

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Кафедра транспортних систем та енергомеханічних комплексів

Л.Н. Ширін, О.П. Трофимова, Ю.О. Комісаров

ТЕРМОДИНАМІКА ТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня бакалавра
освітньо-професійної програми
«Нафтогазова інженерія та технології»
зі спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології

Дніпро
НТУ «ДП»
2025

Термодинаміка та теплопередача [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня бакалавра освітньо-професійної програми «Нафтогазова інженерія та технології» зі спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології / уклад.: Л.Н. Ширін, О.П. Трофимова, Ю.О. Комісаров ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. – 89 с.

Укладачі:

Л.Н. Ширін, д-р техн. наук, проф.,

О.П. Трофимова,

Ю.О. Комісаров.

Затверджено науково-методичною комісією зі спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології (протокол № 6 від 06 лютого 2025 р.) за поданням кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів (протокол № 38 від 03 грудня 2024 р.).

Уміщено короткі теоретичні відомості за темами лекційних занять, завдання та варіанти практичних робіт з прикладами вирішення типових задач, контрольні питання, список використаної та рекомендованої літератури.

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності здобувачів ступеня бакалавра освітньо-професійної програми «Нафтогазова інженерія та технології» зі спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології та закріплення практичних навичок у засвоєнні дисципліни «Термодинаміка та теплопередача».

Відповідальний за випуск завідувач кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів Л.Н. Ширін, д-р техн. наук, проф.

ЗМІСТ

Загальні положення	4
Практична робота № 1. Вивчення основних параметрів стану газів та їх вимірювання.....	5
Практична робота № 2. Вивчення методики розрахунку параметрів за рівнянням стану ідеального газу. Вивчення методики розрахунку параметрів за рівнянням стану ідеального газу та суміші ідеальних газів	20
Практична робота № 3. Визначення параметрів термодинамічних процесів зміни стану ідеальних газів.....	31
Практична робота № 4. Визначення параметрів процесів зміни стану водяної пари аналітично та за допомогою таблиць і діаграм.....	44
Практична робота № 5. Визначення параметрів газових і парових потоків при їх витіканні.....	48
Практична робота № 6. Вивчення методики розрахунку елементарних процесів теплообміну.....	56
Практична робота № 7. Вивчення методики розрахунку процесів теплопередачі.....	83
Критерії оцінювання.....	88
Список використаної та рекомендованої літератури.....	88

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Дисципліна «Термодинаміка та теплопередача» тісно пов'язана з технікою та технологіями. У рамках курсу розглянуто параметри, що характеризують стан газів, їхній взаємозв'язок, розкриті закономірності енергообмінних процесів у газових середовищах, закономірності фазових переходів. Розглянуто властивості газових потоків та методи їх розрахунку, умови раціонального вибору матеріалу для теплової ізоляції трубопроводів, види теплообміну, закони теплопередачі. Розглядаються шляхи інтенсифікації процесів теплопередачі, обґрунтування інженерних методів розрахунку процесів тепловіддачі. Досліджується вплив дроселювання на роботоздатність газового потоку.

Навчальне видання призначено для закріплення практичних навичок щодо виконання розрахунку параметрів гідрогазодинамічних процесів, які супроводжують рух нафти і газу в пласті/свердловинах, промислових і магістральних трубопроводах із врахуванням основних законів термодинаміки та теплопередачі. Практичні роботи представлено за типовою структурною схемою: тема, мета роботи, теоретичні відомості, умови до індивідуальних завдань, приклади розв'язування типових задач та контрольні запитання.

В результаті опанування практичних занять здобувачі повинні:

- ❖ знати основні поняття термодинаміки, основні термодинамічні параметри стану газів, розуміти взаємозв'язок між ними, знати рівняння стану ідеального газу;
- ❖ знати методику описування властивостей суміші ідеальних газів та розуміти сутність величин, що її характеризують;
- ❖ знати сутність понять теплота, робота, внутрішня енергія; знати перший закон термодинаміки, розуміти графічну інтерпретацію роботи та знати методи визначення тепла процесу; розуміти сутність теплоємності, знати параметри стану ентальпія та ентропія, вміти графічно відображати тепло процесу;
- ❖ знати основні термодинамічні процеси зміни стану ідеального газу;
- ❖ знати особливості перетворення теплоти на роботу та умови роботи теплових двигунів, розуміти сутність другого закону термодинаміки та принципу зростання ентропії ізольованої термодинамічної системи;
- ❖ знати основні закономірності фазових переходів у чистій речовині, вміти визначати параметри стану пари за таблицями та спеціальними діаграмами, вміти розраховувати парові термодинамічні процеси;
- ❖ знати закони термодинаміки потоку газу та пари і вміти застосовувати їх при розрахунках процесів витікання з сопел, процесу дроселювання, змішування газових потоків;
- ❖ знати основні закономірності, яким підпорядковуються теплові потоки в процесах теплопровідності, тепловіддачі, променевого теплообміну;
- ❖ знати методи інтенсифікації та гальмування процесів теплопередачі в технічних системах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

ВИВЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ГАЗІВ ТА ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи: навчитися користуватися приладами для визначення основних термодинамічних параметрів стану робочих тіл. У результаті виконання практичної роботи студент повинен: знати принцип роботи і будову приладів для вимірювання тиску і температури, одиниці виміру тиску; вміти користуватися приладами для вимірювання тиску і температур, проводити перерахунок одиниць тиску.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати основні поняття термодинаміки, основні термодинамічні параметри стану газів, розуміти взаємозв'язок між ними, знати рівняння стану ідеального газу.

1.1 Теоретична частина

Стан робочого тіла (газу) характеризується величинами, що відображають середній результат взаємодії молекул, з яких складається робоче тіло (газ). Ці величини мають назву основних параметрів стану тіла. До них відносяться: абсолютний тиск, абсолютна температура і питомий об'єм (або густина).

Вимірювання тиску. Тиск є силою, яка припадає на одиницю поверхні .

Якщо позначити через p тиск газу, а силу, яка припадає на поверхню S , буквою F , то

$$p = \frac{F}{S}, \text{ Па.} \quad (1.1.1)$$

У міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнятий паскаль (Па), який дорівнює силі, виміряній у н'ютонах (Н) і віднесеній до одиниці поверхні (м^2), тобто $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Величина 1 Па для багатьох технічних вимірювань дуже мала, тому застосовують більш масштабні одиниці: кілопаскаль або мегапаскаль. $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$, $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$.

Слід розрізняти поняття: абсолютний тиск, надлишковий тиск і вакуум (розрідження).

Нулем відліку абсолютного (істинного) тиску є абсолютний вакуум.

Нулем відліку надлишкового тиску служить тиск навколишнього середовища, в якому знаходиться вимірювальний прилад – манометр. Тиск навколишнього середовища – це атмосферний тиск.

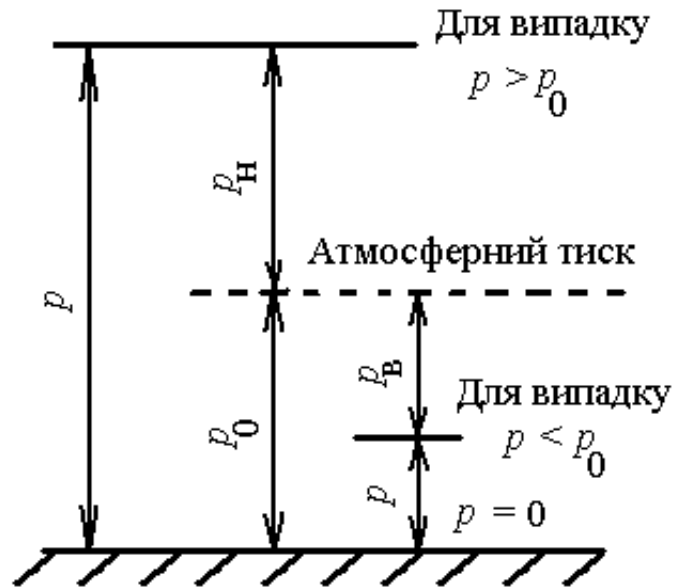


Рисунок 1.1.1 – Графічне зображення початків відліку тиску

Звичайно на практиці вимірюють (рис. 1.1.1):

а) абсолютний атмосферний (барометричний) тиск p_0 (прилади, які вимірюють атмосферний тиск, називаються барометрами);

б) надлишковий (манометровий) тиск p_n , який перевищує тиск навколишнього середовища (атмосферний) і вимірюється манометром;

в) розрідження або вакуум p_v , тобто різницю між атмосферним і абсолютним тиском (прилади для вимірювання розрідження називаються вакуумметрами, за їх показами судять, наскільки тиск у вимірюваному середовищі менший від тиску навколишнього середовища (атмосферного)).

При вимірюванні надлишкового тиску і розрідження початком відліку служить тиск навколишнього середовища (атмосферний), який не є постійною величиною, тому ці величини не можуть бути параметрами стану.

Таким чином виходить, що абсолютний тиск може бути розрахований за формулами:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p_n; \\ p &= p_0 - p_v. \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

Співвідношення між одиницями тиску різних систем наведені в табл. 1.1.1. Коефіцієнти перерахунку подані з точністю до трьох значущих цифр, що цілком достатньо для практичних розрахунків.

У даний час для практичного вимірювання тиску найчастіше застосовують кілограм-силу на 1 см^2 (технічна атмосфера): $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ кГ/см}^2 = 1 \text{ ат}$.

Оскільки $1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Н}$, а $1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2$, тоді:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Таблиця 1.1.1 – Співвідношення між одиницями тиску

Одиниці	Паскаль (Н/м ²)	Бар (10 ⁵ Н/м ²)	Технічна атмосфера (кГ/см ²)	Фізична атмосфера (атм)	Міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст.)	Міліметр водяного стовпа (мм вод. ст.)
1 Па (Н/м ²)	1	10 ⁻⁵	1,02 · 10 ⁻⁵	0,987 · 10 ⁻⁵	7,50 · 10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	0,987	750	1,02 · 10 ⁻⁴
1 ат (кГ/см ²)	9,81 · 10 ⁴	0,981	1	0,968	736	10 ⁴
1 атм (фіз.)	1,01 · 10 ⁵	1,013	1,03	1	760	1,03 · 10 ⁴
1 мм рт. ст.	133	1,33 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод. ст. (1кГ/м ²)	9,81	0,98 · 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,968 · 10 ⁻⁴	0,0736	1

Рідинні прилади для вимірювання тиску показують його в мм рт. ст. і мм вод. ст.

Якщо тиск зміряний висотою стовпця рідини, то для переведення його в паскалі (Па) користуються формулою:

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \text{ Па}, \quad (1.1.3)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; h – висота стовпа рідини, м.

Залежно від меж тиску і потрібної точності обирають відповідний тип манометра [2].

Прилади для вимірювання низького тиску. Для вимірювання невеликого надлишкового тиску і розрідження (вакууму) газу застосовують U-подібні рідинні манометри (рис. 1.1.2) і мікроманометри, в яких робочою рідиною можуть бути дистильована вода, ртуть або спирт.

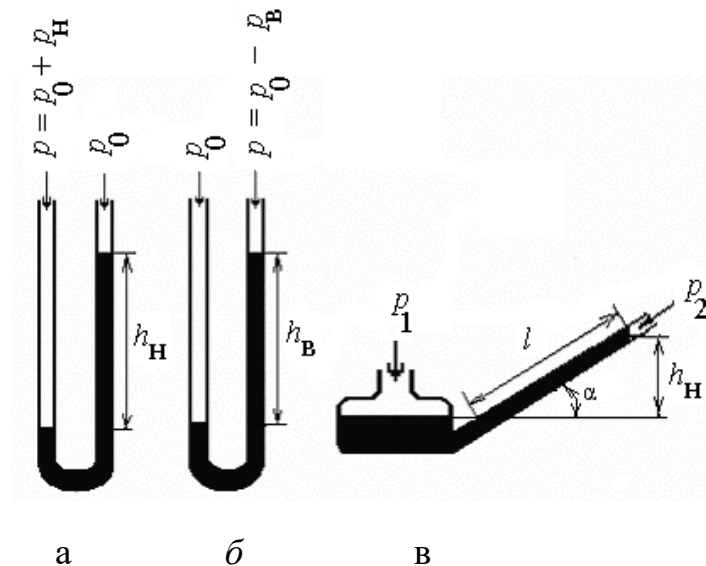


Рисунок 1.1.2 – Рідинні прилади:
а – манометр; *б* – вакуумметр; *в* – мікроманометр

Тиск (надлишковий або вакуум) урівноважується стовпом рідини заввишки h . Відлік тиску (розрідження) проводиться за різницею рівнів рідини.

