.$$

Приклад 3.3. Повітря з резервуару з постійним тиском 100 бар і температурою 15°C витікає до атмосфери через трубку з внутрішнім діаметром 10 мм. Визначити швидкість витікання повітря і його секундну витрату. Зовнішній тиск дорівнює 1 бар. Процес розширення повітря вважати адіабатним.

Рішення. Визначаємо величину β і порівнюємо її з критичним значенням для повітря:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{100} < \beta_{\text{кр}} \approx 0,528.$$

Швидкість витікання буде критичною і визначається за рівнянням

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с.}$$

Визначив площу перетину сопла і початковий питомий об'єм повітря розраховуємо секундну витрату:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2;$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288}{100 \cdot 10^5} = 0,00827 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$G_{max} = 0,0000785 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}} \cdot \frac{100 \cdot 10^5}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с.}$$

Для закріплення матеріалу заняття рекомендується самостійно вирішити задачі № 3.1-3.3.

Завдання для самостійного розв'язання.

Тема № 3.

Задача 3.1. Визначити кількість підведеного і відведеного тепла, роботу стиснення, роботу розширення, корисну роботу і ККД циклу попередньої задачі. Порівняти ККД даного циклу з ККД циклу Карно, що протікає в тім же інтервалі температур. Визначити також потужність, якщо витрати повітря 10 кг/год. Прийняти, що теплоємність є постійною.

Відповідь: $q_1=1230$ кДж/кг; $q_2=570$ кДж/кг; робота стиснення $l=301$ кДж/кг; робота розширення $l=962$ кДж/кг; $l_u=282000$ кДж/кг; $N=110$ кВт; $t=0,538$; для циклу Карно $\eta_t=0,856$; $\Delta=37\%$.

Задача 3.2. Визначити параметри точок, кількість підведеного і відведеного тепла, ККД, роботу циклу і потужність при витраті повітря 5 кг/с термічного циклу ГТУ з підведенням теплоти при постійному тиску, якщо $P_1=0,93$ бар, $t_1=27^\circ\text{C}$, $v_3/v_2=1,5$, $P_2/P_1=4$, робоче тіло – сухе повітря, теплоємності C_p і C_v прийняти постійними.

Відповідь: $v_1=0,923$ мз/кг; $P_1=0,93$ бар; $T_1=300$ К; $v_2=0,342$ мз/кг; $P_2=3,73$ бар; $T_2=444$ К; $v_3=0,513$ мз/кг; $P_3=3,73$ бар; $T_3=666$ К; $v_4=1,385$ мз/кг; $P_4=0,95$ бар; $T_4=450$ К; $q_1=223$ кДж/кг; $q_2=151$ кДж/кг; $l_u=72$ кДж/кг; $N=360$ кВт.

Задача 3.3. Для циклу ГТУ з підведенням теплоти при постійному об'ємі визначити параметри точок, кількість підведеного тепла, ККД і потужність при витраті повітря 3 кг/с, якщо $P_1=0,98$ бар, $t_1=20^\circ\text{C}$, $P_2=0,98$ бар, $t_2=20^\circ\text{C}$, $P_2/P_1=3$, робоче тіло – сухе повітря, теплоємності C_p і C_v прийняти постійними, показник адіабати $k=1,4$.

Відповідь: $P_1=0,98$ бар; $T_1=293$ К; $v_1=0,857$ мз/кг; $P_2=2,94$ бар; $T_2=401$ К; $v_2=0,392$ мз/кг; $P_3=2,94$ бар; $T_3=682$ К; $v_3=0,392$ мз/кг; $P_4=0,98$ бар; $T_4=426$ К; $v_4=1,2$ мз/кг; $q_1=201$ кДж/кг; $\eta_t=0,333$; $N=200$ кВт.

4. ІНДИВІДУАЛЬНІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ

Загальні вимоги до виконання розрахункових завдань.

Для більш глибокого засвоєння матеріалу курсу кожний студент виконує індивідуальні розрахунки згідно з варіантом, який визначає викладач. Бали за кожну розрахункову роботу складаються з 3-х частин:

- оцінка за якість розрахунків та оформлення роботи;
- оцінка за строк виконання роботи;
- оцінка за захист роботи – перевірка рівня засвоєння теоретичного матеріалу за темою.

Захист розрахункових робіт здійснюється на практичних заняттях за допомогою тестів.

Індивідуальні роботи оформлюються на окремих аркушах паперу. Обов'язково вказувати прізвище та групу студента, номер варіанта, який задається викладачем. При рішенні задач потрібно обґрунтовувати вибір формул для розрахунків. Обов'язково вказувати одиниці вимірювання усіх величин. Строк подання роботи встановлює викладач.

