

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Методичні вказівки та завдання
до виконання практичних занять та самостійної роботи
для студентів спеціальності
183 «Технології захисту навколишнього середовища»
галузі знань 18 «Виробництво та технологія»

Київ 2023

УДК 627.1

О-75

Укладачі: Н. В. Чепурна, канд. техн. наук, доцент;
М. А. Кириченко, канд. техн. наук, доцент

Рецензент С. В. Барановська, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск О. В. Приймак, д-р техн. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри теплотехніки, протокол
№ 6 від 12 грудня 2022 року.*

В авторській редакції

Основи теплотехніки : методичні вказівки та завдання до виконання
О-75 практичних занять та самостійної роботи / уклад. : Н. В. Чепурна,
М. А. Кириченко. – Київ : КНУБА, 2023. – 56 с.

Містять стислі теоретичні положення, задачі для практичних занять
та самостійної роботи, а також приклади їх розв'язку.

Призначено для студентів спеціальності 183 «Технології захисту
навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології».

Зміст

Загальні положення.....	4
Практичне заняття 1. <i>Розрахунок параметрів стану та характеристик термодинамічних процесів</i>	4
Теоретичні основи.....	4
Приклад розв'язку задач.....	7
Практичне заняття 2. <i>Теплоємність</i>	9
Теоретичні основи.....	
Приклад розв'язку задач.....	11
Практичне заняття 3. <i>Суміші ідеальних газів</i>	12
Теоретичні основи.....	12
Приклад розв'язку задач.....	12
Практичне заняття 4. <i>Визначення характеристик термодинамічних процесів води та водяної пари</i>	14
Теоретичні основи.....	14
Приклад розв'язку задач.....	16
Практичне заняття 5. <i>Розрахунок процесів стаціонарної теплопровідності та теплопередачі крізь одно- та багатoshарову стінку</i>	18
Теоретичні основи.....	18
Приклад розв'язку задач.....	20
Практичне заняття 6. <i>Розрахунок процесів при вільному та вимушеному русі рідини</i>	20
Теоретичні основи.....	20
Приклад розв'язку задач.....	22
Практичне заняття 7. <i>Теплообмін при зміні агрегатного стану</i>	22
Теоретичні основи.....	22
Приклад розв'язку задач.....	23
Практичне заняття 8. <i>Розрахунок теплообмінних апаратів</i>	24
Теоретичні основи.....	24
Задачі до практичного заняття № 1.....	26
Задачі до практичного заняття № 2.....	27
Задачі до практичного заняття № 3.....	28
Задачі до практичного заняття № 4.....	28
Задачі до практичного заняття № 5.....	29
Задачі до практичного заняття № 6.....	30
Задачі до практичного заняття № 7.....	30
Задачі для самостійної роботи.....	31
Питання для самоперевірки.....	38
Приклади тестових завдань.....	41
Список літератури.....	43
<i>Додаток 1</i>	44
<i>Додаток 2</i>	47
<i>Додаток 3</i>	48
<i>Додаток 4</i>	50
<i>Додаток 5</i>	51
<i>Додаток 6</i>	52
<i>Додаток 7</i>	53
<i>Додаток 8</i>	54
<i>Додаток 9</i>	55

Загальні положення

«Основи теплотехніки» – навчальний курс, в якому вивчаються закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, властивості тіл, що беруть участь у цьому перетворенні, методи отримання, передачі та використання теплоти, а також принцип дії, конструктивні особливості й методи розрахунку теплових машин і апаратів.

Для встановлення найбільш раціональних способів використання теплоти, аналізу економічності робочих процесів теплового устаткування, комбінування цих процесів і створення нових найдосконаліших типів теплових агрегатів необхідне глибоке вивчення теоретичних основ теплотехніки, що дають змогу майбутньому інженеру творчо застосовувати на практиці науково обґрунтовані методи раціонального і економічного споживання енергетичних ресурсів та ефективного захисту навколишнього середовища від забруднення його продуктами згоряння палива, самостійно знаходити оптимальні рішення актуальних виробничих теплоенергетичних і теплотехнічних задач.

Теоретичними розділами теплотехніки, в яких розглядаються закони перетворення і властивості теплової енергії й процеси переносу і розповсюдження теплоти, є технічна термодинаміка і теорія теплообміну.

Інженер-будівельник на кожному кроці своєї діяльності має пам'ятати про енергозбереження, екологічну й економічну безпеку. Без знання основ її теплотехніки неможливе впровадження жодного будівельного проєкту.

Практичні заняття проводяться з метою закріплення, розширення та поглиблення теоретичних знань та навичок, які одержав студент на лекціях та лабораторних заняттях. Студенти мають вміти самостійно розв'язувати задачі.

Практичне заняття 1

Тема: Розрахунок параметрів стану та характеристик термодинамічних процесів

Теоретичні основи

Термодинамічний стан – сукупність термодинамічних властивостей робочого тіла, що визначаються термодинамічними параметрами. Є дві групи термодинамічних параметрів: термічні і калоричні параметрами стану. У термодинаміці насамперед розглядають рівноважні термодинамічні стани, які змінюються лише під впливом зовнішньої енергетичної дії і за яких по всій масі робочого тіла параметри зберігають однакове значення.

Термічні параметри стану

Абсолютний тиск (P, Па) – параметр стану робочого тіла, під яким ми розуміємо вплив молекул середовища на стінки твердої оболонки, в якій міститься певне робоче тіло. Тиск вимірюється $[Н/м^2] = [Па]$. Співвідношення між одиницями тиску різних систем одиниць наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення	Фізична атмосфера, атм	Технічна атмосфера, ат = кг/см ²	Тиск, бар	Тиск, міліметри ртутного стовпчика
1 атм	1	1,0382	1,0132	760,0
1 ат	0,9678	1	0,9807	735,5
1 бар = 10 ⁵ Па	0,9869	1,0197	1	750,1
10 ³ мм.рт.ст.	1,3158	1,3595	1,332	1000.0

Абсолютний тиск атмосферного повітря вимірюється барометром і називається барометричним тиском. У вимірюваннях тиску газів, ізольованих від атмосфери користуються манометрами, які показують різницю між абсолютним тиском $P_{абс}$ в місті вимірювання і зовнішнім атмосферним (барометричним) тиском. Це є надлишковий (манометричний) тиск.

$$P_{абс} = P_{надл} + P_{бар} \Rightarrow P_{надл} = P_{абс} - P_{бар}.$$

Якщо тиск у сосуді менше атмосферного, то маємо розрідження, або вакуум.

$$P_{вак} = P_{бар} - P_{абс}.$$

Абсолютна температура (T, K) – термодинамічний параметр, який визначає стан робочого тіла і є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху молекул робочого тіла, $T [K] = t [^{\circ}C] + 273,15$.

Питомий об'єм (v , м³/кг) – об'єм робочого тіла, маса якого дорівнює 1 кг. Якщо V – об'єм в м³, який займає тіло масою в m кг, то питомий об'єм:

$$v = \frac{V}{m}, \quad \frac{м^3}{кг}.$$

Величина обернена питомому об'єму називається густиною – маса 1 м³ тіла:

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{m}{V}, \quad \frac{кг}{м^3}.$$

Калоричні параметри стану:

Питома внутрішня енергія – u , Дж/кг;

Питома ентальпія – h , Дж/кг;

Питома ентропія – s , Дж/(кг·К).

Газоподібні робочі тіла вважаються простими тілами, стан яких характеризується значенням двох параметрів. Усі інші термічні параметри можуть бути представлені як функція цих двох.

Термічне рівняння стану має вигляд:

$$f(p, v, T) = 0.$$

Для ідеального газу ця залежність може бути представлена рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$PV_{\mu} = R_{\mu}T ; \quad (1)$$

$$pv = R T ; \quad (2)$$

$$PV = mR T , \quad (3)$$

де P – абсолютний тиск, Па; V_{μ} – об'єм 1 кмоль газу м³/кмоль;
 $R_{\mu} = 8314$ Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала, однакова для всіх газів;

T – абсолютна температура, К; R -питома газова стала, $R = \frac{R_{\mu}}{\mu}$, Дж/(кг·К),

μ – молярна маса, кг/кмоль.

Задачі дослідження будь-якого термодинамічного процесу – встановлення закономірності зміни параметрів стану робочого тіла і виявлення особливостей перетворення енергії. Для цього необхідно мати: рівняння процесу в pv – координатах, рівняння стану і аналітичний вираз першого закону термодинаміки. На базі цих даних встановлюються залежність між перемінними параметрами в процесі, а з їх допомогою визначаються зміна внутрішньої енергії du , ентальпії dh , ентропії ds між початковим і кінцевим станами процесу, а також термодинамічна робота газу l і зовнішня теплота q , необхідні для здійснення процесу.

Ізохорний, ізотермічний і адіабатний процеси зручно аналізувати, записавши перший закон термодинаміки через внутрішню енергію $\delta q = du + p dv$, звідки витікає, що:

– в ізохорному процесі $v = Const$, $dv = 0$, тоді $\delta q = du$, вся підведена до системи теплота витрачається на зміну внутрішньої енергії робочого тіла;

– в ізотермічному процесі $T = \text{Const}$, вся підведена до системи теплота витрачається на виконання роботи, і цей процес є найвигіднішим з погляду перетворення теплоти в роботу;

– в адіабатному процесі $\delta q = 0$, робота може виконуватись тільки за рахунок зменшення внутрішньої енергії робочого тіла $\delta l = -du$.

Ізобарний процес зручно аналізувати за допомогою рівняння першого закону термодинаміки, записаного у вигляді $\delta q = dh - vdp$. Оскільки $p = \text{Const}$, то $vdp = 0$, отже, в ізобарному процесі підведена до системи теплота дорівнює зміні ентальпії робочого тіла.

Аналізуючи політропний процес, слід звернути увагу на те, що він точніше описує реальні процеси і як узагальнюючий термодинамічний процес, для визначених значень показника політропи n може перетворюватися в будь-який із розглянутих вище окремих термодинамічних процесів. Так, якщо $n = k$, за виключенням виразу для кількості теплоти і зміни ентропії, всі співвідношення між параметрами і вираз для роботи в адіабатному і політропному процесах – ідентичні.

Розрахункові залежності для визначення основних параметрів термодинамічних процесів наведено у дод. 1.

Приклад розв'язку задачі

Повітря, маса якого 1,5 кг при абсолютному тиску 0,4 МПа займає об'єм 0,5 м³. Чому дорівнює температура?

Дано:	Рішення:
Газ - повітря	1. Визначаємо питому газову сталу для повітря за формулою:
$m = 1,5 \text{ кг}$	$R = \frac{R_{\mu}}{\mu}$, де $R_{\mu} = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова
$V = 0,5 \text{ м}^3$	стала, однакова для всіх газів;
$P = 0,4 \text{ МПа}$	$\mu_{\text{пов}} = 28,96 \text{ [кг/кмоль]}$.
$t = ?$	Отже,
	$R_{\text{пов}} = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
	2. Визначаємо температуру повітря з рівняння стану:
	$PV = mR T \Rightarrow T = \frac{PV}{mR} = \frac{0,4 \times 10^6 \times 0,5}{1,5 \times 287} = 464,58 \text{ К}$
	Відповідь: $T = 464,58 \text{ К}$ або $t = 191,4^{\circ}\text{C}$.

Приклад розв'язку задачі

Повітря, маса якого 1,5 кг стискається політропно від 0,9 бар та температурі 18 °С до 10 бар. Водночас температура підвищується до 125 °С. . Визначити кінцевий об'єм, показник політропи, витрачену роботу та кількість відведеної теплоти.

Дано:

Газ - повітря
 $m = 1,5$ кг
 $P_1 = 0,9$ бар =
 0,09МПа
 $T_1 = 291$ К
 $P_2 = 10$ бар = 1МПа
 $T_2 = 398$ К

$V_2 - ?; n - ?; Q - ?;$
 $L - ?$

Рішення:

1. Визначаємо питому газову сталу для повітря за формулою:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} \Rightarrow R_{нов} = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

2. Визначаємо кінцевий об'єм повітря з рівняння стану:

$$P_2 V_2 = m R_{нов} T_2 \Rightarrow V_2 = \frac{m R_{нов} T_2}{P_2} = \frac{1,5 \times 287 \times 398}{1 \times 10^6} = 0,171 \text{ м}^3$$

3. Визначаємо показник політропи за формулою (див. дод.1):

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{1}{0,09}} = 0,13 \Rightarrow n = \frac{1}{1-0,13} = 1,149$$

4. Визначаємо кількість відведеної теплоти за формулою (дод.1):

$$Q = m C_n (t_2 - t_1) = m C_V \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1)$$

$$Q = 1,5 \times \frac{20,8}{28,96} \times \frac{1,149-1,4}{1,149-1} \times (125-18) = -195,4 \text{ кДж}$$

5. Визначаємо витрачену роботу за формулою (див. дод.1):

$$L = \frac{m R_{нов}}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \times 287}{1,149-1} (18-125) = -309,2 \text{ кДж}$$

Відповідь: $V_2 = 0,171 \text{ м}^3; n = 1,149; Q = -195,4 \text{ кДж};$

$L = -309,2 \text{ кДж}$.

Практичне заняття 2

Тема: Теплоємність

Теоретичні основи

Теплоємністю називається кількість теплоти, яку необхідно підвести або відвести від робочого тіла в термодинамічному процесі, щоб змінити його температуру на один градус.

Залежно від температурного інтервалу розрізняють істинну і середню теплоємності. Істинною теплоємністю називається кількість теплоти, віднесена до нескінченно малої зміни температури. Середньою теплоємністю (C_m) називається теплоємність віднесена до кінцевої різниці температур, Дж/град.

У термодинамічних розрахунках розглядається питома теплоємність, віднесена до одиниці кількості речовини. Тому розрізняють такі теплоємності:

- масову теплоємність, віднесену до 1 кг робочого тіла C Дж/(кг×град);
- об'ємну, віднесену до 1 м³ газу за нормальних фізичних умов C' Дж/(м³×град);
- молярну, віднесену до 1 кмоль μC Дж/(кмоль×град).

Масова теплоємність визначається:

$$C = \frac{\mu C}{\mu} = C' \times \nu,$$

а об'ємна теплоємність:

$$C' = \frac{\mu C}{V\mu} = \frac{\mu C}{22,4} = \rho_n \times C$$

де ρ_n – густина газу за нормальних умов.