При застосуванні мікроманометрів із змінним кутом нахилу вимірювальної трубки різниця тиску, що вимірюються в Паскалях, визначається за формулою:

$$p_1 - p_0 = \ell \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot g, \text{ Па}, \quad (1.1.4)$$

де p_1 – вимірюваний тиск, Па; p_0 – протитиск (звичайний атмосферний тиск), Па; ℓ – похила різниця рівнів рідини в трубці й резервуарі, м; α – кут нахилу трубки; ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Прилади для вимірювання високого тиску. Для вимірювання високого тиску застосовують поршневі, трубчасті (пружинні), мембранні та інші манометри.

Конструкції і макетні схеми цих приладів подані на стенді в лабораторії.

Поршневі манометри використовуються як зразкові прилади для вимірювання високого тиску. Точність вимірювання тиску в цих приладах може бути доведена до 0,01 %. Часто їх застосовують для тарування трубчастих манометрів.

У практиці вимірювання тиску найширшого застосування набули трубчасті або пружинні манометри.

Робочою частиною манометра є зігнута сталева або латунна трубка. Кінець трубки через передавальний механізм з'єднаний із стрілкою, яка повертається навкруги своєї осі при підвищенні тиску.

Точність трубчастого манометра обмежена наявністю залишкових деформацій трубки, які з'являються під час роботи манометра.

Кращі, так звані зразкові, манометри цього типу, мають клас точності 0,2 або 0,35 (тобто максимальна похибка при вимірюванні тиску складає відповідно 0,2 або 0,35 номінального значення шкали приладу).

Шкали трубчастих манометрів можуть бути іменованими і градусними. На іменованій шкалі безпосередньо вказується тиск у відповідних одиницях. Зразкові ж манометри мають шкалу, яка вказує кут повороту стрілки в градусах (позначках).

При виборі манометра необхідно мати на увазі, що максимальний тиск, який вимірюється, не повинен перевищувати $2/3$ шкали при спокійному навантаженні й $1/2$ шкали при навантаженні, що коливається, а мінімальний тиск, який вимірюється в обох випадках, не повинен бути меншим $1/3$ шкали.

Прилади повинні встановлюватися подалі від джерел тепла при температурі навколишнього середовища від $+10$ до $+60$ °C.

При вимірюванні тиску агресивних середовищ манометри повинні підключатися через розділювальну систему (сифонова трубка, мембрана і т.д.), заповнену водою або якою-небудь іншою нейтральною рідиною.

Окрім манометрів, випускаються також трубчасті вакуумметри, які служать для вимірювання розрідження, і мановакуумметри.

Спеціальні манометри. Крім поршневих і трубчастих манометрів, існують також інші типи, які вживаються в спеціальних випадках.

Для вимірювання різниці тиску або, як кажуть, перепаду тиску, застосовують диференціальні манометри.

Вимірювання дуже високого тиску (понад 200 МПа) здійснюють манганіновими манометрами, де використовується ефект зміни електричного опору манганінового дроту від тиску.

Для вимірювання тиску, що швидко змінюється, можуть бути використані п'єзокварцові або тензометричні манометри.

Існують також спеціальні манометри-піметри, які використовують для безпосереднього визначення середнього тиску в циклічно працюючих машинах (поршневих двигунах і компресорах).

1.2 Практична частина

Завдання для самостійної роботи здобувачів вищої освіти під керівництвом викладача (індивідуальне завдання № 1):

Відповідно до варіанту вихідних показів приладів для вимірювання тиску і температури компресорної установки (табл. 1.2.1) здійснити розрахунки термодинамічних параметрів. Результати занести до табл. 1.3.1, 1.3.2.

Зміст повинен включати: титульний аркуш, назву та мету роботи, завдання, розрахунки, висновки.

Таблиця 1.2.1 – Вихідні дані до індивідуального завдання № 1

№ з/п	Найменування вимірюваних величин									
	Атмос- ферний тиск	Розрід- ження	Надлишковий тиск в проміжному повітроохо- лоджувачі	Надлиш- ковий тиск стислого повітря	Різниця рівнів води в колінах диф- манометра	Температура повітря, яке всмоктується	Температура повітря після першого ступеня компресора	Температура повітря після ПВО	Температура повітря після другого ступеня компресора	Температура повітря перед вимірюваль- ною діафрагмою
	Позначення									
	p_0 , мм рт.ст	p_v , мм вод.ст.	p_x , ат	p_k , ат	h_d , мм вод.ст.	t_0 , °C	$t_{1к}$, °C	t_x , °C	$t_{2к}$, °C	t_d , °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	750	240	1,8	4,1	171	14	68	54	64	18
2	745	200	1,9	4,6	160	17	70	56	68	19
3	730	210	2,0	4,8	140	18	75	59	70	20
4	735	220	2,1	4,9	150	19	78	61	72	21
5	740	160	2,2	5,0	145	20	80	65	77	22
6	725	170	1,7	4,7	175	15	75	60	74	19
7	755	205	2,3	5,1	163	26	81	67	76	18
8	760	260	2,1	4,4	158	12	64	58	65	17
9	750	280	2,0	4,3	155	13	65	55	63	16
10	730	220	1,9	4,9	148	15	72	64	75	20
11	735	235	1,8	5,0	173	17	73	66	78	21
12	740	185	1,7	5,2	185	21	90	67	79	24
13	775	175	1,9	5,3	190	22	92	67	80	25
14	725	170	2,1	5,1	165	20	89	63	77	23
15	730	180	2,3	4,9	186	17	78	60	73	20
16	755	215	2,4	4,8	174	18	79	61	72	21

Закінчення табл. 1.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	760	205	2,3	4,7	163	15	72	59	71	19
18	765	235	2,0	5,0	148	13	67	56	67	16
19	745	195	2,1	5,1	153	17	76	61	73	21
20	740	190	2,2	5,4	139	21	93	68	81	25
21	730	185	1,9	5,3	176	18	81	66	80	22
22	742	204	1,8	4,1	154	12	67	57	75	16
23	754	207	1,6	3,9	171	11	65	55	73	17
24	732	183	1,9	4,4	181	14	70	61	71	14
25	742	163	2,0	4,5	159	15	71	62	70	15
26	756	167	2,2	4,5	163	13	69	60	68	20
27	748	171	2,3	4,8	161	18	73	64	71	19
28	739	174	1,8	4,0	149	17	65	58	66	16
29	741	176	2,1	4,2	155	20	67	59	68	18
30	746	208	1,7	4,1	165	19	72	63	78	20

1.3 Опис компресорної установки з приладами для вимірювання тиску і температури компресорної установки

З метою ознайомлення з приладами для вимірювання тиску і температури розглянемо компресорну установку, схема якої показана на рис. 1.3.1. Ця схема відображає місця розташування вимірювальних приладів.

Установка складається з двоступеневого компресора **1** з диференціальним поршнем, який приводиться в рух від електродвигуна **2** через ремінну передачу **3**. Повітря з атмосфери через всмоктувальний трубопровід **4** і фільтр **5** потрапляє в перший ступінь компресора і стискується до тиску p_x , після чого надходять у проміжний повітроохолоджувач **6**, де стисле повітря, протікаючи в міжтрубному просторі, охолоджується до необхідної температури t_x . Охолоджене повітря після повітроохолоджувача надходить у другий ступінь компресора, де стискується до кінцевого тиску p_2 , і по нагнітальному трубопроводу **7** надходить у повітрозбірник **8**. З повітрозбірника повітря у необхідній кількості подається до споживача. Для регулювання подачі (витрати) на нагнітальному трубопроводі **10** встановлена засувка **9**. Вимірювання витрати повітря здійснюється за допомогою вимірювального приладу **20**, врізаного в нагнітальний трубопровід перед регулюючою засувкою **9**. Схема приладу, призначеного для вимірювання витрати стислого повітря, показана на рис. 1.3.2. Такий прилад називається дросельним, оскільки при вимірюванні витрати газу або рідини використовується термодинамічний процес “дроселювання”, що супроводжується втратою тиску при проходженні потоку через місцевий опір.

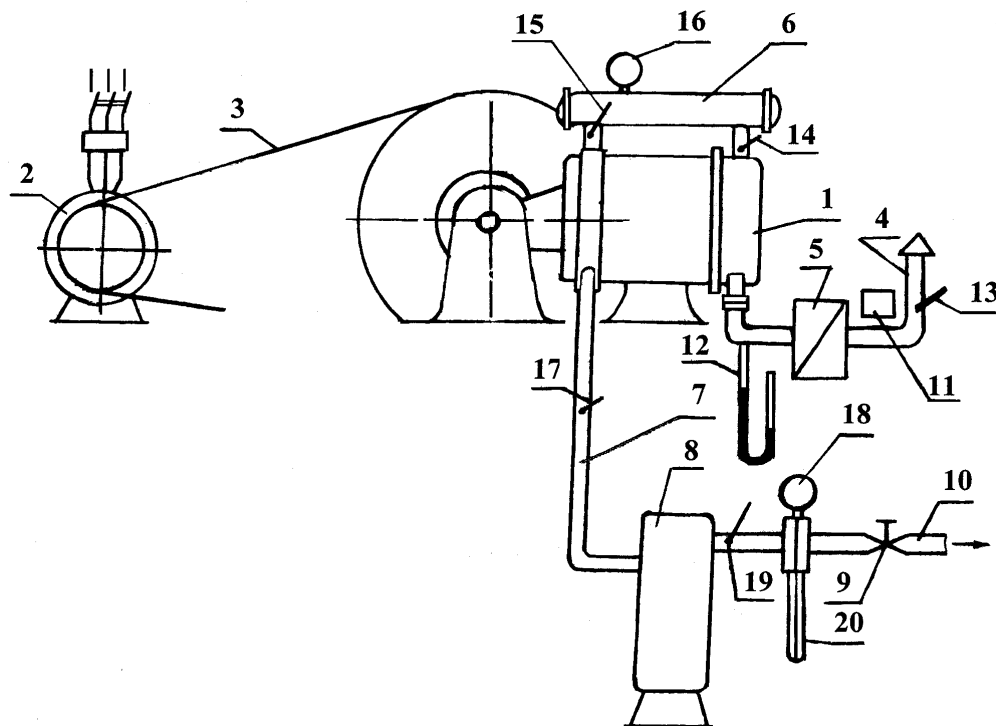


Рисунок 1.3.1 – Схема компресорної установки

Прилад складається з двох фланців **1**, між якими встановлюється діафрагма **2** (місцевий опір), діаметр якої d , менший від діаметра трубопроводу **5**. Відбір тиску перед діафрагмою і після неї відбувається за допомогою каналів **3**. Для вимірювання перепаду тиску h_d перед і після діафрагми ліве і праве коліна дифманометра **4** під'єднуються до каналів **3**. На дифманометрі передбачений штуцер для установки манометра **18**, що вимірює тиск стислого повітря перед діафрагмою.

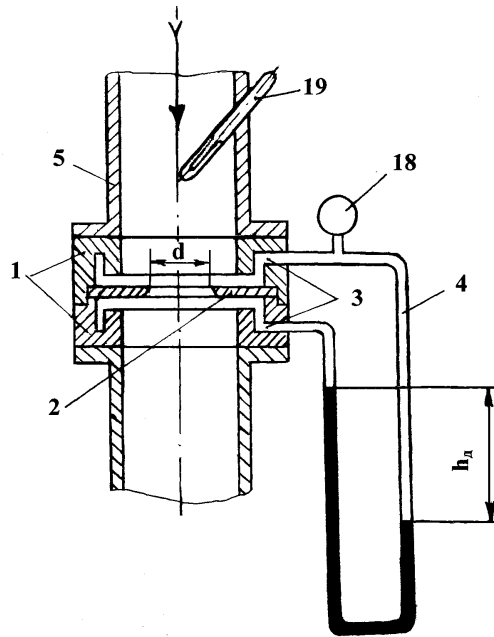


Рисунок 1.3.2 – Схема приладу для вимірювання витрати стислого повітря

Розташування вимірювальних приладів на установці (рис. 1.3.1, 1.3.2): **11** – барометр, що вимірює тиск навколишнього середовища; **12** – вакуумметр, який встановлюється на всмоктувальному трубопроводі за фільтром; **13** – термометр, що вимірює температуру засмоктуваного повітря, встановлюється на всмоктувальному трубопроводі; **14** – термометр для вимірювання температури повітря після першого ступеня стиснення; **15** – термометр, що вимірює температуру повітря після повітроохолоджувача; **16** – манометр для вимірювання тиску повітря після проміжного повітроохолоджувача; **17** – термометр для вимірювання температури повітря після другого ступеня стиснення; **18** – манометр, що вимірює кінцевий тиск стислого повітря; **19** – термометр, що вимірює температуру стислого повітря перед діафрагмою T_d , значення якої використовується у формулі (1.3.1) для обчислення витрати стислого повітря. Зняття показань з приладів відбувається після того, як встановиться стабільний режим роботи компресорної установки.