Для полегшення виконання індивідуальних робіт в посібнику наведені приклади рішення задач.

Завдання № 1 Термодинамічні процеси ідеальних газів.

Вважаючи теплоємність газів лінійно залежною від температури, визначити:

- параметри газу в початковому та кінцевому стані (P, V, T),
- зміну внутрішньої енергії та ентропії ($\Delta U, \Delta S$),
- роботу розширення L ,
- теплоту, яка бере участь у процесі, Q .

Побудувати процес на PV - та TS -діаграмах.

Примітка. При виконанні завдання потрібно використовувати дані додатків 1 та 2.

Вихідні дані наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. – Вихідні дані для завдання 1.

Перша цифра варіанту	Газ	P_1 , МПа	m , кг	Друга цифра варіанта	Процес	t_1 , °C	t_2 , °C
0	O_2	1	2	0	Ізохорний	2400	400
1	N_2	4	5	1	Ізобарний	2200	300
2	H_2O	2	10	2	Адіабатний	2000	300
3	N_2	3	4	3	Ізохорний	1800	500
4	CO	5	6	4	Ізобарний	1600	400
5	CO_2	6	8	5	Адіабатний	1700	100
6	N_2	8	3	6	Ізохорний	1900	200
7	H_2O	10	12	7	Адіабатний	2100	500
8	O_2	12	7	8	Ізобарний	2300	300
9	CO	7	9	9	Ізохорний	1500	100

Завдання № 2. hs -Діаграма водяної пари. Дроселювання.

Водяна пара має початкові параметри $P_1 = 5$ МПа та $x_1 = 0,9$. Вона нагрівається при постійному тиску до температури t_2 , а потім дроселюється до тиску P_3 . При тиску P_3 пара попадає до сопла Лавалля, де розширюється до тиску $P_4 = 5$ кПа.

Користуючись hs -діаграмою, визначити:

- кількість теплоти, яку необхідно підвести до пари для нагрівання її до температури t_2 ;
- зміну внутрішньої енергії на кожному етапі;
- кінцеву температуру t_3 в процесі дроселювання;
- кінцеві параметри та швидкість на виході із сопла;
- витрату пари при розширенні від P_3 до P_4 .

Усі процеси побудувати на hs -діаграмі.

Вихідні дані наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. – Вихідні дані

Перша цифра варіанта	P_3 , МПа	Площа перерізу сопла f_{min} , см ²	Друга цифра варіанта	t_2 , °С
0	1,4	10	0	300
1	1,3	20	1	330
2	1,2	30	2	370
3	1,1	40	3	400
4	1,0	50	4	420
5	0,9	60	5	460
6	0,8	70	6	500
7	0,7	80	7	570
8	0,6	90	8	550
9	0,5	100	9	600

Література

1. Дідур В. А., Стручаєв М. І. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві : посібник / за ред. В. А. Дідура. Київ : Аграрна освіта, 2017. 233 с.
2. Теплотехніка : методичні вказівки для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою навчання студентів біолого-технологічного факультету / уклад. М. М. Сенчук. Біла Церква, 2017. 179 с.
3. Герасимов Г. Г. Теоретичні основи теплотехніки : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2016. 382 с.
4. Обертюх Р. Р., Слабкий А. В. Теоретичні основи теплотехніки : навчальний посібник. 2-ге вид., перероб. та доп. Вінниця : ВНТУ, 2020. 180 с. URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/586/1066/2148-1?inline=1>
5. Теплотехнічні вимірювання та прилади : лабораторний практикум. Харків : ХДУХТ, 2018. 74 с. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/4804/1/teplotech_vym_ta_prylady.pdf
6. Клименко В. В., Кравченко В. І., Телюта Р. В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках : навчальний посібник. Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2020. 219 с.
7. Халатов А. А., Гільчук А. В., Кохтич Л. М. Термодинаміка газового потоку : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 219 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28454/1/Termodynamika_hazovoho_potoku.pdf