Теплоємність не є параметром стану робочого тіла і для будь-якого газу залежить від характеру термодинамічного процесу. Оскільки кількість теплоти залежить від характеру процесу, то і теплоємність залежить від умов протікання процесу теплообміну. Практично використовується теплоємність в процесах при сталому об'ємі (C_v) і сталому тиску (C_p).

Між молярними теплоємкостями при сталому об'ємі і сталому тиску існує така залежність:

$$\mu C_p - \mu C_v = \mu R;$$

$$C_p - C_v = R.$$

ця залежність встановлена Майєром.

Рівняння Майєра свідчить, що ізобарна теплоємність більше ізохорної на значення питомої характеристичної постійної ідеального газу. Це пояснюється тим, що у ізохорному процесі зовнішня робота не виконується і теплота витрачається тільки на зміну внутрішньої енергії робочого тіла, тоді як у ізобарному процесі теплота витрачається не тільки на зміну внутрішньої енергії робочого тіла, що залежить від його температури, але і на здійснення їм зовнішньої роботи.

Для реальних газів $C_p - C_v > R$, тому що при їх ізобарному розширенні відбувається робота не тільки проти зовнішніх сил, але і внутрішня робота проти сил взаємодії між молекулами газу, на що додатково витрачається теплота.

У теплотехніці широко застосовується відношення теплоємностей, що має назву коефіцієнта Пуассона (показника адіабати):

$$\frac{C_p}{C_v} = k.$$

У табл. 2 наведено наближені значення величин μC_v і μC_p для ідеальних газів, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії теплоємності.

Таблиця 2

Газ	Теплоємність, кДж/(кмоль×К)		$K=C_p/C_v$
	μC_v	μC_p	
Одноатомний	12,5	20,8	1,67
Двохатомний	20,8	29,1	1,4
Багатоатомний	29,1	37,4	1,3

Для визначення кількості теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг газу в інтервалі температур від t_1 до t_2 , використовують формулу:

$$q = (C_m)_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = C_{m_2} t_2 - C_{m_1} t_1.$$

Якщо в ізобарному чи ізохорному процесах бере участь m кг або $V_{н.у.}$ газу, то кількість теплоти знаходиться за формулою:

$$Q_p = m C_p (t_2 - t_1) = V_{н.у.} C'_p (t_2 - t_1) \quad (4)$$

або

$$Q_v = m C_v (t_2 - t_1) = V_{н.у.} C'_v (t_2 - t_1) \quad (5)$$

Для практичних розрахунків залежність теплоємності від температури представляють у вигляді рівняння:

$$C = a + bt.$$

Теплоємність газової суміші визначається за формулами наведеними в дод. 2.

Приклад розв'язку задачі

Вубалоні об'ємом 300 л знаходиться кисень при тиску 2 бар та температурі $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти слід підвести, щоб температура кисню підвищилась до $t_2 = 300^\circ\text{C}$? Який тиск встановиться за такої умови в балоні? Залежність теплоємності від температури взяти нелінійною.

Дано:

Газ- O_2
 $V=300\text{л} = 0,3\text{м}^3$
 $p_1= 2 \text{ бар} = 0,2 \text{ МПа}$
 $t_1=20^\circ\text{C}$
 $t_2= 300^\circ\text{C}$

$Q=?$

$p_2=?$

Рішення:

Кількість теплоти, якщо $v = \text{const}$, згідно з рівнянням (5) дорівнює:

$$Q = V_{н.у.} (C'_{vm2} \times t_2 - C'_{vm1} \times t_1),$$

де $V_{н.у.}$ - об'єм газу приведений до нормальних умов.

Величина $V_{н.у.}$ визначається з рівняння стану:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_{н.у.} V_{н.у.}}{T_{н.у.}},$$

$$\text{Отже, } V_{н.у.} = \frac{p_1 V_1 T_{н.у.}}{p_{н.у.} T_1} = \frac{0,2 \times 0,3 \times 273}{0,1013 \times (273 + 20)} = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значення теплоємностей визначаємо за табл. IV [4].

Отже,

$$Q = 0,552 \times (0,9852 \times 300 - 0,9374 \times 20) = 152,8 \text{ кДж}.$$

Кінцевий тиск можна визначити з рівняння стану для початкового та кінцевого стану кисню:

$$p_1 V = R_{\text{O}_2} T_1; \quad p_2 V = R_{\text{O}_2} T_2;$$

$$\text{Отже, } \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,2 \frac{573}{293} = 0,39 \text{ МПа}.$$

Відповідь: $Q = 152,8 \text{ кДж}$; $p_2 = 0,39 \text{ МПа}$.

Практичне заняття 3

Тема: Суміші ідеальних газів

Теоретичні основи

Газова суміш – це суміш ідеальних газів, які не вступають між собою в хімічні реакції. Окремі гази, що входять до складу суміші, називаються компонентами суміші.

Всі величини, що відносяться до компонентів, позначені індексом «i».

Для суміші ідеальних газів справедливі всі закони ідеальних газів, тому всі розрахункові рівняння, що отримані під час розгляду процесів ідеальних газів, лишаються справедливими і для газових сумішей.

Склад газової суміші задається масовими або об'ємними частками.

Масова частка визначається як відношення маси окремого газу, який входить до суміші, до маси всієї суміші:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{сум}}}; \quad \sum g_i = 1,$$

де m_i - маса окремого компонента; $m_{\text{сум}}$ – маса всієї суміші.

Об'ємна частка визначається як відношення об'єму окремого газу, який входить до суміші, до загального об'єму суміші за умови, що об'єм кожного компоненту відноситься до тиску і температури суміші (приведений об'єм):

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{сум}}}; \quad \sum r_i = 1,$$

де V_i – маса окремого компонента; $V_{\text{сум}}$ – маса всієї суміші.

Відповідно до цього визначаються всі характеристики суміші. Розрахункові рівняння наведено у дод. 2.

Приклад розв'язку задачі

Атмосферне повітря має приблизно такий склад за масою: кисню – 23,2 % та азоту – 76,8 %. Визначити об'ємний склад повітря, його газову сталу, середню молекулярну масу, а також парціальні тиски кисню і азоту, якщо барометричний тиск $P = 0,1$ МПа.

Дано:

Рішення:

$$g_{O_2} = 0,232$$

$$g_{N_2} = 0,768$$

$$r_{O_2} - ?$$

$$r_{N_2} - ?$$

$$R_{\text{сум.}} - ?$$

$$\mu_{\text{сум.}} - ?$$

$$P_{O_2} - ?$$

$$P_{N_2} - ?$$

Визначаємо об'ємний склад суміші згідно з рівнянням наведеного у дод. 2:

$$r_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,232}{32}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,21;$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,768}{28}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,79$$

$$\text{Перевірка: } \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

Визначаємо середню молекулярну масу суміші згідно з рівнянням (див. дод. 2):

$$\mu_{\text{сум.}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = 0,21 \times 32 + 0,79 \times 28 = 28,84 \text{ кг/кмоль.}$$

Газову сталу для повітря визначаємо згідно рівняння (дод. 2):

$$R_{\text{сум.}} = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2} = 0,232 \times 260 + 0,768 \times 295 = 287 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{град})}.$$

Визначаємо парціальні тиски кисню та азоту згідно рівняння (дод. 2):

$$P_{O_2} = P_{\text{сум.}} \times r_{O_2} = 0,1 \times 0,21 = 0,021 \text{ МПа} = 21 \text{ кПа}$$

$$P_{N_2} = P_{\text{сум.}} \times r_{N_2} = 0,1 \times 0,79 = 0,079 \text{ МПа} = 79 \text{ кПа}$$

$$\text{Перевірка: } P_{\text{сум.}} = \sum_{i=1}^n P_i = 21 + 79 = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа.}$$

$$\text{Відповідь: } r_{O_2} = 0,21; r_{N_2} = 0,79; R_{\text{сум.}} = 287 \text{ Дж/(кгК);}$$

$$\mu_{\text{сум.}} = 28,84 \text{ кг/кмоль}; P_{O_2} = 21 \text{ кПа}; P_{N_2} = 79 \text{ кПа.}$$

Практичне заняття 4

Тема: Визначення характеристик термодинамічних процесів води та водяної пари

Теоретичні основи

Розглядаючи процес пароутворення в pv – і Ts – координатах (рис.1), необхідно чітко засвоїти такі поняття, як фазовий стан, фазовий перехід, лінія насичення, ентальпія фазового переходу, теплота рідини, критична точка, і запам'ятати, що для води за початок відліку внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії взята трійна точка води ($t = 0,01$ °С, $p = 611$ Па); вміти користуватися таблицями води і водяної пари і hs – діаграмою під час розрахунку основних термодинамічних процесів.

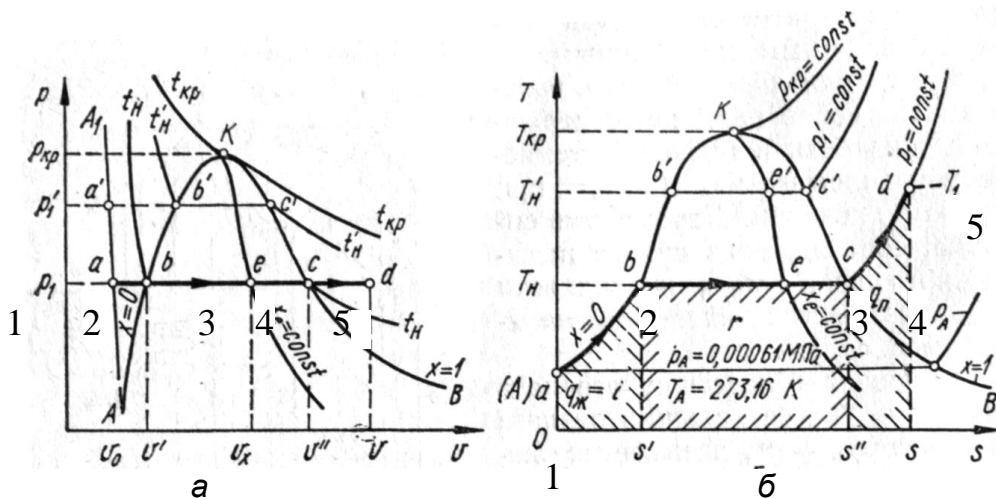


Рис.1. Графіки процесу пароутворення:
а – pv - координатах; б – Ts - координатах

Початкові параметри v , m^3/kg ; h , kJ/kg ; s , $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ води не догрітої до температури кипіння – т.1 (рис. 1) за заданим тиском p, MPa та температурою $t, ^\circ C$ можна визначити за дод. 3.

Або питомий об'єм води, недогрітої до кипіння, можна взяти $v = 0,001 m^3/kg$.

Ентальпію води, недогрітої до кипіння, можна знайти за залежністю:

$$h = c_p t_1,$$

де $c_p = 4,2 kJ/(kg \cdot K)$.

Ентропію води, недогрітої до кипіння, можна знаходити за залежністю:

$$s = c_p \ln \frac{T_1}{273}.$$

Параметри киплячої води $v'; h'; s'$ – т. 2 (рис. 1) та параметри сухої насиченої пари $v''; h''; s''$ – т.4 (рис.1) визначають за заданим тиском p , МПа (див. дод.4.).

Термічні і калоричні параметри в т.3 (рис.1), що відповідає стану вологої насиченої водяної пари з заданим ступенем сухості, можна знайти за залежностями:

$$v_x = v'(1-x) + v''x;$$

$$h_x = h'(1-x) + h''x = h' + rx;$$

$$s_x = s'(1-x) + s''x = s' + \frac{r}{T_n} x.$$

Параметри $v_{п.п}; h_{п.п}; s_{п.п}$ перегрітої пари – т.5 (рис. 1) за заданим тиском p , МПа та температурою перегрітого пара $t_{п.п}$, °С (див. дод.3) або за допомогою hs -діаграмою водяної пари (див. дод.5).

Значення внутрішньої енергії в кожній точці процесу визначаємо за залежністю:

$$u = h - pv. \quad (6)$$

Питома кількість теплоти, підведена в ізобарному процесі дорівнює зміні питомої ентальпії:

$$q = h' - h \quad (7)$$

Питома кількість теплоти в процесі кипіння q_{2-4} , дорівнює теплоті пароутворення r (дод.4.).

Повна кількість теплоти, підведена до речовини визначається за залежністю:

$$Q = m q. \quad (8)$$

Користуючись залежностями (7) та (8) можна знайти кількість теплоти, підведена на кожній ділянці процесу.

Приклад розв'язку задачі

Визначити параметри водяної пари, якщо тиск $P=10$ бар, ступінь сухості $x=0,95$.

Дано:

Газ - водяна пара
 $P = 10$ бар =
 $= 1$ МПа
 $x=0,95$.

t- ?

Рішення:

1. Користаючись h -діаграмою (див. дод.5), знаходимо точку 1, що характеризує даний стан пари (рис. 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:

$$s_1 = 6,38 \text{ кДж/кг К.}$$

2. Для визначення температури пари знаходимо температуру насичення пари при заданому тиску.

Для цього шукаємо точку 2 перетинання ізобари 10 бар з верхньою межевою кривою (рис. 2).

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.

3. Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою пунктирних ліній постійного об'єму:

$$v_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (рис. 2).}$$

4. Значення u знаходимо за формулою (6):

$$u = 2675000 - (1000000 \times 0,2) = 2475000 \text{ Дж/кг.}$$

Відповідь: $t = 191,4^\circ\text{C}$; $u = 2475 \text{ кДж/кг.}$

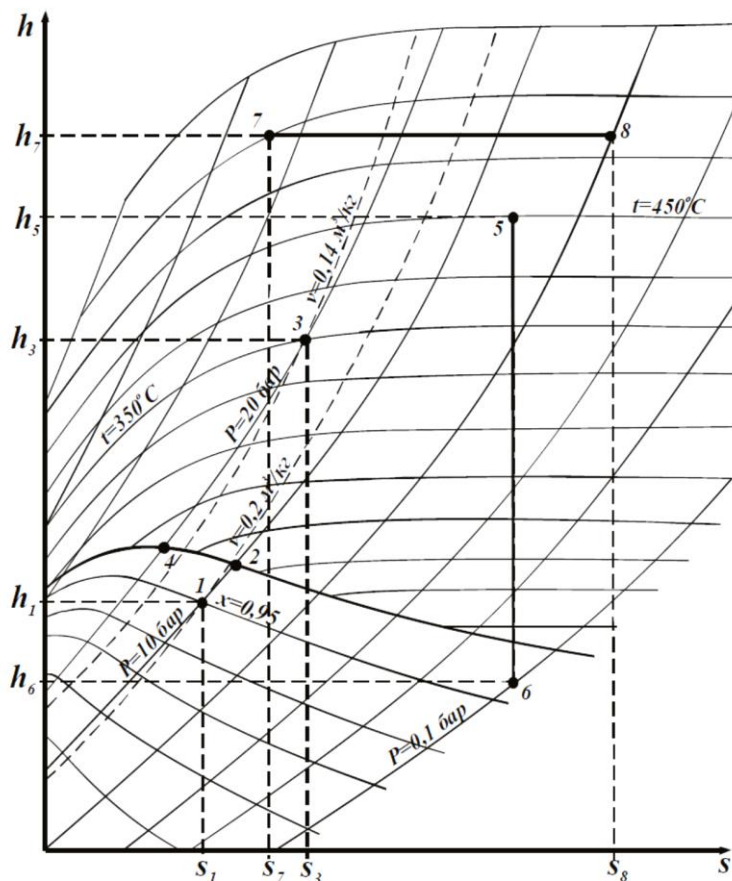


Рис. 2. Схема побудови процесів на $h-s$ -діаграмі водяної пари

Приклад розв'язку задачі

Визначити температуру, питомий об'єм, густину, ентальпію та ентропію сухого насиченого водяного пара, якщо тиск $P=10 \text{ бар}$.

Дано:

Газ-сухий
насичений водяний
пар
 $P = 10 \text{ бар} = 1 \text{ МПа}$
 $x=1$.

Рішення:

Користуючись таблицями «Термодинамічні властивості води та водяної пари» або дод. 4 знаходимо значення:
температура насичення: $t_H = 179,88^\circ\text{C}$;
питомий об'єм: $v''=0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$;
густина $\rho = 5,139 \text{ кг/м}^3$;
питома ентропія $s''=6,587 \text{ кДж/кг К}$;
питома ентропія $h''=2778 \text{ кДж/кг}$.

t_H - ?; v'' - ?; ρ - ?;
 h'' - ?; s'' - ?;

Практичне заняття 5

Тема: Розрахунок процесів стаціонарної теплопровідності та теплопередачі крізь одно- та багат шарову стінку

Теоретичні основи

Вивчення законів теплообміну необхідне для керування тепловими потоками, що утворюються майже повсюдно в технічних процесах, у робочих процесах машин, двигунів, апаратів і т. д., тому, розв'язуючи технологічні задачі, недостатньо лише проаналізувати визначений термодинамічний процес, необхідно також встановити умови його виникнення і закономірності перебігу, зокрема, надзвичайно важливе значення мають явища переносу і розповсюдження теплоти в різних тілах і середовищах.

Під час вивчення цього розділу студент повинен перш за все звернути увагу на те, що в окремих розділах курсу застосовуються однакові буквені позначення для різних їх значень в кожному розділі. Так, в термодинаміці через Q позначають кількість теплоти, підведеної до будь-якої кількості робочого тіла, яка виражається в джоулях. Відповідно через q позначають питому кількість теплоти, підведену до одного кілограму робочого тіла і виражають її в джоулях на кілограм.

У теорії теплообміну ці ж позначення застосовують для потужності потоків теплоти. Через Q позначають потужність теплового потоку через границю тіла (що називається тепловим потоком) і виражають як і механічну потужність в ватах. Через q позначають поверхневу інтенсивність потужності теплового потоку (густину теплового потоку) і виражають у ватах на квадратний метр.

Для тіл циліндричної форми застосовують термін «лінійна густина теплового потоку», позначають q_l і вимірюють у ватах на метр. Загальну кількість теплоти, що пройшла через границю тіла, позначають як Q_T і виражають у джоулях.

Необхідно усвідомити, що переніс теплової енергії здійснюється трьома способами: теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням, які є елементарними видами теплообміну; розібратися в механізмі переносу теплоти в кожному зі способів, пам'ятати, що теплообмін між тілами на практиці здійснюється зазвичай всіма трьома способами одночасно, але внесок кожного з них різний, а необхідною і достатньою умовою теплообміну є наявність різниці температур.

Розглядаючи задачі при граничних умовах третього роду, слід ознайомитись з теплопередачею – передачею теплоти від гарячої середовища до холодного через тверду стінку; усвідомити різницю між коефіцієнтом теплопровідності λ , коефіцієнтом тепловіддачі α і коефіцієнтом теплопередачі k ;

вміти аналізувати складові термічного опору теплопередачі і пам'ятати, що теплопередачу можна інтенсифікувати лише за рахунок збільшення меншого з коефіцієнтів тепловіддачі, або за рахунок розвитку поверхні теплообміну з боку меншого коефіцієнта тепловіддачі.

Коефіцієнт теплопередачі k , показує яка кількість теплоти переходить в одиницю часу від більш нагрітого до менш нагрітого теплоносія через 1 м^2 теплообмінної поверхні з різницею температур між теплоносіями 1 К .

Розрахункові рівняння для обчислення коефіцієнту теплопередачі для плоскої та циліндричної стінок наведено у дод. 3.

У процесі нанесення теплової ізоляції на вузли і деталі обладнання за визначеними умовами теплові витрати можуть не тільки не зменшуватися, а й перевищувати теплові витрати без ізоляції. Тому студент повинен уміти вибрати доцільний матеріал теплової ізоляції; мати уявлення про методи розв'язання задач стаціонарної теплопровідності.

Еквівалентна теплопровідність ізоляції знаходиться за залежністю:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\ln \frac{d_{n+1}}{d_2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$$

Критичний діаметр теплової ізоляції визначається таким чином:

$$d_{\text{кр}} = \frac{2\lambda_{\text{із.екв}}}{\alpha}$$

Для ефективної роботи теплової ізоляції потрібно, щоб виконувалась нерівність:

$$d_2 > d_{\text{кр}},$$

де d_2 – зовнішній діаметр неізолюваної труби.

В протилежному випадку необхідно вибрати інший тип ізоляції.

Лінійна густина теплового потоку, тепловий потік з поверхні ізолюваної труби і температури на межах шарів визначається так:

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_n)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha d_{n+1}}};$$

$$Q = q_l l;$$

$$t_{k+1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \sum_{i=1}^k \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}.$$

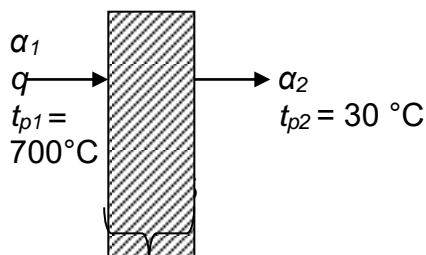
Приклад розв'язку задачі

Визначити густину теплового потоку, що проходить крізь стінку товщиною 250 мм. Стінка виготовлена з червоної цегли, коефіцієнт теплопровідності якого $0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$. Коефіцієнт тепловіддачі відповідно $\alpha_6 = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ та $\alpha_3 = 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$. Температура димових газів 700°C , а температура повітря в приміщенні 30°C .

Дано:

Рішення:

$$\begin{aligned} t_{p1} &= 700^\circ\text{C} \\ t_{p2} &= 30^\circ\text{C} \\ \alpha_6 &= 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \\ \alpha_3 &= 12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \\ \delta_{cm} &= 250\text{мм} \\ \lambda_{cm} &= 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$



Густину теплового потоку визначаємо за формулою (9):

Знайти: q -?

$$\begin{aligned} q &= \frac{Q}{F} = k \Delta t = k (t_{p1} - t_{p2}) = \\ &= \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_6} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_3}} = \frac{700 - 30}{\frac{1}{23} + \frac{0,25}{0,7} + \frac{1}{12}} = 1384,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

Практичне заняття 6

Тема: Розрахунок процесів при вільному та вимушеному русі рідини

Теоретичні основи

Поняття конвективного теплообміну описує процес теплообміну під час руху рідини або газу. Отже, конвективним теплообміном називається одночасне перенесення теплоти конвекцією і теплопровідністю.

Конвекція – це перенос теплоти під час перемішування частинок рідини або газу із області з однією температурою в область з іншою температурою.

Розрізняють вільний і вимушений конвективний теплообмін.

Вільна конвекція – рух в об'ємі рідини або газу виникає за рахунок неоднорідності в ньому масових сил.

Вимушена конвекція об'єму рідини або газу відбувається за рахунок дії зовнішніх сил, які прикладені на його границях, за рахунок попередньої передачі кінетичної енергії (наприклад, за рахунок роботи насоса, вентилятора, вітру тощо).

В інженерних розрахунках часто визначають конвективний теплообмін між потоками рідини (газу) і поверхнею твердого тіла. Цей процес конвективного теплообміну називають конвективною тепловіддачею або просто тепловіддачею.

Інтенсивність теплообміну в процесах конвективного переносу тепла визначається величиною коефіцієнта тепловіддачі α , який визначається з критеріальних рівнянь.

Вивчаючи матеріал цієї теми, слід усвідомити складний характер теплообміну між стінкою і рідиною, що її омиває; пам'ятати, що на відміну від коефіцієнту теплопровідності λ , коефіцієнт тепловіддачі α залежить від більшого числа факторів, таких як теплофізичні властивості рідини і стінки, природи виникнення і режиму руху рідини, форми і розмірів поверхні теплообміну тощо, і тому α може бути визначений лише експериментально.

Необхідно розібратися в основах теорії подібності і теплового моделювання, знати фізичний зміст основних критеріїв подібності Nu , Pr , Gr , Bi і принцип побудови критеріальних рівнянь.

За допомогою критеріальних рівнянь (див. дод. 3, 4, 5) навчитися визначати коефіцієнт тепловіддачі для найхарактерніших випадків конвективного теплообміну.

Процес теплообміну між поверхнею тіла і довкіллям описується законом Ньютона-Рихмана, який свідчить, що кількість теплоти, яка передається конвективним теплообміном прямо пропорційна різниці температур поверхні тіла ($t_{ст}$) і довкілля (t_p)

За законом Ньютона–Ріхмана, питомий тепловий потік визначається за формулою:

$$q = \alpha \times \Delta t, \text{ Вт/м}^2,$$

а повний тепловий потік:

$$Q = \alpha \times \Delta t \times F, \text{ Вт},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К), який характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і довкіллям.

Приклад розв'язку задачі

Дано:

$$\begin{aligned}L &= 2\text{ м} \\ b &= 1,5\text{ м} \\ t_1 &= 20^\circ\text{C} \\ t_2 &= 90^\circ\text{C} \\ v &= 3\text{ м/с}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha &- ? \\ Q &- ?\end{aligned}$$

Рішення:

1. Якщо $t_{c2} = 20^\circ\text{C}$ з додатку виписуємо фізичні властивості повітря:

$$\nu = 15,06 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\lambda = 2,59 \times 10^{-2} \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 0,703 \text{ (якщо } t_1 = 20^\circ\text{C)}; \quad Pr_c = 0,69 \text{ (якщо } t_2 = 90^\circ\text{C)}$$

2. Визначаємо режим течії:

$$Re = \frac{w \times l}{\nu} = \frac{3 \times 2}{15,06 \times 10^{-6}} = 398406$$

3. Визначаємо число Нуссельта за формулою (10):

$$Nu = 0,021 \times 398406^{0,8} \times 0,703^{0,43} \left(\frac{0,703}{0,69} \right)^{0,25} = 547,65.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{547,65 \times 0,0259}{2} = 6,85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C}}$$

4. Тепловий потік відповідно :

$$Q = \alpha \times F \times \Delta t = \alpha \times F \times (t_c - t_h) = 6,85 \times 1,5 \times 2 \times (90 - 20) = 1438,5 \text{ Вт.}$$

Практичне заняття 7.

Тема: Теплообмін при зміні агрегатного стану

Теоретичні основи

Фазове перетворення – це процес переходу речовини із одного агрегатного стану до іншого, який відбувається з виділенням (поглинанням) енергії. Розглядаючи теплообмін під час зміни агрегатного стану, необхідно розібратися, від яких факторів залежить інтенсивність теплообміну при конденсації, чому кризові явища під час кипіння можуть приводити до аварійних ситуацій в енергетичному теплообмінному обладнанні.

Кипіння – це процес фазового переходу рідини в пару, який відбувається в об'ємі рідини та супроводжується утворенням нових поверхонь розділу фаз.

Для виникнення кипіння завжди необхідний деякий перегрів рідини, тобто перевищення температури рідини над температурою насичення при заданому тиску. Під час кипіння рідини виділяють такі режими: область слабого кипіння, тепловіддача відбувається переважно за рахунок конвекції однофазної рідини, розвинений бульбашковий режим, перехідний режим та плівковий режим.

Кипіння широко розповсюджене, як в різних галузях науки і промисловості, так і в побуті. Процеси теплообміну під час кипіння характеризуються високою інтенсивністю, чим обумовлене їх використання для відведення значних теплових потоків в атомній енергетиці, радіоелектронній та комп'ютерній промисловості, в криогенній техніці.

Якщо пара контактує зі стінкою, температура якої нижче температури насичення, то пара конденсується і конденсат осідає на стінці. Водночас розрізняють два види конденсації: крапельну (конденсат осідає у вигляді окремих крапель) і плівкову (на по верхні утворюється суцільна плівка рідини).

Приклад розв'язку задачі

Теплове навантаження поверхні нагріву випарного апарата дорівнює $q = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ з різницею температур $\Delta T = T_c - T_s = 10^\circ \text{ К}$. Визначити температуру поверхні апарата і тиск киплячої води.

Дано:

Рішення:

$$q = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Delta T = T_c - T_s = 10 \text{ К}$$

$$T - ?$$

$$P - ?$$

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за формулою:

$$\alpha = 3,15 q^{0,7} P^{0,15} \text{ та } \alpha = 46 q^{0,5} \Delta T^{2,33}$$

впливає:

$$P^{0,35} = \frac{3,15 q^{0,7}}{46 \cdot \Delta T^{2,33}}, \text{ або } P = \left(\frac{3,15 q^{0,7}}{46 \cdot \Delta T^{2,33}} \right)^3$$

$$P = \left(\frac{3,15 (230000^{0,7})}{46 \cdot \Delta T^{2,33}} \right)^3 = 6 \text{ бар}$$

З додатку знаходимо температуру насичення за визначеним тиском.

Якщо $P = 6 \text{ бар}$, температура насичення (кипіння) дорівнює $T_{\text{нас}} = 432 \text{ К}$.