При оформленні практичної роботи кожний здобувач повинен перерахувати вихідні покази барометра, вакуумметра і манометрів в інші одиниці вимірювання, подані в табл. 1.2.1, обчислити абсолютний тиск за формулою 1.1.2 і результати розрахунків занести в табл. 1.3.1.

Таблиця 1.3.1 – Показання приладів для вимірювання тисків та температури

п/п	Найменування величини	Позначення	Одиниці тиску				
			мм вод.ст.	мм рт.ст	Па	бар	ат
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Атмосферний тиск	p_0					
2.	Розрідження	p_v					
3.	Надлишковий тиск у проміжному повітроохолоджувачі	p_x					
4.	Різниця рівнів води в колінах дифманометра	h_d					
5.	Абсолютний тиск після фільтра	p					
6.	Абсолютний тиск у проміжному повітроохолоджувачі	p_1					
7.	Абсолютний тиск стислого повітря	p_2					

Використовуючи значення параметрів повітря і покази дросельного приладу, необхідно розрахувати витрату повітря (подачу компресора) за формулою:

$$V = 58,94 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{p_2 \cdot h_d}{T_d}} \cdot T_0, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.3.1)$$

де $d = 0,04$ м – діаметр отвору діафрагми у лабораторній установці; p_2 – абсолютний тиск стислого повітря перед діафрагмою, Па; T_d – абсолютна температура стислого повітря перед діафрагмою, К; p_0 – тиск атмосферного повітря, Па; T_0 – абсолютна температура атмосферного повітря, всмоктуваного в компресор, К; h_d – різниця рівнів води в колінах дифманометра, мм.

Температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул: її чисельна величина однозначно пов'язана з величиною середньої кінетичної енергії молекул речовини.

Для ідеального газу ця залежність відома у вигляді:

$$T = \frac{2}{3K} \cdot \frac{m \cdot \bar{W}^2}{2}, \quad (1.3.2)$$

де T – абсолютна температура, К; $\frac{m \cdot \bar{W}^2}{2}$ – середня кінетична енергія поступального руху молекул.

Практично зміряти кінетичну енергію безпосередньо неможливо, і прилад, конструкція якого логічно випливає із визначення температури, насправді створити не можна. Тому для вимірювання температури використовують різні непрямі методи.

У ролі вимірників температури застосовують прилади, дія яких ґрунтується на зміні яких-небудь термометричних властивостей рідин, газів або твердих тіл. До таких вимірників відносяться термометри розширення, манометрові термометри, термометри опору, термоелектричні прилади і пірометри випромінювання. При вимірюванні абсолютної температури використовується термодинамічна температурна шкала, в якій температура потрійної точки води дорівнює 273,16 К. Одиницею температури у цій шкалі є 1 кельвін (К).

Окрім термодинамічної температурної шкали, існує Міжнародна практична шкала температур (МШТ–68). Температура у цьому випадку вимірюється в градусах Цельсія (°С). Температура потрійної точки води відповідає 0,01°С. Термодинамічна абсолютна температура позначається T , а температура в градусах Міжнародної практичної шкали температур (Цельсія) – t . Співвідношення між T і t визначається за величиною температури потрійної точки:

$$T \text{ К} - t \text{ °С} = 273,16 - 0,01 = 273,15 \text{ К},$$

звідки $T \text{ К} = t \text{ °С} + 273,15$ або з достатньою для теплотехнічних розрахунків точністю:

$$T = t + 273. \quad (1.3.3)$$

Пристрої, які служать для вимірювання температури шляхом перетворення її в покази або в сигнали, що є відомою функцією температури, прийнято називати термометрами. Коротка характеристика найпоширеніших термометрів наведена в табл. 1.3.2.

Основні типи вимірників температури подані на стенді в лабораторії теплотехніки.

Дія термометрів розширення ґрунтується на відмінності коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини й оболонки, в якій ця речовина знаходиться. Рідинний термометр складається з скляного балона, капілярної трубки і шкали. Термометрична речовина заповнює балон і частково капілярну трубку. Вільний простір у капілярній трубці заповнюється інертним газом. Відлік проводиться за висотою рівня рідини в капілярі. Як термометричну речовину застосовують ртуть (від – 30 до +550°С), спирт та ін.

Перевага рідинних термометрів: простота, достатньо висока точність. Недоліки: інерційність, неможливість автоматичного запису показів і передачі на відстань, погана видимість шкали.

Таблиця 1.3.2 – Практичні межі застосування пристроїв для вимірювання температури

Термометрична властивість, що використовується	Найменування пристрою	Межа тривалого застосування, °C	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинний скляний термометр	–190	+600
Зміна тиску в замкнутому об'ємі	Манометровий термометр	–160	+600
Зміна електричного опору	Електричний термометр опору	–200	+600
	Напівпровідниковий термометр опору (термістор, терморезистор)	–90	+180
Термоелектричні ефекти (термо-ЕРС)	Термоелектричний термометр (термопара)	–50	+2500
	Оптичний пірометр	+700	+6000
	Радіаційний пірометр	+20	+3000
	Фотоелектричний пірометр	+600	+4000
	Колірний пірометр	+1400	+2800

Термопари набули значного поширення в лабораторній практиці та в промисловості.

Термопара (рис. 1.3.2) складається з двох різномірних провідників (термоелектродів), які складають спільний електричний ланцюг. Якщо температури спаїв не однакові, виникає термо-ЕРС, що є тим більшою, чим більша різниця температур. Результуюча термо-ЕРС у ланцюзі дорівнює різниці термо-ЕРС спаїв, тобто:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0),$$

де $E_{AB}(t, t_0)$ – результуюча термо-ЕРС; $E_{AB}(t)$ і $E_{AB}(t_0)$ – термо-ЕРС відповідно гарячого і холодного спаїв.

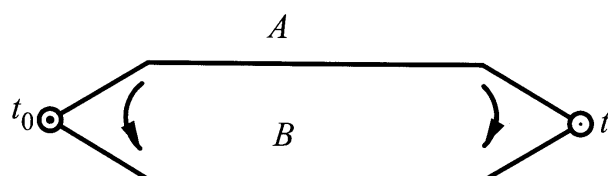


Рисунок 1.3.2 – Термоелектричний ланцюг

Якщо підтримувати температуру холодного спаю постійною, то $E_{AB}(t_0) = \text{const} = C$. Тоді $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - C$.

Таким чином, якщо зміряти термо-ЕРС у ланцюзі, то можна судити про різницю температур $t - t_0$ або, якщо одна з температур, наприклад t_0 , відома, то можна судити про температуру t .

Для вимірювання термо-ЕРС у ланцюг термопари вмикається мілівольтметр (рис. 1.3.4).

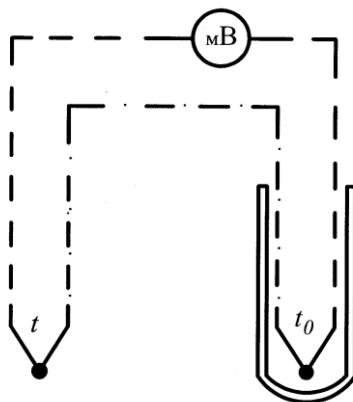


Рисунок 1.3.4 – Схема вмикання термопари:

— — — хромель; — · — · — алюмель

Основне правило роботи з термопарами формулюється таким чином: якщо в ланцюг термопари ввімкнено який-небудь третій провідник, кінці якого мають однакову температуру, це не впливає на величину створюваної термо-ЕРС. Останнє дає можливість вмикати в ланцюг термопар прилад, який вимірює термо-ЕРС.

Залежність термо-ЕРС від температури виражається у вигляді графіка $E_{AB} = f(t)$ або дається в таблицях.

На практиці термо-ЕРС термопари вимірюється прямим методом за допомогою мілівольтметра або компенсаційним методом (порівняння) за допомогою потенціометра.

Матеріалом для термопар є дріт діаметром 0,1 – 3,2 мм.

На практиці набули застосування такі термопари:

Платинородій-платинова термопара. Матеріал одного з електродів для термопари є сплавом платини (90 %) і родію (10 %), а другого – чистою платиною. Така термопара використовується для вимірювання температури в інтервалі від 0 °С до 1300 °С, а короткочасно – до 1600 °С.

Платинородієва термопара. Матеріал одного електрода цієї термопари – платинородій (сплав із вмістом 30 % родію), а матеріал другого електрода – платинородій із вмістом 6 % родію. Такі термопари застосовуються для вимірювання температур від 300 °С до 1600 °С (короткочасно – до 1800 °С).

Вольфрамренієва термопара. Електроди цієї термопари виготовлені із сплаву вольфраму і ренію. В одному електроді вміст ренію дорівнює 5 %, в іншому – 20 %. Ця термопара дозволяє вимірювати температури – від 0 °С до 2200 °С, а короткочасно – до 2500 °С.

Хромель-алюмелева термопара. Один електрод цієї термопари виготовлений з немагнітного сплаву – хромелю (89 % Ni + 9,8 % Cr + 1 % Fe +

0,2 % Mn); а другий – з магнітного сплаву – алюмелю (94% Ni + 2% Al + 2,5% Mn + 1% Si + 0,5 % домішок). Ця термопара може бути використана для вимірювання температур в інтервалі від – 200 °С до 1000 °С, а короткочасно – до 1300 °С.

Хромель-копелева термопара. Один з електродів цієї термопари виготовлений з хромелю, а інший – з копелю (56 % Cu + 44 % Ni). Термопара застосовується для вимірювання температур від – 50 °С до 600 °С, короткочасно – до 800 °С.

Мідь-копелева термопара. Призначена для роботи в інтервалі температур від – 200°С до +100°С.

Мідь-мідно-нікелева термопара. Призначена для роботи в інтервалі температур від – 200 °С до +400 °С.

Залізомідно-нікелева термопара. Призначена для роботи в інтервалі температур від – 200 °С до 700 °С, а короткочасно – до 900 °С.

Нікель-хроммідно-нікелева термопара. Призначена для роботи в інтервалі температур від – 100 °С до 700 °С, а короткочасно – до 900 °С.

При вимірюванні температур один спай ланцюга термопари, так званий холодний спай, перебуває при 0 °С, а інший – гарячий – в середовищі, температуру якого треба виміряти. Якщо з будь-яких причин не вдається помістити холодний спай у середовище з температурою 0 °С, він тоді може перебувати при кімнатній температурі (наприклад 20 °С), і в цьому випадку треба ввести поправку на температуру з урахуванням даних таблиць стандартного градування.

Вимірювання температури за електричним опором тіл (звичайно металевих) ґрунтується на залежності їх опору від температури. Чисті метали при нагріванні на 1°С збільшують свій опір на 0,4...0,6 %, а напівпровідники (оксиди металів) зменшують на 1,6...3,6 %.

У промислових умовах опір термометрів вимірюється неврівноваженими мостами й автоматичними урівноваженими мостами.

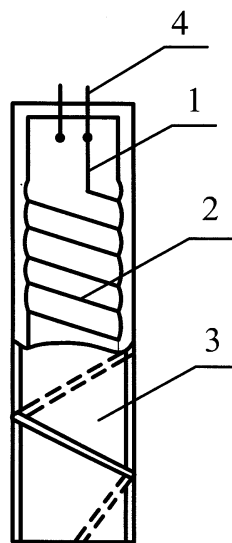


Рисунок 1.3.5 – Термометр опору

Технічні термометри опору виготовляють найчастіше з платиного або з мідного дроту. Платиновий термометр (рис. 1.3.5) складається із слюдяної пластини 1, на яку намотується платиновий дріт 2 діаметром 0,07 – 0,1 мм. Зовні розташовуються слюдяні пластини-ізолятори 3, що скріплюються між собою срібною стрічкою. Термометр підключається до приладу через срібні виводи 4 і розміщується у кожусі з алюмінієвої трубки і в захисному чохлі.

Позитивною властивістю термометрів опору є достатньо висока точність вимірювання.

При встановленні термометрів опору слід дотримуватися таких правил:

1. Термометр повинен так занурюватися у вимірюване середовище, щоб його середина знаходилася в центрі потоку.

2. Опір з'єднаних дротів повинен бути не вищим 5 Ом.

3 іншими типами вимірників температури можна ознайомитися, користуючись спеціальною літературою.

Вимірювання температури при роботі компресорної установки в місцях, відзначених на рис. 1.3.1, здійснюється за допомогою рідинних термометрів у градусах Цельсія. Заглиблення (гільзи), куди вставляються термопари, заповнені машинним маслом, щоб точніше вимірювати температуру.