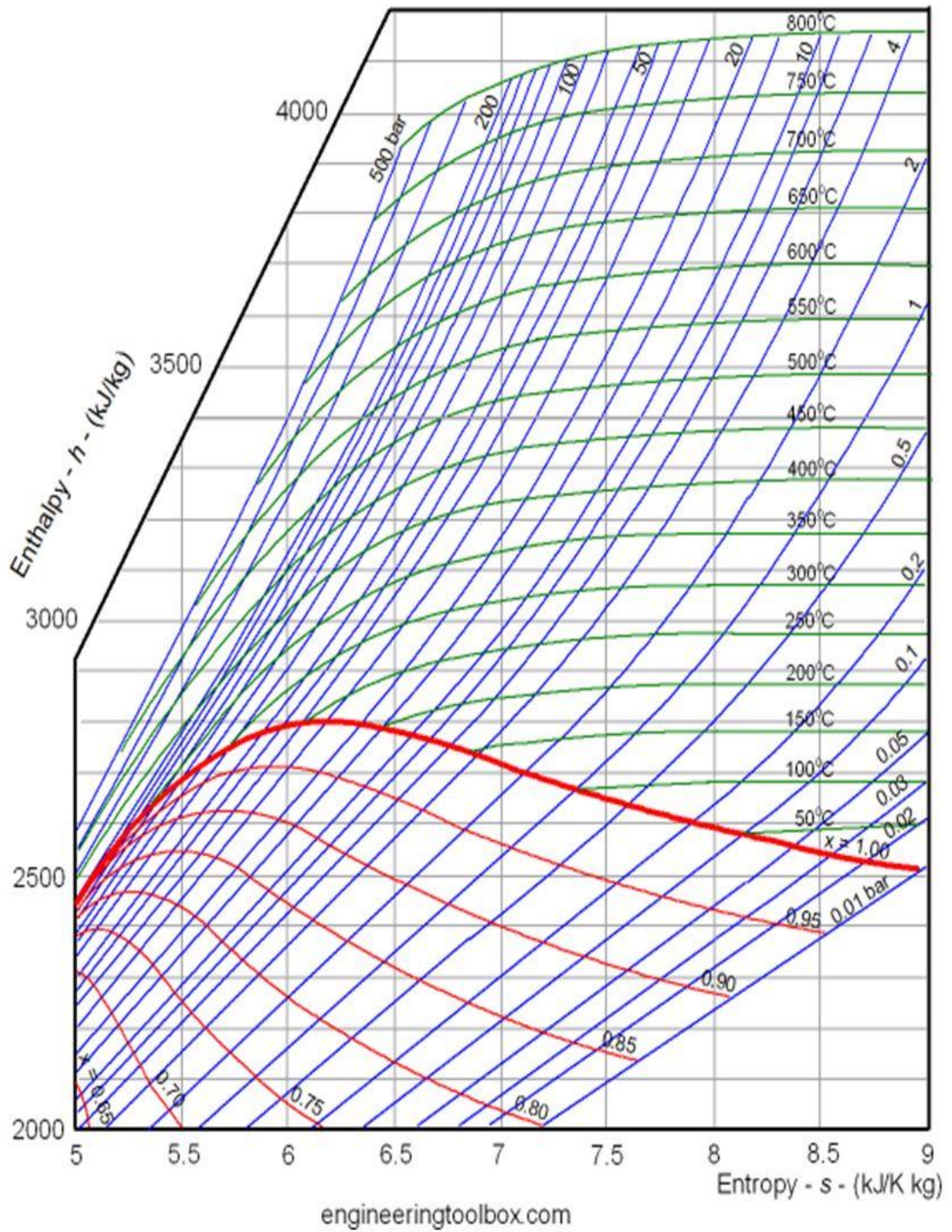
Додаток 1.

Таблиця А.1 – Фізичні властивості деяких газів

Газ	Хімічна формула	Відносна молекулярна маса, кг/кмоль	Газова постійна, Дж/(кг·К)	Густина газу, кг/м ³
Нітроген	N_2	28	296,8	1,250
Аміак	NH_3	17	488,2	0,771
Ацетилен	C_2H_2	26	320	1,171
Бензол	C_6H_6	78,1	106	-
Бутан	C_4H_{10}	58,1	143	2,673
Водень	H_2	2	4124,3	0,090
Водяна пара	H_2O	18	461,6	0,804
Двоокис азоту	NO_2	46	181	-
Двоокис вуглецю	CO_2	44	189	1,977
Двоокис сірки	SO_2	64,1	130	2,93
Етан	C_2H_6	30,1	277	1,36
Етилен	C_2H_4	28,1	297	1,26
Кисень	O_2	32	259,8	1,429
Метан	CH_4	16	519	0,72
Окис вуглецю	CO	28	296,8	1,250
Повітря	—	28,96	287	1,293
Пропан	C_3H_8	44,1	189	2,02
Пропилен	C_3H_6	42,1	198	1,91
Сірководень	H_2S	34,1	244	1,54
Хлор	Cl_2	70,9	117	3,22
Аргон	Ar	40		208,2

Додаток 2.

hs-Діаграма водяної пари.