Температура поверхні апарата відповідно буде дорівнювати:

$$T_c = T_{\text{нас}} + \Delta T = 432 + 10 = 442 \text{ К}$$

Практичне заняття 8.

Тема: Розрахунок теплообмінних апаратів

Теоретичні основи

Теплове навантаження теплообмінника визначається з рівняння теплового балансу. Рівняння теплового балансу для гарячого теплоносія:

$$Q = c_{pm1} G_1 (t_1' - t_1'')$$

Рівняння теплового балансу для холодного теплоносія:

$$Q = c_{pm2} G_2 (t_2'' - t_2')$$

де c_{pm1} та c_{pm2} – середня теплоємність води відповідно в заданому діапазоні температур для гарячого та холодного теплоносія; G_1 та G_2 – масові витрати теплоносія відповідно гарячого та холодного теплоносія, які визначаються:

$$G_1 = \rho_1 w_1 \frac{\pi d^2}{4} \text{ та } G_2 = \rho_2 w_2 \frac{\pi d^2}{4},$$

де ρ – середня густина теплоносія в заданому інтервалі температур,
 d – еквівалентний діаметр, який визначається:

$$d = \frac{4S}{u},$$

де S – площа перерізу, u – змочений периметр.

У процесі зміни агрегатного стану (процеси кипіння та конденсації) теплове навантаження визначається з рівняння, Вт;:

$$Q = G_1 \cdot r_1 \text{ та } Q = G_2 \cdot r_2.$$

Для визначення теплового навантаження можна запропонувати більш загальне рівняння, Вт:

$$Q = G_1 (i_{1к} - i_{1п}) \text{ та } Q = G_2 (i_{2к} - i_{2п}).$$

де r – питома теплота фазового переходу, Дж/кг, i – ентальпія теплоносія, Дж/кг.

У наведених формулах індекс «1» відповідає гарячому теплоносієві, «2» – холодному. Індекси «П», «К» – визначають значення параметрів на вході й виході з теплообмінника.

З іншого боку маємо рівняння теплопередачі:

$$Q = k F \Delta t, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Цю залежність можна використовувати для плоскої стінки і для циліндричної стінки, за незначній її товщини; Δt – середньо логарифмічний температурний напір.

Середньо логарифмічний температурний напір визначаємо за формулою:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}},$$

де Δt_{δ} – максимальний перепад температур; Δt_{m} – мінімальний перепад температур.

У розрахунковій практиці рекомендується середню температуру теплоносія з меншим перепадом температур по довжині апарата визначати як середньо-логарифмічну, а середню температуру іншого теплоносія – по відомій величині Δt_{cp} користуючись співвідношенням:

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_{cp1} - \Delta t_{cp2}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі (α_1 або α_2) знаходиться з критеріального рівняння:

$$Nu = C Re^n Pr^m \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}; \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d},$$

де λ_p – теплопровідність рідини; Nu – число Нусельта – безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі; Re – число Рейнольдса, яке показує співвідношення сил інерції і сил в'язкого тертя; Pr – число Прандтля, яке показує співвідношення полів швидкостей і полів температур і є фізичною характеристикою речовини.

Всі коефіцієнти і показники ступенів знаходяться залежно від режиму руху, який визначається числом Re :

$$Re = \frac{wd}{\nu},$$

де ν – кінематична в'язкість рідини.

Якщо $Re > 10^4$, то $C = 0,021$; $n = 0,8$; $m = 0,43$.

Задачі до практичного заняття № 1

1. Маса 1 м^3 метану за відповідних умов складає $0,7 \text{ кг}$. Визначити густину та питомий об'єм метану для цих умов.

2. Визначити питомий об'єм повітря, якщо густина повітря за відповідних умов становить $1,275 \text{ м}^3/\text{кг}$.

3. Визначити абсолютний тиск і питомий об'єм пари в котлі, якщо манометр показує $1,3 \text{ бар}$, а атмосферний тиск дорівнює 700 мм.рт.ст. за температури 25°C .

4. В циліндрі діаметром 80 мм міститься 100 г повітря, якщо надлишковий тиск – $0,2 \text{ МПа}$ і температура – 27°C . Зовнішній тиск атмосферного повітря $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$ До якої температури слід нагрівати, повітря в циліндрі, щоб поршень, що рухається без тертя, піднявся на 60 мм при постійному тиску в циліндрі?

5. В закритій посудині ємністю $0,5 \text{ м}^3$ міститься повітря при тиску 3 бар і температурі 20°C . Внаслідок охолодження посудини повітря, що міститься в ній, втрачає 120 кДж теплоти. Беручи теплоємність повітря сталою, визначити який тиск і яка температура встановляться після цього в посудині, а також зміну калоричних параметрів повітря.

6. 1 кг кисню за початкової температури 20°C та тиску $0,2 \text{ МПа}$ стискається адіабатно до кінцевого тиску $1,1 \text{ МПа}$. Визначити кінцевий об'єм, температуру та витрачену роботу та зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та кількість теплоти.

7. 3 кг кисню за початкової температури 45°C та тиску 1 МПа розширюється в циліндрі з рухомим поршнем політропно до тиску $0,1 \text{ МПа}$. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо розширення в циліндрі політропне ($n = 1,1$).

8. Балон місткістю 30 л з відкритим вентиляем має масу 90 кг . Після того, як компресором в нього було додане повітря, маса балона збільшилася до 96 кг . Визначити кінцевий тиск повітря в балоні, якщо температура повітря на

початку і в кінці процесу збереглася постійною, дорівнює $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а барометричний тиск 750 мм. рт. ст.

9. Повітряний балон, розрахований на граничний абсолютний тиск 25 МПа , заповнений повітрям з надмірним тиском $14,9\text{ МПа}$. У разі пожежі в приміщенні, де знаходився балон, температура повітря в ньому підвищилася до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чи витримає балон збільшений тиск, якщо відомо, що температура повітря в балоні до пожежі була $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а барометричний тиск $B = 750\text{ мм. рт. ст.}$

Задачі до практичного заняття № 2

1. Знайти середню теплоємність ізохорну та ізобарну в межах температур від $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вуглекислого газу, вважаючи залежність теплоємності від температури лінійною

2. Визначити газову сталу і густину газової суміші, а також парціальні тиски окремих компонентів, якщо суміш складається з $14\% \text{ CO}_2$, $73\% \text{ N}_2$, $6\% \text{ O}_2$ і $7\% \text{ H}_2\text{O}$ за об'ємом. Абсолютний тиск суміші дорівнює $0,2\text{ МПа}$, а температура $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Визначити молекулярну масу, газову сталу, густину і питомий об'єм за нормальних фізичних умов, а також об'ємний склад суміші, якщо заданий її масовий склад: $7\% \text{ N}_2$, $8\% \text{ H}_2$, $51\% \text{ CH}_4$, $5\% \text{ O}_2$, $19\% \text{ CO}$ і $10\% \text{ CO}_2$.

4. Визначити газову постійну, молекулярну масу, густину і питомий об'єм за нормальних умов для суміші ідеальних газів, об'ємний вміст яких наступний: $\text{N}_2 - 40\%$, $\text{H}_2 - 10\%$, $\text{CO}_2 - 50\%$. Знайти також середні теплоємності цієї суміші під постійним тиском P_1 у інтервалі температур від t_1 до t_2 і визначити кількість теплоти для ізобарного нагрівання $m\text{ кг}$ газової суміші від t_1 до t_2 , якщо заданий об'єм цієї суміші $V_{\text{сум}}$.

5. Суміш ідеальних газів складається з 15 кг CO_2 , 12 кг N_2 і 3 кг O_2 . Об'єм суміші у початковому стані $V_1 = 20\text{ м}^3$, а тиск $P_1 = 0,1\text{ МПа}$. У результаті адіабатного стискання температура суміші зростає до $t_2 = 327\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити температуру суміші у початковому стані, об'єм і тиск суміші у кінцевому стані, роботу стискання і зміну внутрішньої енергії суміші. Вважати, що теплоємність газів не залежить від температури і визначається за таблицею. Визначити парціальний тиск газів, що входять у суміш, у кінцевому стані.

6. У ємності перебуває суміш повітря і вуглекислоти. Об'єм ємності $V = 0,6\text{ м}^3$ кількість повітря $m_1 = 3\text{ кг}$, вуглекислоти $m_2 = 5\text{ кг}$; температура суміші $t_{\text{сум}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти парціальні тиски компонентів P_i , газову постійну суміші $R_{\text{сум}}$ і тиск суміші $P_{\text{сум}}$.

7. Заданий об'ємний склад газової суміші $r_{\text{CH}_4} = 0,25$; $r_{\text{CO}} = 0,5$; $r_{\text{CO}_2} = 0,25$. Визначити масовий і мольний склад суміші, молекулярну масу суміші, газову постійну, питомий об'єм і густину суміші під тиском $P = 0,25\text{ МПа}$

і за температури суміші $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити також масову, об'ємну і мольну теплоємність суміші, при цьому вважати, що теплоємність не залежить від температури, а мольні теплоємності компонентів ($\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$) відповідно дорівнюють $(\text{кСр})_{\text{CH}_4} = 37,7$; $(\text{кСр})_{\text{CO}} = 29,3$; $(\text{кСр})_{\text{CO}_2} = 37,7$.

8. Димові гази мають такий масовий склад: $g_{\text{CO}_2} = 16,1 \%$; $g_{\text{O}_2} = 7,5 \%$; $g_{\text{N}_2} = 76,4 \%$. Розрахувати ентальпію $h'_{\text{сум}}$ цих газів, віднесену до 1 м^3 за температури $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

9. Суміш газів, що виходить під час спалювання 1 кг мазуту, має наступні складові, задані парціальними об'ємами: $V_{\text{CO}_2} = 1,85 \text{ м}^3$; $V_{\text{O}_2} = 0,77 \text{ м}^3$; $V_{\text{N}_2} = 12,78 \text{ м}^3$. Визначити масові частки і парціальні тиски складових, якщо загальний тиск становить $P = 1,018 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Задачі до практичного заняття № 3

1. Перегріта водяна пара з початковим тиском $0,1 \text{ МПа}$ і початковою температурою $230 \text{ }^\circ\text{C}$ стискається ізотермічно до ступеня сухості $0,85$. Визначити параметри пари в початковому і кінцевому станах, кількість відведеної теплоти від пари, зміну внутрішньої енергії і роботу стиску. Зобразити тепловий процес на hs -діаграмі.

2. Тиск пари дорівнює 4 ат , питомий об'єм $0,421 \text{ м}^3/\text{кг}$. 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?

3. 1 кг водяної пари нагрівається при постійному тиску. Початкові параметри пари 10 ат , ступень сухості $0,95$. Кінцева температура пари $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити h_1 , u_1 , v_1 , t_1 , h_2 , v_2 , q , Δu .

4. Визначити швидкість витікання перегрітої пари через сопло, що звужується, якщо початкові параметри пари $0,6 \text{ МПа}$ і $350 \text{ }^\circ\text{C}$, а тиск середовища, в яке відбувається витікання $0,4 \text{ МПа}$. Швидкістю на вході в сопло, втратами і теплообміном зі стінками можна знехтувати.

5. Визначити теоретичну швидкість витікання пари з котла в атмосферу. Тиск пари в котлі $1,2 \text{ МПа}$ і температури $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Процес розширення пари вважати адіабатним. Барометричний тиск взяти таким, що дорівнює 750 мм. рт. ст.

Задачі до практичного заняття № 4

1. Плоска сталева стінка з $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ і товщиною $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$ ізольована від теплових втрат шаром азбестового картону $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ товщиною $\delta_2 = 0,2 \text{ м}$, шаром пробки $\lambda_3 = 0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ і $\delta_3 = 0,1 \text{ м}$. Визначити, якої товщини необхідно взяти шар пінобетону з $\lambda = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ замість азбесту і пробки, щоб теплоізоляційні властивості стінки залишилися без змін.

2. Визначити коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, що покриває циліндричний кожух діаметром $d_1 = 1,2$ м, якщо при товщині ізоляції $\delta_{із} = 0,2$ м, $T_{с2} = 773$ К та $T_{с3} = 313$ К, лінійний тепловий потік $q_l = 1520$ Вт/м. Яка буде за такої умови температура внутрішньої поверхні кожуха $T_{с1}$, якщо товщина його $\delta_k = 0,02$ м і коефіцієнт теплопровідності $\lambda_k = 50$ Вт/м·К ?

3. При накладанні на плоску стінку ($T_c = 573$ К) шару теплової ізоляції завтовшки 100 мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{із}$ температура на поверхні ізоляції дорівнювала 365 К. На скільки треба збільшити товщину ізоляції, щоб при тих самих теплових втратах температура на її поверхні досягла 313 К?

4. Паропровід зовнішнім діаметром $d_{зов} = 160$ мм при температурі поверхні труби $t_{с2} = 300$ °С покритий двома шарами ізоляції. Матеріал першого шару совеліт товщиною $\delta_{с1} = 30$ мм; матеріал другого шару пінопласт товщиною $\delta_{с2} = 40$ мм. Температура зовнішньої поверхні ізоляції $t_{с4} = 40$ °С. Визначити лінійний тепловий потік q_l та проміжну температуру на межі шарів ізоляції $t_{с3}$. Обчислити еквівалентний коефіцієнт теплопровідності ізоляції.

5. Плоска стінка з температурою 400 °С ізолювана пінопластом так, щоб втрати теплоти не перевищували 450 Вт/м², а температура зовнішньої поверхні не перевищувала 43 °С. Знайти товщину ізоляції.

6. Шар льоду на річці має товщину 500 мм і температуру на нижній та верхній поверхнях $T_{с1} = 273$ К і $T_{с2} = 263$ К. Визначити питомий потік крізь лід. Як зміниться результат у випадку, коли лід покритий шаром снігу завтовшки 500 мм. Температури нижньої поверхні льоду та верхньої поверхні снігу дорівнюють відповідно $T_{с1} = 273$ К і $T_{с3} = 263$ К.

Задачі до практичного заняття № 5

1. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік при русі повітря в трубі діаметром 56 мм довжиною 2 м зі швидкістю 5 м/с, якщо середня температура повітря 120 °С, а середня температура стінки труби 100 °С.

2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від горизонтальної плити шириною 1 м довжиною 3 м, якщо поверхня, яка віддає теплоту, повернута донизу, і її температура 125 °С, а температура повітря вдалині від плити 15 °С.