Таблиця 1.3.2 – Показання прикладів вимірювання температури

№ з/п	Вимірювана температура	Позначення	Одиниці вимірювання	
			°C	К
1	2	3	4	5
1.	Температура всмоктуваного повітря	$t_0 (T_0)$		
2.	Температура повітря після першого ступеня компресора	$t_{1к} (T_{1к})$		
3.	Температура повітря після ППО	$t_x (T_x)$		
4.	Температура повітря після другого ступеня компресора	$t_{2к} (T_{2к})$		
5.	Температура повітря перед вимірювальною діафрагмою	$t_d (T_d)$		

Контрольні запитання

1. Який тиск прийнято називати абсолютним?
2. Чи може бути надлишковий тиск параметром стану?
3. Що вимірюють вакуумметром?
4. Назвіть одиниці вимірювання тиску?
5. Яка будова і який принцип роботи пружинного манометра?
6. Що таке температура?
7. Назвіть одиниці вимірювання температури.
8. Які принципи покладені в основу вимірювання температур?
9. Назвіть прилади, які вимірюють температуру.
10. Назвіть прилади для вимірювання низького тиску.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

ВИВЧЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЗА РІВНЯННЯМ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ. ВИВЧЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЗА РІВНЯННЯМ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ ТА СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Мета роботи: навчитися застосовувати рівняння стану ідеального газу для визначення основних термодинамічних параметрів ідеального газу; навчитися задавати суміші ідеальних газів та визначати їх параметри.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання**: знати основні поняття термодинаміки, основні термодинамічні параметри стану газів, розуміти взаємозв'язок між ними, знати рівняння стану ідеального газу; знати методику описування властивостей суміші ідеальних газів та розуміти сутність величин, що її характеризують.

2.1 Теоретична частина

Основні термодинамічні параметри стану будь-якої термодинамічної системи залежать один від одного. Для рівноважного стану ідеального газу ця взаємозалежність описується термічним рівнянням стану ідеального газу:

$$pV = mRT,$$

де p — абсолютний тиск газу, Па; T — абсолютна температура газу, К; m — маса газу, кг; V — об'єм газу, м³; R — газова стала, Дж/(кг·К).

Наведене рівняння справедливе для довільної кількості газу. Якщо обидві його частини розділити на масу газу m , то рівняння набуває вигляду:

$$pv = RT,$$

де v — питомий об'єм газу, м³/кг.

За рівнянням стану можна визначити будь-який параметр стану ідеального газу, якщо відомі два інші параметри, можна знайти масу або об'єм газу в цих умовах, встановити покази вимірювальних приладів.

Для правильного вирішення задач треба пам'ятати, що в рівняння входять абсолютні тиск і температура, а також про те, що всі величини в рівнянні повинні бути вираженими в системних одиницях виміру.

Газовою сумішшю називають механічну суміш окремих газів, які не вступають між собою ні в які хімічні реакції. Такою сумішшю є, зокрема, атмосферне повітря, яке складається з кисню, азоту, вуглекислого газу, водяної пари, інертних газів.

Метою розрахунку газової суміші відомого складу є, зазвичай, встановлення газової сталої суміші $R_{см}$, її уявної молекулярної маси $\mu_{см}$ та парціального тиску компонентів суміші p_i .

Суміш газів характеризують масовим або об'ємним складом.

Масовий склад суміші визначається масовими частками компонентів.

Масовою часткою компонента називається відношення маси окремого компонента m_i до загальної маси суміші $m_{\text{см}}$:

$$g_i = m_i / m_{\text{см}}.$$

При цьому

$$\sum g_i = 1.$$

Об'ємний склад суміші визначається об'ємними частками компонентів.

Об'ємна частка компонента – це відношення парціального (зведеного) об'єму компонента V_i до загального об'єму суміші $V_{\text{см}}$:

$$r_i = V_i / V_{\text{см}} \quad \text{і} \quad \sum r_i = 1.$$

Якщо відомий масовий склад суміші, то її газова стала

$$R_{\text{см}} = \sum_1^n (g_i R_i),$$

де R_i – газова стала компонента суміші.

Якщо суміш задана об'ємними частками, то

$$R_{\text{см}} = 1 / \sum_1^n \frac{r_i}{R_i}.$$

Уявна молекулярна маса суміші відомого масового складу

$$\mu_{\text{см}} = 1 / \sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}.$$

де μ_i – молекулярна маса компонента суміші.

Для суміші, що задана об'ємними частками,

$$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n (r_i \mu_i).$$

Масові та об'ємні частки компонентів суміші пов'язані між собою співвідношеннями:

$$g_i = r_i \frac{R_{\text{см}}}{R_i} = r_i \frac{\mu_i}{\mu_{\text{см}}}$$

$$r_i = g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} = g_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i}$$

Парціальний тиск компонента газової суміші можна визначити:

– через масові частки

$$p_i = p_{\text{см}} g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} = p_{\text{см}} g_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i},$$

де $p_{\text{см}}$ — повний тиск суміші;

– через об'ємні частки

$$p_i = p_{\text{см}} r_i.$$

2.2 Практична частина

Індивідуальне завдання № 2:

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачі № 1, № 2.

Звіт повинен включати: титульний аркуш, умови задач, розрахунки.

Умови задачі № 1 відповідно до варіанту.

Задача 1.1. У балоні ємністю V , л знаходиться m , кг газу при температурі t_1 , °С. Визначити початковий тиск газу в балоні та показ манометра, підключеного до балону. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до задачі 1.1

Варіант	V , л	m , кг	газ	t_1 , °С	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	50	3	повітря	57	750
2	70	5	азот	67	756
3	30	8	кисень	77	760
4	40	11	метан	80	770
5	100	9	гелій	60	745
6	150	13	оксид вуглецю	50	740
7	200	18	діоксид вуглецю	75	748
8	180	10	повітря	93	753
9	160	16	кисень	86	747
10	90	20	метан	66	754

Задача 1.2. У балоні ємністю V , л знаходиться m , кг газу. Манометр, підключений до балону, показує тиск p_1 , МПа. Визначити початкову температуру газу. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до задачі 1.2

Варіант	газ	V , л	m , кг	$p_{1 \text{ ндл}}$, МПа	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	10	0,61	5,0	750
2	азот	20	1,27	6,0	756
3	кисень	30	2,25	7,7	760
4	метан	40	2,82	8,0	770
5	аргон	50	3,55	6,0	745
6	оксид вуглецю	60	4,12	5,0	740
7	діоксид вуглецю	100	8,27	7,5	748
8	повітря	200	28,0	9,3	753
9	кисень	160	20,2	8,6	747
10	метан	90	9,25	6,6	754

Задача 1.3. m кг газу при надлишковому тиску $p_{1 \text{ ндл}}$ бар має температуру t_1 , °С. Визначити відсутні основні параметри стану газу. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до задачі 1.3

Варіант	газ	m , кг	$p_{1 \text{ ндл}}$, бар	t_1 , °С	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	3	5,0	27	750
2	азот	5	6,0	30	756
3	кисень	8	7,7	32	760
4	метан	11	8,0	40	770
5	гелій	9	6,0	20	745
6	оксид вуглецю	13	5,0	15	740
7	діоксид вуглецю	18	7,5	25	748
8	повітря	10	9,3	47	753
9	кисень	16	8,6	37	747
10	метан	20	6,6	26	754

Задача 1.4. 1 кг газу має температуру t_1 , °С при надлишковому тиску $p_{1 \text{ ндл}}$, кПа. Визначити основні параметри стану газу. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до задачі 1.4

Варіант	газ	$p_{1\text{ ндл}}$, кПа	t_1 , °C	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	500	90	750
2	азот	600	100	756
3	кисень	770	120	760
4	метан	800	140	770
5	аргон	600	75	745
6	оксид вуглецю	500	68	740
7	діоксид вуглецю	750	77	748
8	повітря	930	110	753
9	кисень	860	100	747
10	метан	6,6	70	754

Задача 1.5. Який об'єм буде займати m кг газу при надлишковому тиску $p_{1\text{ ндл}}$, кПа і температурі t_1 , °C. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 1.5 – Вихідні дані до задачі 1.5

Варіант	газ	m , кг	$p_{1\text{ ндл}}$, бар	t_1 , °C	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	3	150	27	750
2	азот	5	200	30	756
3	кисень	8	170	32	760
4	метан	11	300	40	770
5	гелій	9	250	20	745
6	оксид вуглецю	13	400	15	740
7	діоксид вуглецю	18	380	25	748
8	повітря	10	190	47	753
9	кисень	16	120	37	747
10	метан	20	230	26	754

Умови задачі № 2 відповідно до варіанту:

Задача 2.1. Визначити об'ємну частку та парціальний тиск метану в атмосфері гірничої виробки, якщо масова частка його в суміші з повітрям складає g , а загальний тиск суміші становить $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до задачі 2.1

Варіант	g	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	0,015	750
2	0,025	756
3	0,035	760
4	0,045	770
5	0,028	745
6	0,018	740
7	0,038	748
8	0,032	753
9	0,043	747
10	0,036	754

Задача 2.2. За показом газоаналізатора об'ємна частка метану в атмосфері гірничої виробки становить r . Визначити масову частку метану в суміші з повітрям і його парціальний тиск, якщо загальний тиск суміші становить $p_{\text{атм}}$ мм рт. ст.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані до задачі 2.2

Варіант	r	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	0,025	750
2	0,018	756
3	0,034	760
4	0,045	770
5	0,050	745
6	0,018	740
7	0,038	748
8	0,032	753
9	0,043	747
10	0,036	754

Задача 2.3. Газова суміш такого масового складу: азот – g_{N_2} ; кисень – g_{O_2} ; метан – g_{CH_4} заповнює балон ємністю V , л. Надлишковий тиск газу p_1 , кПа, його температура t_1 , °С. Визначити масу газу в балоні, якщо атмосферний тиск становить $p_{атм}$, мм рт.ст.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані до задачі 2.3

Варіант	g_{N_2}	g_{O_2}	g_{CH_4}	V , л	p_1 , кПа	t_1 , °С	$p_{атм}$, мм рт.ст
1	0,75	0,23	0,02	10	300	27	750
2	0,68	0,25	0,07	20	350	30	756
3	0,63	0,28	0,09	30	400	32	760
4	0,65	0,21	0,14	40	500	40	770
5	0,61	0,19	0,20	50	350	20	745
6	0,58	0,15	0,27	60	250	15	740
7	0,55	0,34	0,11	100	300	25	748
8	0,67	0,19	0,14	200	500	47	753
9	0,52	0,33	0,15	160	360	37	747
10	0,45	0,43	0,12	90	250	26	754

Задача 2.4. Газова суміш такого об'ємного складу: азот – r_{N_2} ; кисень – r_{O_2} ; метан – r_{CH_4} заповнює балон ємністю V , л. Надлишковий тиск газу p_1 , кПа, його температура t_1 , °С. Визначити масу газу в балоні, якщо атмосферний тиск становить $p_{атм}$, мм рт.ст.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані до задачі 2.4

Варіант	r_{N_2}	r_{O_2}	r_{CH_4}	V , л	p_1 , кПа	t_1 , °С	$p_{атм}$, мм рт.ст
1	0,75	0,23	0,02	10	300	27	750
2	0,68	0,25	0,07	20	350	30	756
3	0,63	0,28	0,09	30	400	32	760
4	0,65	0,21	0,14	40	500	40	770
5	0,61	0,19	0,20	50	350	20	745
6	0,58	0,15	0,27	60	250	15	740
7	0,55	0,34	0,11	100	300	25	748
8	0,67	0,19	0,14	200	500	47	753
9	0,52	0,33	0,15	160	360	37	747
10	0,45	0,43	0,12	90	250	26	754

2.3. Приклади розв'язування типових задач

2.3.1 Газова стала R , що входить до рівняння стану, може бути прийнятою з довідника або розрахованою через універсальну газову сталу μR у такому порядку.

Визначити газову сталу метану.

Розв'язання

1. Встановлення молекулярної маси газу.

Молекулярну масу газу приймають із довідника або розраховують, виходячи з його хімічної формули – молекулярна маса дорівнює сумі атомних мас елементів, що входять до складу речовини.

Хімічна формула метану CH_4 .

Молекулярна маса метану

$$\mu_{\text{CH}_4} = \mu_{\text{C}} + 4\mu_{\text{H}},$$

де $\mu_{\text{C}} = 12$ кг/кмоль – атомна маса вуглецю С; $\mu_{\text{H}} = 1$ кг/кмоль – атомна маса водню Н.

$$\mu_{\text{CH}_4} = 12 + 4 \cdot 1 = 16 \text{ кг/кмоль.}$$

2. Газова стала метану

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{CH}_4}},$$

де $\mu R = 8314$ Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала ідеального газу.