Додаток 3.

Таблиця Д.1 - Суха насичена пара і вода на кривій насичення (у залежності від температури)

$t, ^\circ\text{C}$	$P_n,$ МПа	$\nu', \text{м}^3/\text{к}$ Г	$\nu'', \text{м}^3/\text{к}$ Г	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$h',$ кДж/кг	$h'',$ кДж/к Г	$r,$ кДж/к Г	$s',$ кДж/кг К	$s'',$ кДж/кг К
0	0,0006 108	0,0010 002	206,3	0,0048 47	0	2500,8	2500,8	0	9,1644
10	0,0012 271	0,0010 004	106,42	0,0093 98	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
20	0,0023 37	0,0010 018	57,84	0,0172 9	83,9	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,0042 41	0,0010 044	32,93	0,0303 6	125,69	2555,6	2430	0,4367	8,4523
40	0,0073 75	0,0010 079	19,55	0,0511 5	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,256
50	0,0123 35	0,0010 121	12,05	0,0830 2	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,0199 2	0,0010 171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358	0,8311	7,9084
70	0,0311 6	0,0010 228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,955	7,7544
80	0,4736	0,0010 29	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,0701 1	0,0010 359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,1013 2	0,0010 435	1,673	0,5977	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
120	0,1985 4	0,0010 603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
140	0,3614	0,0010 798	0,5087	1,966	589,1	2734	2144,9	1,7392	6,9304
160	0,618	0,0011 021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
180	1,0027 275	0,0011 275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
200	1,555 565	0,0011 565	0,1272	7,863	852,4	2793	1940,6	2,3308	6,4318
220	2,3202	0,0011 900	0,0860 6	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
240	3,348	0,0012 291	0,0596 7	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
260	4,694	0,0012 755	0,0421 5	23,72	1135	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
280	6,419	0,0013 321	0,0301 3	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
300	8,592	0,0014 036	0,0216 4	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
320	11,28 99	0,0014 99	0,0154 5	64,74	1462	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,0015	0,0129	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412

340	14,608	0,0016	0,0107	92,77	1594,8	2621,8	1027	3,6605	5,3361
350	16,537	0,0017	0,0088	113,6	1671,4	2564,6	893	3,7786	5,2117
360	18,674	0,0018	0,0069	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,053
370	21,053	0,0022	0,0049	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
474	22,087	0,0028	0,0034	288	2031,9	2147	114,7	4,3258	4,5029

Додаток 4.

Таблиця Д.2 - Суха насичена пара і вода на кривій насичення (у залежності від тиску)

<i>P</i> , <i>МПа</i>	<i>tн</i> , °C	<i>v</i> ' м3/кг	<i>v</i> " м3/кг	<i>ρ</i> , кг/м3	<i>h</i> ' кДж/кг	<i>h</i> " кДж/кг	<i>r</i> , кДж/кг	<i>s</i> ' кДж/кг К	<i>s</i> " кДж/кг К
0,002	17,486	0,001	67,24	0,0149	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,004	29,95	0,001	34,93	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,006	36,17	0,001	23,77	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,008	41,53	0,001	18,13	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,010	45,82	0,001	14,7	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,001	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,03	69,12	0,001	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,001	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,05	81,33	0,001	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,001	2,734	0,3658	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,08	93,5	0,001	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,001	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,8	0,001	1,43	0,6992	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
0,16	113,31	0,0011	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
0,2	120,23	0,0011	0,886	1,129	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0011	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,4	143,62	0,0011	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,5	151,84	0,0011	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
1	179,88	0,0011	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867

2	212,36	0,0012	0,0996	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
3	233,83	0,0012	0,0666	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
4	250,33	0,0013	0,0498	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5	263,91	0,0013	0,0394	25,39	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
6	275,56	0,0013	0,0324	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7	285,8	0,0014	0,0274	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8	294,98	0,0014	0,0235	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9	303,31	0,0014	0,0205	48,8	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10	310,96	0,0015	0,018	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11	318,04	0,0015	0,016	62,62	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
12	324,64	0,0015	0,0143	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
13	330,81	0,0016	0,0128	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14	330,63	0,0016	0,0115	87,04	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
16	347,32	0,0017	0,0093	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18	356,96	0,0018	0,0075	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20	365,71	0,002	0,0059	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
22	373,7	0,0027	0,0037	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Навчальне видання

Основи теплотехніки

Методичні рекомендації

Укладачі: **Сидорика** Ігор Миколайович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 0,8.
Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

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