3. Для цегляної стіни завдовжки 15 м, заввишки 6 м та завтовшки 250 м за температури поверхонь стінки $T_{с1} = 393$ К і $T_{с2} = 293$ К знайдено тепловий потік $Q = 21600$ Вт. Визначити значення коефіцієнтів тепловіддачі α_1 та α_2 , коефіцієнт теплопровідності λ_c , коефіцієнт теплопередачі k та термічний опір R , якщо $T_1 = 398$ К і $T_2 = 273$ К.

4. Визначити коефіцієнт тепловіддачі вертикальної стінки висотою 2 м повітрю, якщо середня температура стінки $T_c = 393$ К, а температура повітря вдалині від стінки $T_{пов} = 293$ К.

5. Електронагрівач з ніхромового дроту діаметром $d = 0,5$ мм має температуру $T_c = 773$ К. Визначити коефіцієнт тепловіддачі на поверхні дроту і силу струму, який проходить крізь електронагрівач, якщо температура навколишнього повітря $T_{\text{пов}} = 293$ К, а питомий електричний опір дроту $1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

6. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і питомі втрати теплоти з двох горизонтально розташованих паропроводів діаметром $d_1 = 200$ мм та $d_2 = 100$ мм, якщо температури їх стінок однакові і дорівнюють $t_c = 310$ °С, а температура повітря удалині від паропроводів $t_{\text{пов}} = 26$ °С.

7. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і кількість переданої теплоти при течії води в трубі діаметром $d = 8$ мм і довжиною $l = 360$ мм, якщо витрата води складає 108 л/год, середня температура води $t_b = 50$ °С, а температура стінки труби $t_c = 30$ °С.

Задачі до практичного заняття № 6

1. Визначити коефіцієнт тепловіддачі киплячої води, яка рухається у трубі діаметром 25 / 20 мм зі швидкістю $W = 1,3$ м/с, якщо температура на внутрішній поверхні труби $T_c = 473$ К, а вода знаходиться під тиском $P = 12,553$ бар.

2. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік, який передається стінці при плівковій конденсації сухої насичено водяної пари на поверхні вертикальної труби при $h = 2$ м і $d = 0,05$ м, якщо тиск пари $P = 3,614$ бар, температура поверхні труби $t_c = 60$ °С.

3. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі та кількість сконденсованої в одиницю часу сухої насиченої водяної пари у горизонтальному кожухотрубному конденсаторі, по трубах якого рухається нагріта вода, якщо число труб у конденсаторі $n = 80$, довжина конденсатора $l = 2$ м, діаметр труб $d = 0,02$ м. Труби розташовані у шаховому порядку. Число рядів труб по вертикалі $n_p = 8$. Пара перебуває під тиском $P = 9,8$ бар, середня температура поверхні труб $T_c = 354$ К.

Задачі до практичного заняття №7

1. Визначити питоме теплове навантаження та температури поверхонь нагріву парового котла, якщо задані такі величини: $T_1 = 1273$ К, $T_2 = 423$ К, коефіцієнти тепловіддачі відповідно: $\alpha_1 = 30$ Вт/м²·К і $\alpha_2 = 5000$ Вт/м²·К, коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda_c = 50$ Вт/м·К і товщина стінки $\delta_c = 0,01$ м.

2. Визначити коефіцієнт теплопередачі у вертикальному трубчастому теплообміннику (heater), який призначений для нагрівання 30 т/год води від 20 °С до

95 °С. Швидкість води в латунних трубах діаметрами 14/12 мм і висотою 2,45 м складає 1,5 м/с. Труби обігріваються сухою насиченою парою з тиском 0,128 МПа. Визначити також витрату пари. Поверхня нагріву теплообмінника складає 19,38 м².

3. У трубчастому підігрівнику повітря з витратою 21,5 кг/с має підігріватись від 30 до 260 °С. Грійним теплоносієм є димові гази, які містять 12% CO₂ і 5% H₂O за об'ємом. Гази з витратою 19,6 кг/с і швидкістю 8 м/с поперечно обтікають шаховий пучок труб з діаметрами 38/32 мм і кроками між трубами S₁ = 78 мм і S₂ = 64 мм. Повітря рухається в трубах зі швидкістю 12 м/с. Температура газів на вході в повітропідігрівник складає 380 °С, а тиск газів 100 кПа. Визначити коефіцієнт теплопередачі. Кількість рядів труб 10. Матеріал труб – сталь.

Задачі для самостійної роботи

1. Чому буде дорівнювати густина повітря при тиску 15 бар і температурі 20 °С, якщо густина повітря за нормальних умов дорівнює 1,293 м³/кг.

2. Визначити масу газу SO₂ в балоні об'ємом 4 м³ за температури 80 °С. Тиск газу за манометром дорівнює 5 бар, а атмосферний тиск дорівнює 740 мм. рт. ст.

3. На скільки більше вміщується в балон, об'єм якого 50 л, метану, ніж азоту, за температури 12 °С і тиску за манометром 10 МПа, якщо атмосферний тиск $B = 750$ мм. рт. ст.

4. З резервуара ємністю 55 л випускається повітря в атмосферу, водночас тиск повітря, виміряний манометром, зменшується від 4 МПа до 0,1 МПа. Визначити масу випущеного повітря, якщо температура його змінилась від 30 °С до 20 °С, а барометричний тиск $B = 750$ мм. рт. ст.

5. До якої температури потрібно нагріти 0,1 кг газу, щоб для незмінного об'єму 0,01 м³ його тиск змінився від 0,5 МПа до 1,5 МПа?

6. Компресор подає стисле повітря в резервуар, водночас тиск в резервуарі, виміряне манометром, підвищується від 0 до 0,7 МПа, а температура від 10 °С до 30 °С. Визначити масу повітря, яке подається в резервуар, якщо об'єм балона 6 м³, а барометричний тиск $B = 750$ мм. рт. ст.

7. 2 кг азоту з початковими температурою 100 °С і абсолютним тиском 0,5 МПа нагрівається при постійному об'ємі до температури 500 °С. Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що підводиться до нього і зміну його ентропії.

8. 3 кг повітря з початковими температурою 12 °С і абсолютним тиском 0,9 МПа нагріваються при постійному об'ємі до температури 375 °С. Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що підводиться до нього і зміну його ентропії.

9. 5 м³ кисню з початковими температурою 75 °С і абсолютним тиском 0,1 МПа нагріваються при постійному об'ємі так, що його абсолютний тиск

підвищується до 0,3 МПа. Визначити кінцеву температуру газу, кількість тепла, що відводиться до нього і зміну його ентропії.

10. 6 кг окису вуглецю з початковими температурою 240 °С і абсолютним тиском 0,5 МПа охолоджуються при постійному об'ємі до температури 130 °С. Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що відводиться від нього і зміну його ентропії.

11. 7 м³ вуглекислого газу з початковими температурою 570 °С і абсолютним тиском 0,7 МПа охолоджуються при постійному об'ємі так, що його абсолютний тиск зменшується до 0,3 МПа. Визначити кінцеву температуру газу, кількість тепла, що відводиться від нього і зміну його ентропії.

12. 4 кг водню з початковою температурою 0 °С і абсолютним тиском 0,1 МПа нагрівається при постійному тиску до температури 230 °С. Визначити початковий і кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

13. 2 кг азоту з початковою температурою 150 °С і абсолютним тиском 0,3 МПа нагрівається при постійному тиску до температури 370 °С. Визначити початковий і кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

14. 3 м³ кисню з початковою температурою 70 °С і абсолютним тиском 0,3 МПа нагрівається при постійному тиску до температури 350 °С. Визначити кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

15. 5 м³ окису вуглецю з початковою температурою 300 °С і абсолютним тиском 0,6 МПа охолоджується при постійному тиску до температури 170 °С. Визначити кінцевий об'єм газу, кількість відведеної теплоти та зміну його ентропії.

16. 3 кг метану при початковій температурі 50 °С та тиску 0,1 МПа стискається адіабатно до кінцевого тиску 1,0 МПа. Визначити кінцевий об'єм, температуру та витрачену роботу та зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та кількість теплоти.

17. 100 л водяної пари при початковій температурі 10 °С та тиску 0,5 МПа стискається адіабатно до кінцевого тиску 1,6 МПа. Визначити кінцевий об'єм, температуру та витрачену роботу та зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та кількість теплоти.

18. 5 кг азоту при початковій температурі 40 °С та тиску 2 бар стискається адіабатно до кінцевого тиску 20 бар. Визначити кінцевий об'єм, температуру та витрачену роботу та зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та кількість теплоти.

19. 0,2 кг СО при початковій температурі 25 °С та тиску 200 кПа стискається адіабатно до кінцевого тиску 1,0 МПа. Визначити кінцевий об'єм, температуру та витрачену роботу та зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії та кількість теплоти.

20. 1 кг кисню при початковій температурі 120 °С та тиску 2 МПа розширюється політропно до тиску 1 МПа. Визначити кінцевий стан газу, зміну

внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо показник політропи $n = 1,1$.

21. 0,5 кг повітря при початковій температурі 110 °С та тиску 1 МПа розширюється політропно до тиску 300 кПа. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо показник політропи $n = 1,2$.

22. 3 кг азоту при початковій температурі 100 °С та тиску 1,5 МПа розширюється політропно до тиску 0,5 МПа. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо показник політропи $n = 1,1$.

23. 100 л водяної пари при початковій температурі 120 °С та тиску 3 МПа розширюється політропно до тиску 1 МПа. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо показник політропи $n = 1,25$.

24. 0,01 м³ повітря при початковій температурі 25 °С та тиску 10 бар розширюється в циліндрі з рухомим поршнем політропно до тиску 1 бар. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо розширення в циліндрі політропне ($n = 1,3$).

25. 5 кг CO₂ при початковій температурі 125 °С та тиску 15 бар розширюється в циліндрі з рухомим поршнем політропно до тиску 5 бар. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо розширення в циліндрі політропне ($n = 1,13$).

26. 0,015 м³ азоту при початковій температурі 50 °С та тиску 18 бар розширюється в циліндрі з рухомим поршнем політропно до тиску 1,8 бар. Визначити кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти та отриману роботу, якщо розширення в циліндрі політропне ($n = 1,12$).

27. В балоні об'ємом 125 л знаходиться метан при тиску 2 МПа та початковій температурі 100 °С. Тиск навколишнього середовища 0,3 МПа. Визначити роботу розширення газу по адіабаті до тиску навколишнього середовища, кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти.

28. У балоні об'ємом 0,1 м³ знаходиться CO₂ при тиску 5 МПа та початковій температурі 80 °С. Тиск навколишнього середовища 0,4 МПа. Визначити роботу розширення газу по адіабаті до тиску навколишнього середовища, кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти.

29. В балоні об'ємом 80 л знаходиться кисень при тиску 30 бар та початковій температурі 25 °С. Тиск навколишнього середовища 2 бар. Визначити роботу розширення газу по адіабаті до тиску навколишнього середовища, кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти.

30. В балоні об'ємом $0,01 \text{ м}^3$ знаходиться азот при тиску 10 бар та початковій температурі $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск навколишнього середовища 1 бар. Визначити роботу розширення газу по адіабаті до тиску навколишнього середовища, кінцевий стан газу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, кількість підведеної теплоти.

31. Генераторний газ має такий об'ємний склад: $\text{H}_2 = 7,0 \%$; $\text{CH}_4 = 2,0 \%$; $\text{CO} = 27,6 \%$; $\text{CO}_2 = 4,8 \%$; $\text{N}_2 = 58,6 \%$. Визначити масові частки, позірну молекулярну масу, газову сталу, густину і парціальні тиски при $15 \text{ }^\circ\text{C}$ і 10^5 Па .

32. В 1 м^3 сухого повітря міститься за масою 21% O_2 і 79% N_2 . Визначити масовий склад повітря, його молекулярну масу і газову сталу, а також парціальні тиски кисню і азоту, якщо барометричний тиск $B = 0,1 \text{ МПа}$.

33. Продукти згорання мають наступний об'ємний склад: $\text{CO}_2 - 12,2 \%$, $\text{O}_2 - 7,1 \%$, $\text{CO} - 0,4\%$ і $\text{N}_2 - 80,3 \%$. Визначити масовий склад, газову сталу, густину і питомий об'єм суміші, якщо абсолютний тиск суміші $0,5 \text{ МПа}$, а температура $27 \text{ }^\circ\text{C}$.

34. Суміш складається з 7 кг водню і 93 кг окису вуглецю. Визначити газову сталу і густину суміші, а також парціальні тиски водню і окису вуглецю, якщо абсолютний тиск суміші $0,4 \text{ МПа}$, а температура $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

35. Суміш складається з 18% H_2 , 24% CO , 6% CO_2 і 52% N_2 за об'ємом. Визначити газову сталу, густину і масовий склад суміші, якщо абсолютний тиск суміші $0,4 \text{ МПа}$, а температура $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

36. Задано параметри водяної пари $P = 6 \text{ ат}$, $s = 6 \text{ кДж/кгК}$. Визначити стан пари і за допомогою hs -діаграми знайти її параметри.

37. Для водяної пари з параметрами $P = 10 \text{ ат}$ і $t = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ визначити за допомогою hs -діаграми ентальпію, ентропію, питомий об'єм, температуру насичення і ступінь перегріву.

38. Визначити швидкість витікання перегрітої пари через сопло, що звужується, якщо початкові параметри пари $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$ і $t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$, а тиск середовища, в яке відбувається витікання, $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$. Швидкістю на вході в сопло, втратами і теплообміном зі стінками можна знехтувати.

39. Визначити швидкість витікання перегрітої пари через сопло, що звужується, якщо початкові параметри пари $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ і $t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, а тиск середовища, в яке відбувається витікання, $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Втратами, теплообміном зі стінками і швидкістю пари на вході в сопло зневажити.

40. Волога пара з початковими параметрами $p_1 = 1,5 \text{ МПа}$ і ступеню сухості $0,95$ витікає із сопла Лавалля в середовище з тиском $p_2 = 0,2 \text{ МПа}$ в кількості $M = 5 \text{ кг/с}$. Визначити площі мінімального і вихідного перетинів сопла, якщо швидкісний коефіцієнт його $\rho = 0,95$. Швидкістю на вході в сопло зневажити.