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{8314}{16} = 520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

2.3.2 У балоні ємністю $V = 20$ літрів знаходиться 10 кг метану, температура газу $t = 27^\circ \text{C}$. Який тиск буде показувати прилад, підключений до балону, якщо атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 100$ кПа?

Розв'язання

1. Відомі параметри стану газу:

абсолютна температура $T = 273 + t = 273 + 27 = 300 \text{ К}$;

об'єм газу $V = 20$ літрів $= 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

газова стала метану $R_{\text{CH}_4} = 520 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

2. Знаходимо абсолютний тиск газу в балоні p .

За рівнянням стану ідеального газу

$$pV = mR_{\text{CH}_4}T,$$

Звідси

$$p = \frac{mR_{\text{CH}_4}T}{V} = \frac{10 \cdot 520 \cdot 300}{20 \cdot 10^{-3}} = 7,8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 7800 \text{ кПа}.$$

Абсолютний тиск газу в балоні $p > p_{\text{атм}}$, отже в балоні надлишковий тиск. Для його вимірювання до балону треба підключити манометр.

Показ манометра

$$p_{\text{м}} = p_{\text{ндл}} = p - p_{\text{атм}} = 7800 - 100 = 7700 \text{ кПа} = 7,7 \text{ МПа}.$$

У деяких технічних розрахунках атмосферне повітря розглядають як суміш кисню O_2 та азоту N_2 , приймаючи такі масові частки компонентів: $g_{\text{O}_2} = 0,23$; $g_{\text{N}_2} = 0,77$.

2.3.3 Визначити газову сталу такого повітря та його уявну молекулярну масу, встановити об'ємний склад повітря. Якими будуть парціальні тиски компонентів суміші, якщо атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 100 \text{ кПа}$?

Розв'язання

1. Молекулярні маси компонентів повітря:

кисню $\mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$; азоту $\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг/кмоль}$.

2. Газові сталі компонентів:

$$R_{\text{O}_2} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{O}_2}} = \frac{8314}{32} = 260 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$R_{\text{N}_2} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{N}_2}} = \frac{8314}{28} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3. Газова стала повітря:

$$R_{\text{пов}} = \sum_1^n (g_i R_i) = g_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} = 0,23 \cdot 260 + 0,77 \cdot 297 = 288 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4. Уявна молекулярна маса повітря:

$$\mu_{\text{пов}} = 1 / \sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i} = \frac{1}{\frac{g_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} + \frac{g_{\text{N}_2}}{\mu_{\text{N}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,23}{32} + \frac{0,77}{28}} = 28,8 \text{ кг/кмоль.}$$

З іншого боку

$$\mu_{\text{пов}} = \frac{\mu R}{R_{\text{пов}}} = \frac{8314}{288} = 28,8 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

5. Об'ємний склад повітря:

– об'ємна частка кисню

$$r_{\text{O}_2} = g_{\text{O}_2} \frac{R_{\text{O}_2}}{R_{\text{пов}}} = 0,23 \frac{260}{288} = 0,21;$$

– об'ємна частка азоту

$$r_{\text{N}_2} = g_{\text{N}_2} \frac{R_{\text{N}_2}}{R_{\text{пов}}} = 0,77 \frac{297}{288} = 0,79.$$

6. Парціальний тиск компонентів:

– кисню $p_{\text{O}_2} = p_{\text{атм}} r_{\text{O}_2} = 100 \cdot 0,21 = 21 \text{ кПа};$

– азоту $p_{\text{N}_2} = p_{\text{атм}} r_{\text{N}_2} = 100 \cdot 0,79 = 79 \text{ кПа.}$

До уваги!

Азот і кисень – це головні компоненти атмосферного повітря. Крім них у повітрі є вуглекислий газ, водень, метан, інертні гази аргон, неон, гелій і деякі інші гази.

Уявна молекулярна маса осередненого складу атмосферного повітря

$$\mu_{\text{пов}} = 28,9645 \approx 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}},$$

його газова стала $R_{\text{пов}} = 287,055 \approx 287 \text{ Дж/(кг·К)}.$

Саме ці значення слід приймати в розрахунках у якості характеристик атмосферного повітря.

2.3.4 За показом газоаналізатора об'ємна частка метану в атмосфері гірничої виробки становить 0,015. Визначити масову частку метану в суміші з повітрям і його парціальний тиск, якщо загальний тиск суміші становить 745 мм рт. ст.

Розв'язання

1. Парціальний тиск метану в атмосфері гірничої виробки

$$p_{\text{CH}_4} = p_{\text{см}} r_{\text{CH}_4} = 745 \cdot 0,015 = 11,175 \text{ мм рт. ст.} = 1490 \text{ Па.}$$

2. Масова частка метану в суміші з повітрям

$$g_{\text{CH}_4} = r_{\text{CH}_4} \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{пов}}},$$

де $\mu_{\text{CH}_4} = 16$ кг/кмоль – молекулярна маса метану.

$$g_{\text{CH}_4} = 0,015 \cdot \frac{16}{29} = 0,0083.$$

Контрольні запитання

1. Чи можна вважати об'єм параметром стану ?
2. Чи можна в рівняння стану ідеального газу підставляти значення тиску, виміряне в атмосферах чи барах ?
3. Яким чином можна знайти значення універсальної газової сталої ?
4. Чим відрізняється універсальна газова стала від газової сталої ?
5. Чи можна використовувати рівняння стану ідеального газу до стану водяної пари ?
6. Назвіть кількісні одиниці виміру газу.
7. Що являє собою газова суміш?
8. Дайте формулювання закону Дальтона.
9. Визначте поняття парціального тиску.
10. Сформулюйте поняття масової, об'ємної і мольної часток, наведіть їхні позначення?
11. Що називається парціальним або приведеним об'ємом?
12. Чи придатне рівняння стану ідеального газу для газової суміші?
13. Наведіть приклад газової суміші, задайте її одним із засобів.
14. Яким чином визначають тиск газової суміші?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Мета роботи: набути навичок розрахунку зміни калоричних параметрів, теплоти, роботи, а також вміти аналізувати характер перебігу процесів за допомогою p - v і T - s діаграм.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати сутність понять теплота, робота, внутрішня енергія; знати перший закон термодинаміки, розуміти графічну інтерпретацію роботи та знати методи визначення тепла процесу; розуміти сутність теплоємності, знати параметри стану ентальпія та ентропія, вміти графічно відображати тепло процесу; знати основні термодинамічні процеси зміни стану ідеального газу.

3.1 Теоретична частина

При розрахунку газових термодинамічних процесів відомі, зазвичай, два параметра стану в одній із крайніх точок процесу – у початковій або кінцевій та один параметр стану в протилежній точці. Відомий також вид термодинамічного процесу, що відбувається при переході системи з початкового в кінцевий стан. Розрахунок виконують у такому порядку:

- за рівнянням стану ідеального газу підраховують третій невідомий параметр у крайній точці процесу, маючи значення двох параметрів у цьому стані;
- у протилежній точці процесу один із двох невідомих параметрів визначають за рівнянням термодинамічного процесу, що відбувається в системі, а другий невідомий параметр знаходять або за рівнянням термодинамічного процесу, або за рівнянням стану ідеального газу, записаного для цієї точки;
- підраховують зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії робочого тіла в заданому термодинамічному процесі;
- розраховують роботу розширення робочого тіла в заданому термодинамічному процесі та тепло процесу;
- будують графіки процесу в $p - v$ та $T - s$ координатах [6].

3.2. Практична частина

Індивідуальне завдання № 3:

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 3.

Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

Умови задачі № 3 відповідно до варіанту.

Задача 3.1. У балоні ємністю V , л знаходиться m кг газу при температурі $t_1, ^\circ\text{C}$. Визначити початковий тиск газу в балоні та показ манометра,

підключеного до балону, після зменшення температури газу до $t_2, ^\circ\text{C}$. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт.ст.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до задачі 3.1

Варіант	V , л	m , кг	газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	50	3	повітря	57	27	750
2	70	5	азот	67	30	756
3	30	8	кисень	77	32	760
4	40	11	метан	80	40	770
5	100	9	азот	60	20	745
6	150	13	оксид вуглецю	50	15	740
7	200	18	діоксид вуглецю	75	25	748
8	180	10	повітря	93	47	753
9	160	16	кисень	86	37	747
10	90	20	метан	66	26	754

Задача 3.2. У балоні ємністю V л знаходиться m кг газу. Манометр, підключений до балону, показує тиск p_1 , МПа. Визначити початкову температуру газу та показ манометра після охолодження газу до температури $t_2, ^\circ\text{C}$. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт.ст.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до задачі 3.2

Варіант	газ	V , л	m , кг	p_1 , МПа	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	10	0,61	5,0	27	750
2	азот	20	1,27	6,0	30	756
3	кисень	30	2,25	7,7	32	760
4	метан	40	2,82	8,0	40	770
5	азот	50	3,55	6,0	20	745
6	оксид вуглецю	60	4,12	5,0	15	740
7	діоксид вуглецю	100	8,27	7,5	25	748
8	повітря	200	28,0	9,3	47	753
9	кисень	160	20,2	8,6	37	747
10	метан	90	9,25	6,6	26	754

Задача 3.3. m кг газу при надлишковому тиску $p_{1\text{ндл}}$, бар і температурі t_1 , °С розширюється ізотермічно до тиску p_2 , кПа. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах; підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах. Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до задачі 3.3

Варіант	газ	m , кг	$p_{1\text{ндл}}$, бар	t_1 , °С	p_2 , кПа	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	3	5,0	27	300	750
2	азот	5	6,0	30	350	756
3	кисень	8	7,7	32	400	760
4	метан	11	8,0	40	500	770
5	азот	9	6,0	20	350	745
6	оксид вуглецю	13	5,0	15	250	740
7	діоксид вуглецю	18	7,5	25	300	748
8	повітря	10	9,3	47	500	753
9	кисень	16	8,6	37	360	747
10	метан	20	6,6	26	250	754

Задача 3.4. 1 кг газу при надлишковому тиску $p_{1\text{ндл}}$, бар і температурі t_1 , °С розширюється адіабатна до атмосферного тиску $p_{\text{атм}}$, мм рт. ст. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах; підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані до задачі 3.4

Варіант	газ	$p_{1\text{ндл}}$, бар	t_1 , °С	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	5,0	90	750
2	азот	6,0	100	756
3	кисень	7,7	120	760
4	метан	8,0	140	770
5	азот	6,0	75	745
6	оксид вуглецю	5,0	68	740
7	діоксид вуглецю	7,5	77	748
8	повітря	9,3	110	753
9	кисень	8,6	100	747
10	метан	6,6	70	754

Задача 3.5. m кг газу при надлишковому тиску $p_{1\text{ ндл}}$ МПа і температурі $t_1, ^\circ\text{C}$ розширюється політропна до атмосферного тиску $p_{\text{атм}}$ мм рт. ст. Показник політропи n . Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах; підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.5 – Вихідні дані до задачі 3.5

Варіант	газ	m , кг	$p_{1\text{ ндл}}$ МПа	$t_1, ^\circ\text{C}$	n	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	повітря	3	0,52	90	1,45	750
2	азот	5	0,64	100	1,39	756
3	кисень	8	0,77	120	1,32	760
4	метан	11	0,86	140	1,46	770
5	азот	9	0,64	75	1,52	745
6	оксид вуглецю	13	0,58	68	1,36	740
7	оксид вуглецю	18	0,75	77	1,29	748
8	повітря	10	0,93	110	1,53	753
9	кисень	16	0,86	100	1,61	747
10	метан	20	0,66	70	1,34	754

Задача 3.6. m , кг газу стискається адіабатна до тиску $p_{2\text{ ндл}}$ МПа від атмосферного тиску $p_{\text{атм}}$ мм рт. ст. Початкова температура газу $t_1, ^\circ\text{C}$. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах; підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.6 – Вихідні дані до задачі 3.6

Варіант	m , кг	газ	$p_{2\text{ ндл}}$ МПа	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	3	повітря	0,32	27	750
2	5	азот	0,35	30	756
3	8	кисень	0,44	32	760
4	11	метан	0,52	40	770
5	9	азот	0,35	20	745
6	13	оксид вуглецю	0,25	15	740
7	18	діоксид вуглецю	0,38	25	748
8	10	повітря	0,57	47	753
9	16	кисень	0,36	37	747
10	20	метан	0,28	26	754

Задача 3.7. 1 кг газу ізобарна охолоджується до температури $t_2, ^\circ\text{C}$ при атмосферному тиску $p_{\text{атм}}, \text{мм рт. ст.}$. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах, якщо об'єм газу в процесі зменшився в i разів. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.7 – Вихідні дані до задачі 3.7

Варіант	газ	i	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{атм}}, \text{мм рт.ст}$
1	повітря	5,0	9	750
2	азот	6,0	10	756
3	кисень	7,7	12	760
4	метан	8,0	14	770
5	азот	6,0	25	745
6	оксид вуглецю	5,0	35	740
7	діоксид вуглецю	7,5	17	748
8	повітря	9,3	11	753
9	кисень	8,6	20	747
10	метан	6,6	30	754

Задача 3.8. При політропному стисканні 1 кг газу його об'єм зменшився в i разів. Початковий надлишковий тиск газу $p_{1\text{ надл}}, \text{бар}$, початкова температура $t_1, ^\circ\text{C}$, показник політропи n . Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.8 – Вихідні дані до задачі 3.8

Варіант	газ	i	$p_{1\text{ надл}}, \text{бар}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	n	$p_{\text{атм}}, \text{мм рт.ст}$
1	повітря	3,1	0,52	9	1,45	750
2	азот	5,2	0,64	10	1,39	756
3	кисень	6,3	0,77	12	1,32	760
4	метан	4,2	0,86	14	1,46	770
5	азот	2,4	0,64	25	1,52	745
6	оксид вуглецю	4,3	0,58	35	1,36	740
7	діоксид вуглецю	3,8	0,75	17	1,29	748
8	повітря	2,9	0,93	11	1,53	753
9	кисень	3,8	0,86	20	1,61	747
10	метан	4,5	0,66	30	1,34	754

Задача 3.9. До m , кг газу при атмосферному тиску $p_{\text{атм}}$, мм рт.ст була підведена Q , кДж тепла. Початкова температура повітря t_1 , °С. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії, а також роботу процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Таблиця 3.9 – Вихідні дані до задачі 3.9

Варіант	m , кг	газ	Q , кДж	t_1 , °С	$p_{\text{атм}}$, мм рт.ст
1	3	повітря	90	27	750
2	5	азот	100	30	756
3	8	кисень	120	32	760
4	11	метан	140	40	770
5	9	азот	250	20	745
6	13	оксид вуглецю	350	15	740
7	18	діоксид вуглецю	170	25	748
8	10	повітря	110	47	753
9	16	кисень	200	37	747
10	20	метан	300	26	754

3.3. Приклади розв'язування типових задач

3.3.1 До 5 кг азоту при атмосферному тиску 756 мм рт. ст. було підведено 100 кДж тепла. Початкова температура повітря 30 °С. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії газу, а також роботу процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Розв'язання

1. Початковий стан: тиск $p_1 = p_{\text{атм}} = 756 \cdot 133,3 = 100775$ Па;
температура $t_1 = 30^\circ \text{C}$; $T_1 = t_1 + 273 = 30 + 273 = 303$ К;
за рівнянням стану ідеального газу об'єм

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1};$$

Для азоту молекулярна маса $\mu_{\text{N}_2} = 28$ кг/кмоль;
газова стала

$$R_{\text{N}_2} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{N}_2}} = \frac{8314}{28} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$V_1 = \frac{5 \cdot 297 \cdot 303}{100775} = 4,465 \text{ м}^3.$$

2. Кінцевий стан: тиск $p_2 = p_{\text{атм}} = 100775 \text{ Па}$;
тепло процесу

$$Q = m c_p (T_2 - T_1),$$

звідки кінцева температура

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{m c_p},$$

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{\text{N}_2}},$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність.

де μc_p – мольна ізобарна теплоємність. Азот – двоатомний газ, тому $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

$$c_p = \frac{29,1}{28} = 1,04 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$T_2 = 303 + \frac{100}{5 \cdot 1,04} = 322 \text{ К};$$

$$t_2 = T_2 - 273 = 322 - 273 = 49^\circ \text{C}.$$

Кінцевий об'єм

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 4,465 \cdot \frac{322}{303} = 4,745 \text{ м}^3.$$

3. Зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1),$$

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{\text{N}_2}},$$

де c_v – масова ізохорна теплоємність.

де μc_v – мольна ізохорна теплоємність. Азот – двоатомний газ, тому $\mu c_v = 20,8 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

$$c_v = \frac{20,8}{28} = 0,743 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta U = 5 \cdot 0,743 (322 - 303) = 70,6 \text{ кДж}.$$

Ентальпії газу:

$$\Delta I = Q = 100 \text{ кДж}.$$

Зміна ентропії газу:

$$\Delta S = m c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 5 \cdot 1,04 \cdot \ln \frac{322}{303} = 0,315 \frac{\text{кДж}}{\text{К}} = 315 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

4. Робота процесу

$$L = m p_1 (V_2 - V_1) = 5 \cdot 100775 (4,745 - 4,465) = 141085 \text{ Дж} = 141 \text{ кДж}.$$

5. Графіки процесу

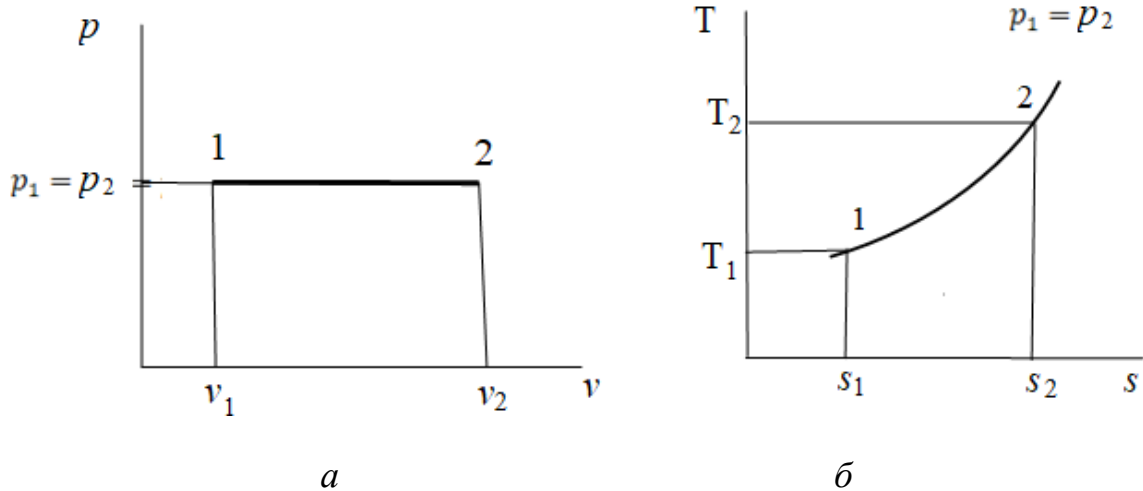


Рисунок 3.3.1 – Графіки процесу до задачі 3.3.1:
a – у $p - V$ – координатах; *б* – у $T - s$ – координатах.

3.3.2. У балоні ємністю 90 л знаходиться 20 кг метану при температурі 66 °С. Визначити початковий тиск газу в балоні та показ манометра, підключеного до балону, після зменшення температури газу до 66 °С. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії газу, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах. Атмосферний тиск прийняти 754 мм рт.ст.

Розв'язання

1. Початковий стан:

температура $t_1 = 66^\circ \text{C}$; $T_1 = t_1 + 273 = 66 + 273 = 339 \text{ К}$;

об'єм $V_1 = 90 \text{ л} = 0,09 \text{ м}^3$;

за рівнянням стану ідеального газу тиск

$$p_1 = \frac{mRT_1}{V_1}.$$

Для метану молекулярна маса $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг/кмоль}$;

газова стала

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{8314}{16} = 520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тоді

$$p_1 = \frac{20 \cdot 520 \cdot 339}{0,09} = 39,17 \cdot 10^6 = 39,17 \text{ МПа}.$$

2. Кінцевий стан:

температура $t_2 = 26^\circ \text{C}$; $T_2 = t_2 + 273 = 26 + 273 = 299 \text{ К}$;

об'єм $V_2 = V_1 = 90 \text{ л} = 0,09 \text{ м}^3$;

тиск

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 39,17 \frac{299}{339} = 34,55 \text{ МПа} = 34,55 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Кінцеві показання манометру:

$$p_{2\text{ндл}} = p_2 - p_{\text{атм}} = 34,55 \cdot 10^6 - 754 \cdot 133,32 = 34,45 \cdot 10^6 \text{ Па} = \\ = 34,45 \text{ МПа}.$$

3. Зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1),$$

де c_v – масова ізохорна теплоємність.

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{\text{CH}_4}},$$

де μc_v – мольна ізохорна теплоємність. Метан – багатоатомний газ, тому

$$\mu c_v = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$c_v = \frac{29,1}{16} = 1,82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta U = 20 \cdot 1,82(299 - 339) = -1456 \text{ кДж}.$$

Зміна ентальпії газу:

$$\Delta I = mc_p(T_2 - T_1),$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{\text{CH}_4}},$$

де μc_p – мольна ізобарна теплоємність.

Для метану – багатоатомного газу – $\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

$$c_p = \frac{37,4}{16} = 2,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta I = 20 \cdot 2,34(299 - 339) = -1872 \text{ кДж}.$$

Зміна ентропії газу:

$$\Delta S = m c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 20 \cdot 1,82 \cdot \ln \frac{299}{339} = -4,57 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}.$$

4. Тепло процесу

$$Q = m c_v (T_2 - T_1) = \Delta U = -1456 \text{ кДж}.$$

5. Робота процесу $L = 0$.

6. Графіки процесу

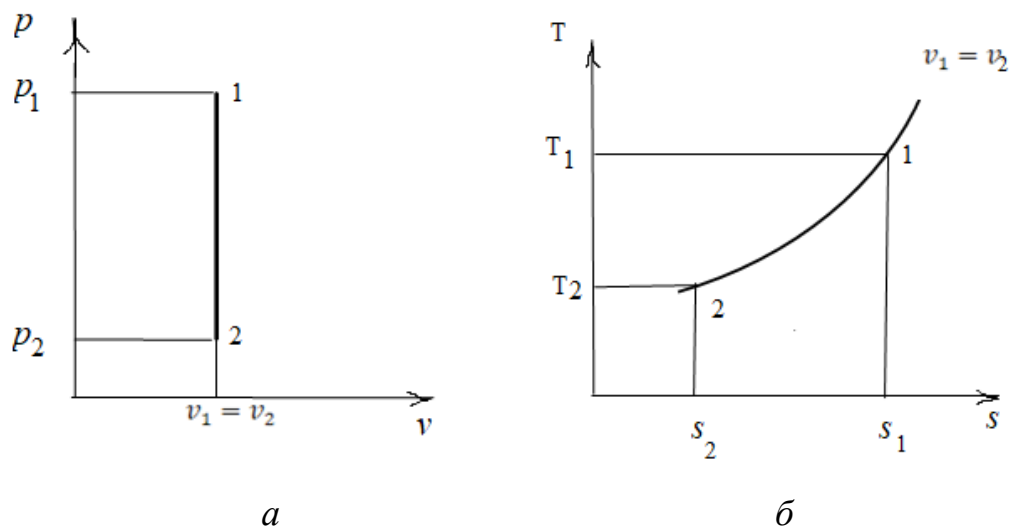


Рисунок 3.3.2 – Графіки процесу до задачі 3.3.1:
a – у $p - V$ – координатах; *б* – у $T - s$ – координатах.

3.3.3. При політропному стисканні 1 кг метану його об'єм зменшився в 4,2 разів. Початковий надлишковий тиск газу 0,86 бар, початкова температура 14 °С, показник політропи 1,46. Визначити відсутні основні параметри в початковому та кінцевому станах. Атмосферний тиск 770 мм рт ст. Підрахувати зміну в процесі внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії газу, а також роботу та тепло процесу. Побудувати графіки процесів у $p - V$ – та $T - s$ – координатах.

Розв'язання

1. Початковий стан: тиск надлишковий $p_{1 \text{ ндл}} = 0,86 \text{ бар}$;

тиск абсолютний $p_1 = p_{1\text{ ндл}} + p_{\text{атм}} = 0,86 \cdot 10^5 + 770 \cdot 133,32 =$
 $= 188641 \text{ Па};$

температура $t_1 = 14^\circ \text{C}; T_1 = t_1 + 273 = 14 + 273 = 287 \text{ К};$

за рівнянням стану ідеального газу питомий об'єм

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}.$$

Для метану молекулярна маса $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг/кмоль};$
газова стала

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{8314}{16} = 520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тоді

$$v_1 = \frac{520 \cdot 287}{188641} = 0,791 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Кінцевий стан: питомий об'єм за умовою

$$v_2 = \frac{v_1}{i} = \frac{0,791}{4,2} = 0,188 \text{ м}^3/\text{кг};$$

тиск

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = 188641 \cdot 4,2^{1,46} = 1533134 \text{ Па} = 1,533 \text{ МПа};$$

температура

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = 287 \cdot 4,2^{1,46-1} = 555 \text{ К}.$$

3. Зміна питомої внутрішньої енергії газу

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1),$$

де c_v — масова ізохорна теплоємність.