41. Сталева труба з відношенням діаметрів $d_1/d_2 = 200/220 \text{ мм}$ і

коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 50 \text{ Вт/(м К)}$ покрита двошаровою ізоляцією. Товщина першого шару $\delta_1 = 50 \text{ мм}$, $\lambda_1 = 0,2 \text{ Вт/(м К)}$, другого шару – $\delta_2 = 80 \text{ мм}$, $\lambda_2 = 0,1 \text{ Вт/(м К)}$. Температура внутрішньої поверхні труби $327 \text{ }^\circ\text{C}$, зовнішнього шару ізоляції – $47 \text{ }^\circ\text{C}$.

42. Плоска стінка з цегли, що розташована у топці, з однієї сторони омивається продуктами згорання палива з температурою $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, а з іншого боку – повітрям приміщення з температурою $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти тепловіддачі конвекцією дорівнюють відповідно $\alpha_1 = 150 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, і $\alpha_2 = 50 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$. Коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda = 0,6 \text{ Вт/(м К)}$, товщина стінки $\delta = 755 \text{ мм}$. Крім тепловіддачі конвекцією з боку продуктів згорання на стінку падає променистий тепловий потік, частина якого $q_{\text{проп}} = 103 \text{ Вт/м}^2$ поглинається поверхнею стінки. Визначити густину теплового потоку, що проходить через стінку.

43. У скільки разів збільшиться термічний опір стінки сталевого змійовика, згорнутого з труби діаметром 38 мм , товщиною $2,5 \text{ мм}$, якщо покрити її шаром емалі? Вважати стінку плоскою. Коефіцієнт теплопровідності емалі $1,05 \text{ Вт/(м К)}$.

44. Визначити коефіцієнти тепловіддачі і питомі втрати теплоти з двох горизонтально розташованих паропроводів з діаметрами 200 і 100 мм , якщо температури їх стінок однакові і дорівнюють $310 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура повітря вдалині від паропроводу $26 \text{ }^\circ\text{C}$.

45. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки конденсатора паротурбінної установки до охолоджуючої води, якщо середня по довжині температура стінки $28 \text{ }^\circ\text{C}$, внутрішній діаметр трубки 16 мм , температура води на вході і виході з трубки дорівнюють відповідно $t_{p1} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ і $t_{p2} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ і середня швидкість води 2 м/с . Визначити також кількість переданої теплоти і довжину трубки.

46. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від вертикальної плити висотою 2 м до оточуючого спокійного повітря, якщо відомо, що температура поверхні плити $100 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура оточуючого повітря вдалині від плити $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити також кількість переданої теплоти, якщо площа поверхні плити 3 м^2 .

47. Визначити тепловий потік через 1 м^2 поверхні нагріву парового котла, вкритого збоку димових газів сажею ($\delta_c = 1 \text{ мм}$, $\lambda_c = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), а з боку води накипом ($\delta_n = 2 \text{ мм}$, $\lambda_n = 1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), і температури на границях шарів, якщо задані такі величини: температура димових газів $t_{p1} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, температура киплячої води $t_{p2} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, коефіцієнти тепловіддачі від газів до стінки $\alpha_1 = 120 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ і від стінки до киплячої води $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda = 55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, товщина стінки $\delta = 12 \text{ мм}$.

48. Необхідно ізолювати корпус циліндричного теплообмінного апарату, який має зовнішній діаметр 300 мм і температуру на поверхні $280 \text{ }^\circ\text{C}$, яку можна вважати такою самою і після накладання ізоляції. Температура на зовнішній

поверхні ізоляції не повинна перевищувати $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і теплові втрати з 1 пог. м корпусу теплообмінника не повинні перевищувати 250 Вт/м . Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції до оточуючого середовища $\alpha = 8\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Чи доцільно вибрати в якості ізоляції шлакову вату з $\lambda = 0,06\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$? Якщо доцільно, то визначити товщину шару ізоляції.

49. Залізобетонна димова труба ($d_2 = 0,8\text{ м}$; $d_3 = 1,3\text{ м}$) покрита з внутрішньої сторони шаром вогнетривкої цегли. Визначити товщину шару вогнетривкої цегли і температуру зовнішньої поверхні труби t_{c3} при умові, щоб втрати теплоти не перевищували $q_l = 2000\text{ Вт/м}$, а найбільші температури цегли та бетону не перевищували $t_{c1} = 425\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{c2} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

50. Трубопровід, виготовлений з вуглецевої сталі ($d_1 = 0,1\text{ м}$; $d_2 = 0,11\text{ м}$; $T_{c1} = 523\text{ К}$) покритий двома шарами теплової ізоляції однакової товщини ($\delta = 0,05\text{ м}$; $\lambda_2 = 0,06\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_3 = 0,12\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Визначити втрати теплоти q_l та температуру T_{c3} на межі стику (стикання) цих шарів. Повторити ці розрахунки при умові, що ізоляція першого шару встановлена на місце другого, і навпаки. Температура T_{c4} на зовнішній поверхні в обох випадках однакова і дорівнює 323 К .

51. Трубопровід діаметром 250 мм , який має температуру $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнт поглинання $0,8$, прокладено в коробі квадратного перерізу $a \times a = 1 \times 1\text{ м}$ і коефіцієнтом поглинання $0,9$. Визначити теплові витрати з одиниці довжини колектору, якщо температура оточуючого середовища (поза коробом) $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити, як зміняться теплові витрати, якщо між трубопроводом і коробом встановити сталевий екран діаметром 325 мм з коефіцієнтом поглинання $0,7$.

52. Визначити коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні трубки випарника киплячої води і тепловий потік при бульбашковому кипінні води у великому об'ємі, якщо температура поверхні $t_c = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вода перебуває під тиском $P = 6,18\text{ бар}$ при температурі насичення. Зовнішній діаметр трубки $d = 40\text{ мм}$, довжина $l = 5\text{ м}$.

53. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік, якщо в умові попередньої задачі температуру поверхні трубки збільшити до $t_c = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$?

54. Визначити теплове навантаження у водяному котлі при тиску $P = 15,55\text{ бар}$ і $\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти також для цих умов граничні значення $\alpha_{кр}$, $q_{кр}$ і $\Delta T_{кр}$.

55. Визначити коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні трубки випарника киплячому етиловому спирту і тепловий потік, якщо питоме теплове навантаження поверхні нагріву $q = 13950\text{ Вт/м}^2$. Спирт перебуває під тиском $P = 4,9\text{ бар}$, кипіння бульбашкове. Довжина та зовнішній діаметр трубки відповідно $l = 1,5\text{ м}$, $d = 0,03\text{ м}$.

56. На зовнішній поверхні трубки кипить вода під тиском $P = 27,98\text{ бар}$. Теплове навантаження на поверхні труби $q = 2,56 \cdot 10^5\text{ Вт/м}^2$. Визначити

температуру поверхні трубки, якщо: а) поверхня трубки чиста і б) трубка покрита шаром накипу завтовшки $\delta = 0,5$ мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 1,163$ Вт/м·К.

57. Пароводяний теплообмінник виконаний з 218 вертикально розташованих труб діаметром 0,020 м і висотою 1,5 м. Труби зсередини охолоджуються водою так, що температура їх зовнішньої поверхні дорівнює 180 °С. Суха насичена пара під тиском 1,2 МПа конденсується на зовнішньої поверхні труб. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від пари до поверхні труб та теплову потужність теплообмінника.

58. Гладка сталева труба повітропідігрівника з внутрішньої сторони омивається димовими газами із середньою температурою 320 °С, а ззовні – повітрям, причому він нагрівається від 25 до 250 °С. Коефіцієнт теплопровідності сталі 58 Вт/(м К). Визначити: коефіцієнт теплопередачі, віднесений до одного погонного і одного квадратного метра зовнішньої поверхні труби, і кількість тепла, що передана трубою за 1 год, якщо: зовнішній діаметр труби 51 мм; внутрішній діаметр труби 48 мм; довжина труби 4 м; наліт сажі всередині труби 1 мм, коефіцієнт теплопровідності сталі 0,23 Вт/(м К).

59. Визначити приведені ступінь чорноти і променистий тепловий потік між двома сталевими паралельно розташованими дисками з центрами на загальній нормалі. Температури поверхонь дисків 300 і 100 °С, диски мають однакові діаметри 300 мм, відстань між ними 250 мм. Ступінь чорноти дисків $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx 0,24$. Як зміняться ці величини при зменшенні відстані між дисками в 5 разів?

60. В приміщенні з температурою 20 °С прокладений сталевий трубопровід з діаметрами 219/210 мм, в якому зі швидкістю 1 м/с тече вода з температурою 140 °С. Температура внутрішньої стінки труби дорівнює 135 °С. Коефіцієнт теплопровідності сталі 45 Вт/(м·К). Визначити товщину шару ізоляції із совеліту ($\lambda_{із} = 0,1$ Вт/(м·К)) за умови, що температура зовнішньої стінки ізоляції не повинна перевищувати 45 °С, а лінійні втрати теплоти – 60 Вт/м.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

Практичне заняття 1

1. Що вивчає технічна термодинаміка?
2. Термодинамічний стан, що це?
3. Що ми називаємо термодинамічною системою, процесом, циклом?
4. Якими параметрами характеризується стан газу, які одиниці виміру цих параметрів?
5. Які термічні параметри стану вам відомі? Позначення, розмірність.
6. Калоричні параметри стану- визначення, позначення та розмірність.
7. Який газ ми називаємо ідеальним і чим він відрізняється від реального?
8. Напишіть рівняння стану ідеального газу і поясніть фізичний зміст питомої газової сталої?
9. В чому полягає суть I закону термодинаміки?
10. Записати співвідношення між параметрами процесів та залежності діявизначення роботи і теплоти.
11. Які величини визначають знак роботи і теплоти?
12. Які термодинамічні процеси ідеальних газів ви знаєте?

Практичне заняття 2

13. Дати визначення масової, мольної та об'ємної теплоємностям.
14. Чим відрізняється істинна теплоємність від середньої?
15. Виведіть рівняння, що зв'язує масову, мольну та об'ємну теплоємності.
16. Як записується рівняння Майєра?
17. Чому теплоємність газу при сталому тиску більша теплоємності при сталому об'ємі?
18. Які є способи задавання складу суміші газів?
19. Записати закон Дальтона для суміші газів.
20. Пояснити зміст парціального тиску.

Практичне заняття 3

21. Дати визначення процесів випаровування і кипіння.
22. Яка пара називається вологою насиченою?
23. Яка пара називається сухою насиченою?
24. Яка пара називається перегрітою?
25. Що характеризує ступінь сухості?

26. Чому процес пароутворення проходить при сталому тиску?
27. Показати основні термодинамічні процеси P - V та T - S в діаграмах. Назвати області де пара знаходиться в різних станах.
28. На T - s діаграмі показати площі, які відповідають прихованій теплоті пароутворення, теплоті перегріву пари, ентальпії сухої і перегрітої пари.
29. Як визначити роботу теплоти і зміну внутрішньої енергії в процесі пароутворення?
30. Як визначити питомий об'єм, ентальпію та ентропію вологої пари?
31. Який стан характеризує критична точка?

Практичне заняття 4

32. Описати механізм перенесення теплоти через теплопровідність.
33. Дайте визначення температурного поля, теплового потоку, градієнта температури.
34. Які закони переносу теплоти ви знаєте?
35. Що таке потенціал переносу теплоти?
36. Дайте визначення стаціонарної теплопровідності?
37. Сформулюйте основний закон теплопровідності і запишіть його рівняння.
38. Які розмірність та фізичний зміст коефіцієнтів теплопровідності, температуропровідності та термічного опору теплопровідності.
39. Що ми називаємо теплопередачею?
40. Виведіть рівняння теплопередачі через плоску і циліндричну стінки при стаціонарному режимі.
41. Фізичний зміст та розмірність коефіцієнта теплопередачі, лінійного коефіцієнта теплопередачі.
42. Які шляхи інтенсифікації теплопередачі ви знаєте?
43. Що називається критичним діаметром ізоляції?

Практичне заняття 5

44. Запишіть рівняння конвективного теплообміну Ньютона-Ріхмана та проаналізуйте його.
45. Фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі та його розмірність.
46. Сформулюйте теореми подібності.
47. Що характеризують критерії подібності Nu , Gr , Pr , Re .
48. Запишіть критеріальні рівняння для теплообміну при вільній та вимушеній конвекції; викладіть методику розв'язання задач конвективного теплообміну за їх допомогою.
49. Що таке визначальна температура та визначальний розмір?

Практичне заняття 6

50. За яких умов виникають процеси кипіння і конденсації?
51. Які відомі вам режими кипіння? Як впливає температурний напір на режими кипіння?
52. Як залежать тепловий потік і коефіцієнт тепловіддачі від режиму кипіння?
53. Від яких факторів залежить коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари?

Практичне заняття 7

54. Які типи теплообмінних апаратів вам відомі?
55. Записати рівняння теплового балансу і теплопередачі, які використовуються при розрахунку теплообмінних апаратів.
56. Що ми називаємо водяним еквівалентом?
57. Записати формули для розрахунку середньологарифмічного температурного напору. В яких випадках його можна замінити середньоарифметичним?
58. Які переваги має протитокова схема над прямотоковою?
59. Графічне зображення зміни температури гарячого і холодного теплоносіїв для прямотоку.
60. Графічне зображення зміни температури гарячого і холодного теплоносіїв для протитоку.
61. Графічне зображення зміни температури гарячого і холодного теплоносіїв для перехресної течії.
62. Які методики розрахунку теплообмінних апаратів ви знаєте?
63. Основи конструктивного розрахунку теплообмінних апаратів

Приклади тестових завдань

1. *Що вивчає технічна термодинаміка?*

а) процеси в яких обмін енергії супроводжується змінами хімічного складу тіл;

б) процеси в яких обмін енергії супроводжується змінами закономірного взаємного перетворення теплової і механічної енергії;

в). процеси в яких обмін енергії супроводжується змінами складу тіл для виконання механічної роботи;

г) відповіді вказані в пунктах а і б.

2. *Які гази називаються ідеальними?*

а) у яких атоми і молекули знаходяться в безперервному хаотичному русі, між якими діють сили тяжіння або відштовхування, об'єм самих частинок має кінцеву величину;

б) у яких відсутні сили взаємодії між молекулами і їх об'єм рівний нулю;

в) відповіді вказані в пунктах а і б. г) всі суміші газів.

3. *Що називається газовою сумішшю?*

а) тиск який би мав кожен газ, що входить до складу суміші, якби він знаходився один в тій же кількості, в тому ж об'ємі і при тій же температурі, що і в суміші;

б) механічна суміш газів в якій не відбувається ніяких хімічних реакцій;

в) відношення маси окремого газу, що входить до складу суміші, до маси всієї суміші;

г) відношення парціального об'єму одного компонента суміші до повного об'єму суміші.

4. *Який фізичний зміст універсальної газової сталої?*

а) Це теплота, яку виділяє 1 кмоль газу при його охолодженні на 1 градус;

б) Це робота, яку виконує 1 кг газу при зміні температури на 1 градус в ізобарному процесі;

в). Це теплота, яку виділяє 1 кмоль газу при його нагріванні на 1 градус;

г) Це робота, яку виконує 1 кг газу при зміні температури на 1 градус в ізохорному процесі;

5. *Яка розмірність тиску в рівнянні стану ідеального газу?*

а). мм.рт.ст.;

б) Па; в). кгс/см²;

г) мм.вод.ст.

6. *Пароутворення може здійснюватися шляхом.*

а) випаровуванням;

б) кипінням;

в) випаровуванням або кипінням.

7. Що показує критична точка води?

- а) температуру, при якій вода перетворюється в пару;
- б) тиск, при якому вода перетворюється в пару;
- в) температуру, при якій існують три фази у води: тверда, рідка і пара;
- г) температуру, при якій існування рідкої фази води неможливе.

8. Що показують горизонтальні лінії на h - s діаграмі водяної пари:

- а) ентропію пари;
- б) температуру пари;
- в) температуру води;
- г) ентальпією пари.

9. Що таке конвенція?

- а) поширення тепла в рідинах і газах при видимому переміщенні частинок;
- б) передача тепла конвенцією в поєднанні з теплопровідністю;
- в) відповіді вказані в пунктах а і б;
- г) передача тепла від одного тіла до іншого за допомогою променистої енергії.

10. Що таке променистий теплообмін?

- а) поширення тепла в рідинах і газах при видимому переміщенні частинок;
- б) передача тепла конвенцією в поєднанні з теплопровідністю;
- в) відповіді вказані в пунктах а і б;
- г) передача тепла від одного тіла до іншого за допомогою променистої енергії.

11. Складний процес теплопередачі через плоску стінку складається з простих процесів теплообміну:

- а) теплопровідність – теплопередача;
- б) тепловіддача - теплопровідність – теплопередача;
- в) тепловіддача – теплопровідність;
- г) теплопровідність - тепловіддача – теплопровідність.

12. Яке з головних рівнянь термодинаміки необхідне для проведення розрахунків теплообмінних апаратів?

- а) основне рівняння термодинаміки;
- б) рівняння першого закону термодинаміки;
- в) рівняння другого закону термодинаміки;
- г) рівняння теплового балансу рідин, що рухаються.

13. Теплопровідність це:

- а) передача тепла між частинами тіл що перебувають у безперервному контакті;
- б) наука про закони поширення тепла у різних середовищах при передачі його від більш нагрітих до менш нагрітих;
- в) будь-яка передача тепла.

14. Теплопередача це:

а) передача тепла між частинами тіл що перебувають у безперервному контакті;

б) наука про закони поширення тепла у різних середовищах при передачі його від більш нагрітих до менш нагрітих;

в) будь-яка передача тепла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Константинов С. М. Теоретичні основи теплотехніки: підручник. – Київ : Золоті ворота, 2012. – 592 с.

2. Миронов О. С. Теплотехніка: основи термодинаміки, теорія теплообміну / О. С. Миронов, М. Р. Брижа, В. Б. Бойко та ін.. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЕНЕМ», 2011. – 424 с.

3. Константинов С. М.. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну: навч. посіб. / С. М. Константинов, Р. В. Луцик. – Київ: Освіта України, 2009. – 544 с.

4. Драганов Б. Х. Теплотехніка: підручник / Б.Х. Драганов, О. М. Бессараб, А. А. Долінський. – 2ге вид., перероб. і доп. – Київ: Фірма «Інкос», 2005. – 400 с.

5. Гнатишин Я. М. Теплотехніка: навч. посіб. / Я. М. Гнатиш, В. І. Криштапович. – Київ : Знання, 2008. -- 364 с.

6. Дреус А.Ю. Збірник задач з тепломасообміну : навч. посіб. / А. Ю. Дреус, К. Є. Лисенко, В. О. Сясев. – Дніпропетровськ :ДНУ ім. Гончара, 2016. – 124 с.

7. Чепрасов О. І. Термодинаміка і теплотехніка: навчально-методичний посібник для студентів денної та заочної форми навчання / О. І. Чепрасов, І. М. Мних. – Запоріжжя : [б. в.], 2018. – 161 с.

Величина	Процес				
	Ізохорний	Ізобарний	Ізотермічний	Адіабатний	Політропний
1	2	3	4	5	6
Характеристика процесу	$v = \text{Const}$	$p = \text{Const}$	$T = \text{Const}$	$\delta q = 0$	$c_n = \text{Const}$
Рівняння процесу	$\frac{p}{T} = \text{Const}$	$\frac{v}{T} = \text{Const}$	$pv = \text{Const}$	$pv^k = \text{Const}$ $Tv^{k-1} = \text{Const}$ $\frac{T^{k-1}}{p^k} = \text{Const}$	$pv^n = \text{Const}$ $Tv^{n-1} = \text{Const}$ $\frac{T^{n-1}}{p^n} = \text{Const}$
Співвідношення між термічними параметрами процесу	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$
Масова теплоємність газу $c_x, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_v = \frac{R}{k-1}, c_v \neq f(T)$	$c_p = kc_v = \frac{kR}{k-1}$ $c_p \neq f(T)$	$c_T = \infty$	$c_{\text{ад}} = 0$	$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$
Об'ємна теплоємність газу $c'_x, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$c'_x = c_x \frac{\mu}{V_\mu}$				

1	2	3	4	5	6
Зміна питомої внутрішньої енергії $\Delta u, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\Delta u = c_v \Delta T = c_v (T_2 - T_1) = c_v (t_2 - t_1) = \begin{cases} c_v _{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_v _0^{t_2} t_2 - c_v _0^{t_1} t_1, c_v = f(t) \\ \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1} (t_2 - t_1), c_v \neq f(t) \end{cases}$				
Зміна повної внутрішньої енергії $\Delta U, \text{Дж}$	$\Delta U = m \Delta u$				
Зміна питомої ентальпії $\Delta h, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\Delta h = c_p \Delta T = c_p (T_2 - T_1) = c_p (t_2 - t_1) = \begin{cases} c_p _{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_p _0^{t_2} t_2 - c_p _0^{t_1} t_1, c_p = f(t) \\ \frac{kR}{k-1} (T_2 - T_1) = \frac{kR}{k-1} (t_2 - t_1), c_p \neq f(t) \end{cases} \quad \Delta h = k \Delta u$				
Зміна повної ентальпії $\Delta H, \text{Дж}$	$\Delta H = m \Delta h = k \Delta U$				
Зміна питомої ентропії $\Delta s, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$				
	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = R \ln \frac{v_2}{v_1} =$ $= R \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\Delta s = 0$	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$ $\Delta s = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$
Зміна повної ентропії $\Delta S, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$\Delta S = m \Delta s$				

1	2	3	4	5	6
Питома робота l , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$l = 0$	$l = p(v_2 - v_1) =$ $= R(T_2 - T_1)$	$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} =$ $= RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$l = -\Delta u =$ $= c_{vm}(T_1 - T_2) =$ $\frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) =$ $= \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{k-1} =$ $= \frac{RT_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) =$ $= \frac{p_1 v_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)$	$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) =$ $= \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} =$ $= \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) =$ $= \frac{p_1 v_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)$
Повна робота L , Дж	$L = ml$				
Питома кількість теплоти q , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$q = \Delta u$	$q = \Delta h$	$q = l$	$q = 0$	$q = \Delta u + l =$ $= c_n \Delta T = c_n (T_2 - T_1)$
Повна кількість теплоти Q , Дж	$Q = mq$				
Частка теплоти, що витрачається на зміну внутрішньої енергії, φ	$\varphi = 1$	$\varphi = \frac{1}{k}$	$\varphi = 0$	$\varphi = \infty$	$\varphi = \frac{n-1}{n-k}$

Заданий склад суміші	Визначуваний склад суміші	Уявна молярна маса суміші, $\mu_{\text{сум}},$ $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	Питома газова стала суміші, $R_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{К})}$	Питомий об'єм суміші, $v_{\text{сум}},$ $\text{м}^3/\text{кг}$ при нормальних умовах $v_{\text{сум.н.у}},$ $\text{м}^3/\text{кг}$	Густина суміші, $\rho_{\text{сум}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$ при нормальних умовах $\rho_{\text{сум.н.у}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Парціальний тиск компонентів суміші, $P_i,$ Па	Тепломність суміші масова: $C_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{К})}$ об'ємна: $C'_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{м}^3 \times \text{К})}$
Масовий g_i	$r_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$\mu_{\text{сум}} = \frac{8314}{R_{\text{сум}}}$ $\mu_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{\text{сум}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум}}}$ $R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i$	$v_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i v_i$ $v_{\text{сум.н.у}} = \frac{22,4}{\mu_{\text{сум}}}$	$\rho_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}$ $\rho_{\text{сум.н.у}} = \frac{\mu_{\text{сум}}}{22,4}$	$P_{\text{сум}} \times \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$C_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i c_i$ $C'_{\text{сум}} = \rho_{\text{сум}} C_{\text{сум}}$
Об'ємний r_i	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$	$\mu_{\text{сум}} = \frac{8314}{R_{\text{сум}}}$ $\mu_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$	$R_{\text{сум}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум}}}$ $R_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}$	$v_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{v_i}}$ $v_{\text{сум.н.у}} = \frac{22,4}{\mu_{\text{сум}}}$	$\rho_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i$ $\rho_{\text{сум.н.у}} = \frac{\mu_{\text{сум}}}{22,4}$	$P_{\text{сум}} \times r_i$	$C'_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i c'_i$

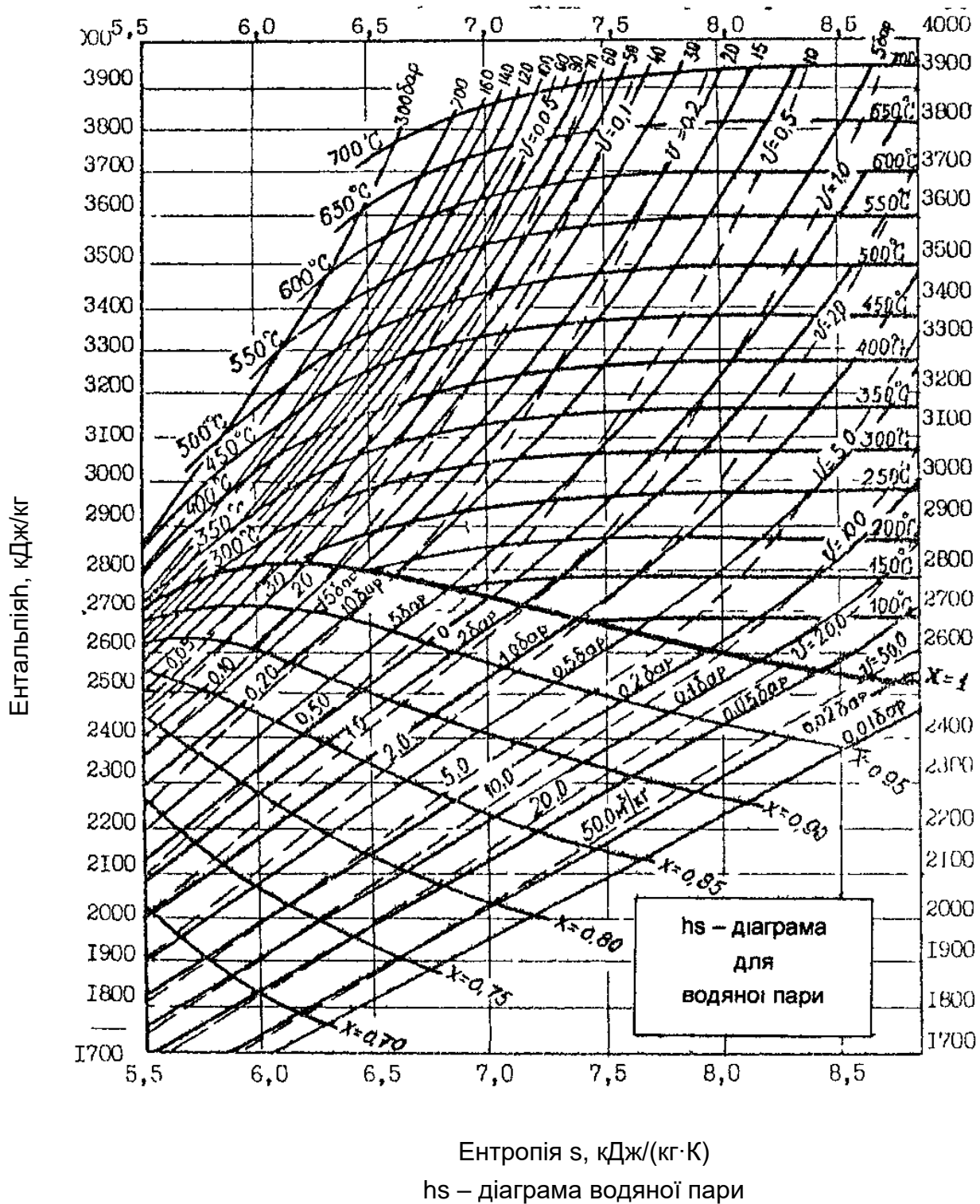
Параметри води та перегрітого пару по тискам і температурам