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{\text{CH}_4}},$$

де μc_v — мольна ізохорна теплоємність. Метан — багатоатомний газ, тому

$$\mu c_v = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$c_v = \frac{29,1}{16} = 1,82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta u = 1,82(555 - 287) = 488 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Зміна питомої ентальпії газу:

$$\Delta i = c_p(T_2 - T_1),$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{\text{CH}_4}},$$

де μc_p – мольна ізобарна теплоємність, для метану – багатоатомного газу

$$\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$c_p = \frac{37,4}{16} = 2,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta i = 2,34(555 - 287) = 627 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Зміна питомої ентропії газу:

$$\Delta s = c_v \frac{n - k}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1},$$

де $k = 1,33$ – показник адіабати для метану.

$$\Delta s = 1,82 \cdot \frac{1,46 - 1,33}{1,46 - 1} \ln \frac{555}{287} = 0,186 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4. Питоме тепло процесу

$$q = c_v \frac{n - k}{n - 1} (T_2 - T_1) = 1,82 \frac{1,46 - 1,33}{1,46 - 1} (555 - 287) = 138 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5. Питома робота процесу

$$l = q - \Delta u = 138 - 488 = -350 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Графіки процесу

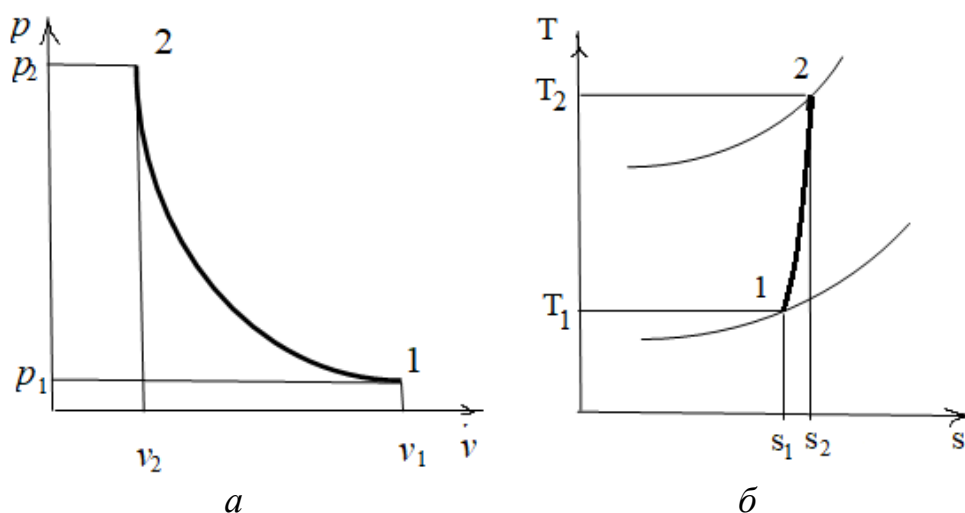


Рисунок 3.3.3 – Графіки процесу до задачі 3.3.1:
 a – у $p - v$ – координатах; b – у $T - s$ – координатах.

Контрольні запитання

1. Якими способами відбувається передача енергії від термодинамічної системи до зовнішніх тіл?
2. За якою формулою обчислюється робота в довільному термодинамічному процесі?
3. Як графічно зображується робота в $p-v$ координатах?
4. В якому випадку робота в термодинамічному процесі позитивна, а в якому негативна?
5. Формули для обчислення кількості теплоти у довільному термодинамічному процесі.
6. Що зображує площа під кривою процесу на $T-s$ діаграмі?
7. В якому випадку кількість теплоти має позитивний знак, а в якому негативний знак?
8. Формулювання першого закону термодинаміки у загальному випадку.
10. Що розуміють під поняттям "теплоємність"?
11. Як позначається теплоємність та в яких одиницях вона вимірюється?
12. В якому термодинамічному процесі теплоємність залишається постійною?
13. Перерахуйте види теплоємності.
14. Яким чином пов'язані між собою теплоємності c_p і c_v ?
15. Чому теплоємність c_p більша від теплоємності c_v ?
16. Яким чином пов'язані між собою масова і мольна теплоємності?
17. Як можна визначити мольну теплоємність ідеального газу?
18. З якою метою використовується поняття теплоємності?
19. Яким чином визначається показник адібатного процесу?
20. На що вказує збільшення ентропії в термодинамічному процесі?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТАНУ ВОДЯНОЇ ПАРИ АНАЛІТИЧНО ТА ЗА ДОПОМОГОЮ ТАБЛИЦЬ І ДІАГРАМ

Мета роботи: розраховуючи процеси, пов'язані з водяною парою, навчитися користуватися таблицями для водяної пари або $h-s$ діаграмою водяної пари; вміти визначати параметри, якими здається кожний стан пари, вміти зображувати графіки парових процесів у діаграмах $p-v$, $T-s$, $h-s$.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати основні закономірності фазових переходів у чистій речовині, вміти визначати параметри стану пари за таблицями та спеціальними діаграмами, вміти розраховувати парові термодинамічні процеси.

4.1 Теоретична частина

Параметри та стан водяної пари встановлюються за допомогою таблиць теплофізичних параметрів робочого тіла або з використанням діаграм, що побудовані за даними цих таблиць. Зазвичай користуються діаграмами в координатах питома ентальпія – питома ентропія, тобто $i-s$ діаграмами.

При вирішенні задачі за відомими двома параметрами пари на діаграмі знаходиться точка, що відповідає заданому стану. Величини інших параметрів дорівнюють їх значенням на відповідних ізо-лініях, що проходять через знайдену точку.

Параметри киплячої води та сухої насиченої пари наведені в таблицях теплофізичних властивостей води та водяної пари залежно від тиску або температури. Оскільки стан киплячої води та сухої насиченої пари визначаються лише одним параметром, то, знаючи тиск або температуру, з вище вказаних таблиць можна встановити величину будь-якого іншого параметра співіснуючих фаз – питомого об'єму v' та v'' , ентальпії i' та i'' , ентропії s' та s'' (величини з одним штрихом відносяться до киплячої рідини, з двома штрихами – до сухої насиченої пари). За цими даними параметри вологої насиченої пари можуть бути встановленими не лише з діаграми, а й розрахованими аналітично за правилом адитивності залежно від ступеня сухості пари x . Зважаючи на те, що кілограм вологої пари містить x кг сухої та $(1 - x)$ кг киплячої води, то її питомий об'єм

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

ентальпія

$$i_x = xi'' + (1 - x)i' = i' + x(i'' - i');$$

ентропія

$$s_x = xs'' + (1 - x)s' = s' + x(s'' - s').$$

4.2 Практична частина

Індивідуальне завдання № 4:

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 4.
Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

Умови задачі № 4 відповідно до варіанту:

Задача 4.1. Тиск водяної пари p бар, ступінь сухості x . Визначити стан пари та її температуру. Аналітично та за діаграмою $i-s$ встановити питомий об'єм, ентальпію та ентропію пари. Показати місцезнаходження точки, що характеризує пару, на $i-s$ діаграмі.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до задачі 4.1

Варіант	p , бар	x
1	1,0	0,97
2	1,2	0,95
3	1,6	0,88
4	2,0	0,86
5	2,6	0,83
6	3,0	0,81
7	5,0	0,85
8	6,0	0,91
9	8,0	0,89
10	10,0	0,92

Задача 4.2. Температура водяної пари t , °C, ступінь сухості x . Визначити стан пари та її тиск. Аналітично та за діаграмою $i-s$ встановити питомий об'єм, ентальпію та ентропію пари. Показати місцезнаходження точки, що характеризує пару, на $i-s$ діаграмі.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані до задачі 4.2

Варіант	t , °C	x
1	20	0,97
2	30	0,95
3	60	0,90
4	50	0,86
5	60	0,83
6	45	0,81
7	35	0,85
8	25	0,91
9	55	0,89
10	65	0,92

Задача 4.3. Температура водяної пари t , °С, її тиск p бар. Визначити стан пари, її питомий об'єм, ентальпію та ентропію. Показати місцезнаходження точки, що характеризує пару, на $i-s$ діаграмі.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані до задачі 4.3

Варіант	t , °С	p , бар
1	150	2,0
2	160	2,3
3	130	1,4
4	180	3,5
5	170	2,6
6	160	1,8
7	140	1,0
8	120	1,2
9	130	1,5
10	150	1,7

4.3 Приклад розв'язування типових задач

4.3.1. Температура водяної пари 40 °С, ступінь сухості 0,88. Визначити стан пари та її тиск. Аналітично та за діаграмою $i-s$ встановити питомий об'єм, ентальпію та ентропію пари. Показати місцезнаходження точки, що характеризує пару, на $i-s$ діаграмі.

Розв'язання

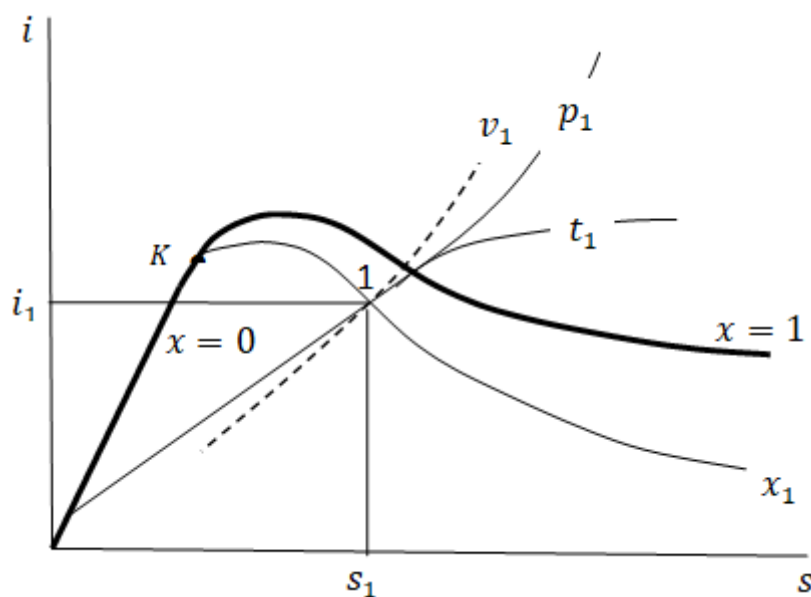


Рисунок 4.3.1 – $i-s$ Діаграма водяної пари до задачі 4.3.1

1. Стан пари – пара волога насичена.

Тиск пари $p_1 = 7375$ Па.

2. Питомий об'єм:

сухої насиченої пари $v'' = 19,55$ м³/кг;

киплячої води $v' = 0,0010079$ м³/кг;

вологої насиченої пари

$$v_1 = xv'' + (1 - x)v' = \\ = 0,88 \cdot 19,55 + (1 - 0,88)0,0010079 = 17,204 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Ентальпія:

сухої насиченої пари $i'' = 2573,6$ кДж/кг;

киплячої води $i' = 167,51$ кДж/кг;;

вологої насиченої пари

$$i_1 = xi'' + (1 - x)i' = \\ = 0,88 \cdot 2573,6 + (1 - 0,88)167,51 = 2285 \text{ кДж/кг};$$

4. Ентропія:

сухої насиченої пари $s'' = 8,256$ кДж/(кг · К);

киплячої води $s' = 0,5723$ кДж/(кг · К);

вологої насиченої пари

$$s_1 = xs'' + (1 - x)s' = \\ = 0,88 \cdot 8,256 + (1 - 0,88)0,5723 = 7,334 \text{ кДж/(кг · К)}.$$

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються властивості водяної пари від властивостей ідеального газу?
2. Що називається пароутворенням і випаровуванням?
3. Визначте поняття температура насичення.
4. Від чого залежить температура насичення речовини?
5. Яка пара називається вологою насиченою, сухою насиченою, перегрітою?
6. Що являє собою ступінь сухості й вологості?
7. З'ясуйте поняття теплоти пароутворення.
8. Які рівняння справедливі для ідеального та реального газів?
9. Зобразіть діаграму водяної пари в координатах $p - v$.
10. Охарактеризуйте стан пари та її параметри у критичній точці.
11. Зобразіть діаграму в координатах $T - s$ й охарактеризуйте підведення тепла у процесі пароутворення.
12. Зобразіть діаграму водяної пари в координатах $i - s$.
13. Яким чином можна визначити питомий об'єм, ентальпію, ентропію вологої пари?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВИХ І ПАРОВИХ ПОТОКІВ ПРИ ЇХ ВИТІКАННІ

Мета роботи: навчитися аналізувати процеси на основі першого закону термодинаміки. знати, в яких галузях техніки використовуються процеси витікання і дроселювання газів і парів, уміти розрахувати швидкість витікання і масову секундну витрату при витіканні газу або пари із циліндричного, комбінованого або сопла, що звужується.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати закони термодинаміки потоку газу та пари і вміти застосовувати їх при розрахунках процесів витікання з сопел та процесу дроселювання, змішування газових потоків.