ρ, МПа	Параметри	$t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 60 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 100 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 160 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 200 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T =$ $= 240 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 300 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 360 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 400 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 440 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 500 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t =$ $= 550 \text{ } ^\circ\text{C}$
0,005	ν	0,0010002	30,73	34,43	39,98	43,68	47,37	52,92	58,46	62,16	65,85	71,39	76,01
	h	0	2612	2668	2803	2880	2958	3077	3198	3280	3363	3490	3598
	s	0	8,549	8,764	9,047	9,219	9,376	9,595	9,796	9,921	10,42	10,214	10,351
0,01	ν	0,0010002	15,35	17,20	19,98	21,83	23,68	26,46	29,23	31,08	32,93	35,70	38,01
	h	0	2611	2688	2802	2879	2957	3077	3198	3280	3363	3490	3598
	s	0	8,227	8,442	8,727	8,897	9,056	9,274	9,475	9,601	9,722	9,895	10,031
0,02	ν	0,0010002	0,0010171	8,584	9,977	10,908	11,832	13,220	14,606	15,530	16,45	17,82	18,99
	h	0,01	251,1	2687	2801	2879	2957	3077	3198	3280	3363	3490	3598
	s	0	0,8307	8,120	8,406	8,576	8,735	8,954	9,155	9,281	9,402	9,575	9,713
0,03	ν	0,0010002	0,00110171	5,713	6,645	7,264	7,882	8,809	9,734	10,351	10,967	11,891	12,661
	h	0	251,1	2685	2801	2878	2956	3076	3198	3280	3363	3490	3598
	s	0	0,8307	7,931	8,217	8,388	8,547	8,766	8,967	9,093	9,215	9,388	9,526
0,04	ν	0,0010002	0,00110171	4,282	4,982	5,447	5,912	6,608	7,301	7,765	8,228	8,921	9,498
	h	0	251,1	2684	2800	2878	2956	3076	3197	3279	3362	3480	3597
	s	0	0,8307	7,798	8,086	8,256	8,415	8,635	8,835	8,962	9,083	9,251	9,393
0,05	ν	0,0010002	0,00110171	3,420	3,982	4,355	4,726	5,284	5,841	6,212	6,582	7,136	7,598
	h	0,1	251,1	2683	2799	2877	2956	3076	3197	3279	3362	3489	3597
	s	0	0,8307	7,693	7,981	8,152	8,311	8,531	8,731	8,858	8,979	9,152	9,290
0,1	ν	0,0010001	0,00110171	1,695	1,984	2,172	2,359	2,638	2,918	3,102	3,288	3,595	3,797
	h	0,1	251,1	2676	2796	2875	2954	3074	3195	3278	3361	3488	3596
	s	0	0,8307	7,361	7,654	7,828	7,988	8,211	8,414	8,541	8,661	8,833	8,969
0,2	ν	0,001	0,00110171	0,0010434	0,984	1,080	1,175	1,316	1,457	1,549	1,641	1,781	1,897
	h	0,2	251,1	419,0	2790	2870	2950	3070	3194	3276	3360	3487	3595
	s	0	0,8307	0,1367	7,324	7,501	7,663	7,887	8,092	8,219	8,340	8,512	8,648
0,3	ν	0,001	0,00110171	0,0010434	0,6512	0,7161	0,7802	0,8750	0,9690	1,032	1,094	1,187	1,264
	h	0,3	251,1	419,1	2783	2864	2946	3068	3192	3275	3359	3486	3594
	s	0	0,8307	1,3066	7,120	7,306	7,470	7,695	7,902	8,030	8,151	8,324	8,460
0,5	ν	0,00099999	0,00110171	0,0010433	0,3839	0,4249	0,4644	0,5224	0,5794	0,6173	0,6548	0,7109	0,7576
	h	0,5	251,1	419,1	2767	2854	2937	3062	3188	3272	3356	3484	3592
	s	0	0,8307	1,3063	6,684	7,056	7,224	7,454	7,672	7,791	7,913	8,086	8,223
0,7	ν	0,0009998	0,00110171	0,0010432	0,0011020	0,2998	0,3290	0,3711	0,4124	0,4396	0,4667	0,5069	0,5403
	h	0,7	251,1	419,1	675,3	2844	2929	3056	3183	3268	3353	3482	3591
	s	0	0,8307	1,3061	1,941	6,884	7,058	7,291	7,502	7,632	7,655	7,929	8,065

ρ,МПа	Пара- метри	t =0 °C	t = = 60 °C	t = = 100 °C	t= =160°C	t= =200 °C	t= =240 °C .	t = =300°C	t = =360 °C	t = = 4 00 °C	t= =440° C	t= =500 °C	t= =550° C
1,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009996 1,0 0	0,0010166 251,8 0,8298	0,0010430 419,5 1,3658	0,0011018 675,4 1,941	0,02060 2827 6,692	0,2274 2918 6,877	0,2578 3048 7,111	0,2871 3177 7,330	0,3075 3263 7,461	0,3255 3349 7,585	0,3539 3479 7,561	0,3776 3588 7,898
1,6	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009997 1,6 0	0,0010163 252,2 0,8296	0,0010426 419,7 1,3052	0,0011013 675,7 1,940	0,0011565 852,4 2,329	0,1382 2893 6,662	0,1585 3030 6,877	0,1775 3164 7,098	0,1899 3253 7,233	0,2021 3341 7,360	0,2201 3472 7,537	0,2350 3582 7,675
2,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009991 2,0 0	0,0010161 252,6 0,8294	0,0010424 420,1 1,3048	0,0011011 675,9 1,940	0,0011561 852,4 2,328	0,1084 2875 6,491	0,1255 3019 6,757	0,1410 3156 6,985	0,1511 3246 7,112	0,1609 3335 7,261	0,1755 3468 7,429	0,1875 3578 7,569
3,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009986 3,0 0	0,0010157 253,5 0,8290	0,0010419 420,9 1,3038	0,0011004 676,4 1,938	0,0011551 852,6 2,326	0,06826 2823 6,225	0,08119 2988 6,530	0,09230 3135 6,773	0,09929 3229 6,616	0,1061 3321 7,048	0,1161 3456 7,231	0,1243 3569 7,373
4,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009981 4,0 0,0002	0,0010152 254,4 0,8282	0,0010414 421,7 1,3030	0,0010997 677,0 1,936	0,0011541 853,0 2,324	0,0012280 1037,4 2,698	0,05888 2955 6,352	0,06781 3113 6,613	0,07337 3212 6,762	0,00787 3302 6,900	0,08642 3445 7,087	0,0927 3560 7,231
5,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009976 5,1 0,0004	0,0010147 255,3 0,8273	0,0010408 422,5 1,3020	0,0010990 677,7 1,935	0,0011530 853,6 2,322	0,0012264 1037,4 2,696	0,4539 2920 2,200	0,05316 3090 6,483	0,05781 3193 6,640	0,06224 3291 6,781	0,06858 3433 6,974	0,0737 3550 7,120
6,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009971 6,1 0,0004	0,0010143 256,1 0,8268	0,0010403 423,3 1,3012	0,0010983 678,4 1,934	0,0011522 854,0 2,320	0,0012249 1037,6 2,693	0,03620 2880 6,060	0,04334 3067 6,371	0,04742 3174 6,535	0,05142 3275 6,681	0,05667 3421 6,878	0,06103 3540 7,028
7,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009966 7,1 0,0004	0,0010139 256,9 0,8263	0,0010400 424,1 1,3003	0,0010977 679,0 1,933	0,0011512 854,5 2,319	0,0012235 1037,8 2,591	0,02948 2835 5,925	0,03630 3042 6,270	0,03997 3155 6,442	0,04338 3259 6,693	0,04817 3409 6,595	0,05197 3530 6,948
8,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009996 8,1 0,0004	0,0010134 257,8 0,8260	0,0010398 424,9 0,2996	0,0010972 679,6 1,931	0,0011504 855,0 2,317	0,0012221 1037,9 2,688	0,02429 2784 5,788	0,03098 3017 6,177	0,03438 3135 6,442	0,03746 3244 6,515	0,04177 3397 6,722	0,04516 3520 6,876
9,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009996 9,1 0,0004	0,0010129 258,7 0,8253	0,0010393 425,7 1,2988	0,0010966 680,3 1,930	0,0011496 855,5 2,316	0,0012207 1038,1 2,686	0,0014016 1334,3 3,249	0,02678 2989 6,089	0,03001 3114 6,280	0,03286 3227 6,443	0,03680 3386 6,656	0,03988 3510 6,813
10,0	<i>ν</i> <i>h</i> <i>s</i>	0,0009996 10,1 0,0004	0,0010125 259,6 0,8247	0,0010386 426,5 1,2988	0,0010956 681,0 1,929	0,001148 856,0 2,314	0,0012185 1038,3 2,684	0,0013970 1342,3 3,244	0,02337 2958 6,002	0,02646 3093 6,207	0,02915 3211 6,377	0,03281 3372 6,596	0,03558 3499 6,758

Параметри насиченої водяної пари за тиском

p , МПа	t_n , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	g , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
0,2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,530	7,127
0,3	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
0,4	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
0,5	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,6	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
0,80	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,148	6,587
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,3	2785	1987	2,216	6,523
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
1,6	210,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
2,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,04	908,5	2799	1891	2,447	6,340
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,654	6,256
3,0	233,8	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1896	2,646	6,186
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	23,35	1164,4	2794	1640	2,921	5,973
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
8,0	294,98	0,0013838	0,02353	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
10,0	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
11,0	318,04	0,001489	0,01592	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
12,0	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,493
13,0	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
14,0	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
15,0	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
16,0	347,32	0,001710	0,00931	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
18,0	356,96	0,001837	0,00750	133,2	1732	2510	778,2	4,871	5,107
20,0	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583,0	4,015	4,928
22,0	373,70	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152,0	4,303	4,591



Ентальпія h , кДж/кг
 Ентропія s , кДж/(кг·К)
 hs – діаграма водяної пари

Фізичні властивості сухого повітря В=760 мм. рт. ст..

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p КДж/(кг.°C)	$\lambda \times 10^2$ Вт(м.°C)	$\alpha \times 10^4$ М ² /с	$\mu \times 10^6$ Н.с/м ²	$\nu \times 10^6$ м ² /с	Pr
-50	1,584	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	2,83	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	41,8	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	165,1	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

Фізичні властивості води на лінії насичення

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$p, \text{ бар}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$i, \text{ кДж/кг}$	$c_p, \text{ кДж/ (кг} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{ Вт/ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}$	$\alpha \times 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\mu \times 10^6, \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$	$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta \times 10^4, \text{ 1/К}$	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	2,58
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	1,6
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	0,965
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	0,915
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	0,898
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	0,888
240	33,48	813,6	1037,5	4,760	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	0,883
250	39,78	799,0	1085,7	4,870	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	0,884
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	0,892
270	55,05	767,9	1185,3	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	0,905
280	64,19	750,7	1236,8	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	0,917
290	74,45	732,3	1290,0	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	0,944
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	0,986
310	98,70	691,1	1402,2	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	1,05
320	112,90	667,1	1462,1	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	1,14
330	128,65	640,2	1526,2	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	1,25
340	146,08	610,1	1594,8	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	1,42
350	165,37	574,4	1671,4	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	1,70
360	186,74	528,0	1761,5	14,65	0,367	4,2	66,7	0,126	109	2,66
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	6,80

	<p>Питомий тепловий потік: $q = \frac{t_1 - t_2}{\delta/\lambda}$</p> <p>$q = \frac{t_1 - t_2}{R_\lambda}$; де $\delta/\lambda = R_\lambda$ - термічний опір теплопровідності</p> <p>Тепловий потік: $Q = \frac{F \cdot (t_1 - t_2)}{\delta/\lambda}$</p>
	<p>Тепловий потік: $Q = \frac{F \cdot (t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i}$</p> <p>$\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i = R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + \dots + R_{\lambda n}$ - сума термічних опорів всіх шарів</p>
<p>Теплопровідність циліндричної стінки</p>	$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}$ <p>$\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} = R_{\lambda l}$ - лінійний термічний опір</p> $Q = \frac{\pi l(t_1 - t_2)}{R_{\lambda l}}$ $Q = \frac{\pi l(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$

Додаток 9

Критеріальні рівняння теплообміну при вільній конвекції в необмеженому просторі для середовищ з $Pr \geq 0,7$

Умови процесу теплообміну	Критеріальні рівняння	Область застосування
Плівковий режим	$Nu = 0,5$	$Gr \cdot Pr < 0,001$
Струминний режим	$Nu = 1,18 (Gr \cdot Pr)^{1/8}$	$0,001 < Gr \cdot Pr < 500$
Перехідний режим	$Nu = 0,54 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$	$500 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$
Вихровий режим	$Nu = 0,135 (Gr \cdot Pr)^{1/3}$	$2 \cdot 10^7 < Gr \cdot Pr < 10^{13}$

Примітки:

1. Визначальна температура – середня температура пограничного шару $T_m = (T_c + T_{cp}) / 2$.
2. Визначальний розмір: для труб – діаметр; для вертикальних плит – висота; для горизонтальних плит – менший лінійний розмір.

Критеріальні рівняння конвективного теплообміну при вимушеній течії по прямих трубах і каналах середовищ з $Pr \geq 0,7$

Умови процесу теплообміну	Критеріальні рівняння	Область зміни аргументу
Ламінарний режим	$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$Re \leq 2000$ $Gr < 1 \cdot 10^6$
Перехідний режим	$Nu = K_0 Pr^{0,43} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$2000 < Re < 1 \cdot 10^4$
Турбулентний режим	$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$Re \geq 1 \cdot 10^4$

Критеріальні рівняння конвективного теплообміну при поперечному обтіканні одиночних труб і трубних пучків ($\psi = 90^\circ$) для середовищ з $Pr \geq 0,7$

Умови процесу теплообміну	Критеріальні рівняння	Границі зміни аргументу
Поперечне обтікання одиночної труби	$Nu = 0,59 Re^{0,47} Pr^{0,58} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$10 < Re < 1 \cdot 10^3$
	$Nu = 0,21 Re^{0,67} Pr^{0,34} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$
Поперечне обтікання трубних пучків: а) шахових б) коридорних	$Nu = 0,41 Re^{0,6} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$2 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$
	$Nu = 0,23 Re^{0,65} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$	$2 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$

Примітки: 1. Визначальна температура – середня температура потоку T_{cp} . Визначальний розмір – зовнішній діаметр труб $d_{зов}$. При куті атаки $\psi < 90^\circ$ слід вводити поправкові коефіцієнти ε_ψ значення яких наведено нижче:

ψ	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
--------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Навчально-методичне видання

ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Методичні вказівки та завдання
до виконання практичних занять та самостійної роботи
для студентів спеціальності
183 «Технології захисту навколишнього середовища»
галузі знань 18 «Виробництво та технологія»

Укладачі: ЧЕПУРНА Наталія Володимирівна,
КИРИЧЕНКО Михайло Анатолійович

Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Підписано до друку 24.11. 2023. Формат 60 × 84 ^{1/16}.
Ум. друк. арк. 3,25. Обл.-вид. арк. 3,5.
Електронний документ. Вид. № 109/III-23

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002