5.1 Теоретична частина

Розрахунок параметрів потоку ідеального газу при його витіканні через сопло, що звужується, при заданих значеннях початкового тиску p_1 , тиску в середовищі, куди газ витікає $p_{\text{ср}}$ та його масової витрати M розпочинають з порівняння відношення $p_{\text{ср}}/p_1$ з величиною $\beta_{\text{кр}}$, яка залежить від показника адіабати газу, тобто визначається його атомністю.

Для одноатомного газу $k = 1,66$ і $\beta_{\text{кр}} = 0,49$;

для двоатомного газу $k = 1,4$ і $\beta_{\text{кр}} = 0,528$;

для триатомного газу $k = 1,33$ і $\beta_{\text{кр}} = 0,546$.

Якщо

$$\frac{p_{\text{ср}}}{p_1} > \beta_{\text{кр}},$$

то тиск у кінцевому перерізі сопла

$$p_2 = p_{\text{ср}},$$

швидкість потоку розраховують за формулою

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (5.1.1)$$

масову витрату газу за рівнянням

$$M = \omega_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (5.1.2)$$

Площа вихідного перерізу сопла в цьому разі становить

$$\omega_2 = \frac{M}{\sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_{\text{ср}}}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{\text{ср}}}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}}. \quad (5.1.3)$$

Якщо

$$\frac{p_{\text{ср}}}{p_1} \leq \beta_{\text{кр}},$$

то тиск у кінцевому перерізі сопла співпадає з критичним

$$p_2 = p_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}} p_1,$$

критичну швидкість потоку розраховують за формулою

$$w_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1}, \quad (5.1.4)$$

максимальну масову витрату газу за рівнянням

$$M_{\text{max}} = \omega_2 \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (5.1.5)$$

Площа вихідного перерізу сопла в цьому разі становить

$$\omega_2 = \frac{M}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}}. \quad (5.1.6)$$

При витіканні газу з комбінованого сопла Лавалю розрахунок його звужувальної частини виконується так само, як і звичайного звужувального

дозвукового сопла. В самому вузькому перерізі сопла встановлюється критичний тиск $p_{кр}$ і критична швидкість $w_{кр}$, яка розраховується за формулою (5.1.4). Максимальна витрата через сопло визначається за рівнянням (5.1.5). Площа мінімального перерізу ω_{min} за заданою масовою витратою M визначається за рівнянням (5.1.6).

У вихідному перерізі сопла Лавалю тиск

$$p_2 = p_{ср}$$

Параметри потоку в цьому перерізі розраховують за формулами (5.1.1) і (5.1.2). Площу вихідного перерізу підраховують за формулою (5.1.3).

Довжину звужувальної частини сопла приймають, зазвичай, такою, що дорівнює діаметру вихідного перерізу, тобто

$$l_{зв} = D.$$

Довжину частини, що розширюється, можна підрахувати за формулою

$$l_{рш} = \frac{D - d}{2 \tan \frac{\gamma}{2}},$$

де d — діаметр мінімального перерізу сопла; $\gamma = 8 \dots 12^\circ$ — кут конусності розширювальної частини сопла.

Якщо геометричні розміри сопла відомі, то швидкість витікання газу та його витрата визначаються за рівняннями (5.1.1) і (5.1.2).

Температура потоку у вихідному перерізі будь-якого сопла

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (5.1.7)$$

де T_1 — початкова температура газу, К.

5.2. Практична частина

Індивідуальне завдання № 5:

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 5.

Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

Умови задачі № 5 відповідно до варіанту.

Задача 5.1. У резервуарі, заповненому газом, підтримується надлишковий тиск $p_{1ндл}$, МПа, і температура t_1 , °С. Газ витікає через звужувальне сопло в середовище з абсолютним тиском p_2 . Визначити швидкість витікання, витрату та кінцеву температуру газу. Процес витікання вважати адіабатним, а площу вихідного перерізу прийняти рівною ω_2 , мм².

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до задачі 5.1

Варіант	Газ	$p_{1\text{ндл}}$, МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа	ω_2 , мм ²
1	повітря	3,6	280	1,9	50
2	азот	2,4	250	0,5	65
3	кисень	3,5	320	0,3	79
4	метан	3,1	350	0,06	68
5	гелій	2,6	290	0,07	95
6	оксид вуглецю	1,2	230	0,03	85
7	діоксид вуглецю	1,7	240	0,04	88
8	гелій	2,5	400	1,5	74
9	кисень	3,7	430	0,9	81
10	метан	2,2	380	0,08	95

Задача 5.2. Визначити теоретичну швидкість адіабатного витікання газу через сопло Лавалля, витрату і кінцеву температуру газу, якщо надлишковий тиск у резервуарі $p_{1\text{ндл}}$, МПа, а температура t_1 , °C. Тиск середовища на виході із сопла $p_{\text{ср}} = 0,1p_1$, площа мінімального перерізу ω_{min} . Порівняти отриману швидкість з критичною.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до задачі 5.2

Варіант	Газ	$p_{1\text{ндл}}$, МПа	t_1 , °C	ω_{min} , мм ²
1	повітря	3,6	280	50
2	азот	2,4	250	65
3	кисень	3,5	320	79
4	метан	3,1	350	68
5	аргон	2,6	290	95
6	оксид вуглецю	1,2	230	85
7	діоксид вуглецю	1,7	240	88
8	гелій	2,5	400	74
9	кисень	3,7	430	81
10	метан	2,2	380	95

5.3 Приклади розв'язування типових задач

5.3.1. Вуглекислий газ (CO₂), який має на вході в сопло, що звужується, параметри $p_1 = 50$ бар і $t_1 = 37$ °C, витікає в середовище, тиск якого $p_2 = 30$ бар.

визначити швидкість, витрату і температуру газу t_2 , якщо діаметр вихідного отвору $d = 20$ мм.

Розв'язання

Для визначення режиму витікання визначаємо $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{30}{50} = 0,6$ і порівнюємо з $\beta_k = 0,546$ (для трьохатомного газу). Отже $\beta > \beta_k$, тому режим витікання буде докритичний (дозвуковий).

В такому випадку швидкість витікання розраховуємо за формулою

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для трьохатомних газів; $R = 189$ Дж/(кг·К) – газова стала для CO_2 .

$$\text{Отже } \omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,29}{1,29-1} 189 \cdot (37 + 273) \cdot \left[1 - (0,6)^{\frac{1,29-1}{1,29}} \right]} = 239,4 \text{ м/с.}$$

Масову секундну витрату визначаємо за формулою

$$M = F_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \left(\frac{3,14 \cdot 20^2}{4} \right) \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,29}{1,29-1} \cdot \frac{(50 \cdot 10^5)^2}{189 \cdot 310} \cdot \left[(0,6)^{\frac{2}{1,29}} - (0,6)^{\frac{1,29+1}{1,29}} \right]} = 4,28 \text{ кг/с.}$$

Температуру газу на виході з сопла визначимо з рівняння адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 310 \cdot 0,6^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 276 \text{ К або } t_2 = 3^\circ\text{C.}$$

Температура газу CO_2 при витіканні з сопла зменшилася на 24°C .

5.3.2. В резервуарі, який заповнений газом N_2 , підтримується надлишковий тиск $p_{\text{н}} = 0,9$ МПа і температура $T_1 = 177^\circ\text{C}$. Газ витікає через сопло у середовище з абсолютним тиском $0,2$ МПа. Вибрати раціональну форму сопла і визначити швидкість витікання, витрату M , а також кінцеву температуру газу. Площа вихідного перерізу сопла дорівнює $F_2 = 380$ мм². Атмосферний тиск дорівнює $B = 760$ мм рт.ст.

Розв'язання

Абсолютний тиск в резервуарі

$$p_1 = p_{\text{н}} + B = 9 \cdot 10^5 + 760 \cdot 133 = 10,01 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,001 \text{ МПа.}$$

Визначаємо перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,2}{1,001} = 0,2$. Перепад тиску β менше

$\beta_k = 0,528$, тому режим витікання надкритичний. Для використання повного перепаду тиску вибираємо комбіноване сопло (сопло Лавалю).

Швидкість витікання визначаємо за формулою

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} 297 \cdot (177 + 273) \cdot \left[1 - 0,2^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 518 \text{ м/с},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для азоту N_2 ; $R = 297$ Дж/(кг·К) – газова стала N_2 .

Масову витрату газу визначаємо за формулою (8.5)

$$M = F_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} =$$

$$= 380 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot \frac{(10,01 \cdot 10^5)^2}{297 \cdot 350} \left[0,2^{\frac{2}{1,4}} - 0,2^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,598 \text{ кг/с}.$$

Температуру азоту на виході з сопла визначаємо з рівняння адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 350 \cdot 0,2^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 221 \text{ К}.$$

5.3.3. Аргон з початковими параметрами $p_1 = 3$ МПа і $t_1 = 250$ °С витікає в атмосферу ($p_2 = 0,1$ МПа) крізь сопло Лавалю в кількості $M = 0,8$ кг/с. Визначити площі мінімального $F_{\min}$ та вихідного F_2 перерізів сопла, якщо його швидкісний коефіцієнт $\varphi = 0,9$.

Розв’язання

Площі $F_{\min}$ і F_2 знаходимо з рівняння нерозривності струменя

$$F_{\min} = \frac{M \cdot v_k}{\omega_{к,д}},$$

$$F_2 = \frac{M \cdot v_2}{\omega_{2д}},$$

де v_k – питомий об’єм газу у мінімальному перерізі сопла; v_2 – питомий об’єм газу у вихідному перерізі сопла; $\omega_{к,д}$ – дійсна швидкість витікання газу у мінімальному перерізі сопла; $\omega_{2д}$ – дійсна швидкість витікання газу у вихідному перерізі сопла.

Для визначення питомих об’ємів газу використовуємо рівняння адіабати

$$\left(\frac{v_1}{v_k}\right)^k = \frac{p_k}{p_1} = \beta_k \quad \text{звідки} \quad v_k = \frac{v_1}{\beta_k^{\frac{1}{k}}},$$

де $v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p} = \frac{208 \cdot (250 + 273)}{3 \cdot 10^6} = 0,036 \text{ м}^3/\text{кг}$; $R = 208 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала аргону; $\beta_k = 0,487$ – критичний перепад тиску для одноатомних газів; $k = 1,67$ – показник адіабати для одноатомних газів.

$$\text{Отже} \quad v_k = \frac{0,036}{\frac{1}{0,487^{1,67}}} = 0,0553 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\beta^{\frac{1}{k}}} = \frac{0,036}{\left(\frac{0,1}{3}\right)^{\frac{1}{1,67}}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\omega_{к.д} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1} = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67}{1,67+1} \cdot 208 \cdot 523} = 332 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2д} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot (1 - \beta^{\frac{k-1}{k}})} = 0,9 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67}{1,67-1} \cdot 208 \cdot 523 \cdot (1 - 0,33^{\frac{1,67-1}{1,67}})} = 398 \text{ м/с}.$$

Розраховуємо площі перерізів сопла $F_{\min}$ та F_2

$$F_{\min} = \frac{0,8 \cdot 0,0553}{332} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 133 \text{ мм}^2,$$

$$F_2 = \frac{0,8 \cdot 0,13}{398} = 2,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 261 \text{ мм}^2.$$

5.3.4. Визначити теоретичну швидкість, секундну витрату, температуру наприкінці адіабатного розширення при витіканні пари з сопла Лавалю для таких умов: $p_1 = 15 \text{ бар}$, $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $p_2 = 1 \text{ бар}$. Площа вихідного перерізу $F_2 = 300 \text{ мм}^2$. Зобразити процес витікання в h - s координатах і визначити стан пари наприкінці адіабатного розширення.

Розв'язання

Швидкість витікання визначаємо за формулою $\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2}$.

Секундну витрату пари визначаємо за формулою $M = \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2}$.

Значення ентальпій h_1 , h_2 , густину пари v_2 і температуру t_2 визначаємо за допомогою h - s діаграми: $h_1 = 3040 \text{ кДж/кг}$, $h_2 = 2520 \text{ кДж/кг}$, $v_2 = 1,58 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$.

$$\text{Отже} \quad \omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{3040 - 2520} = 1019 \text{ м/с}.$$

$$M = \frac{300 \cdot 10^{-6} \cdot 1019}{1,58} = 0,193 \text{ кг/с}.$$

Наприкінці адіабатного розширення в точці 2 пара буде вологою насиченою зі ступенем сухості $x_2 = 0,93$ і температурою $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

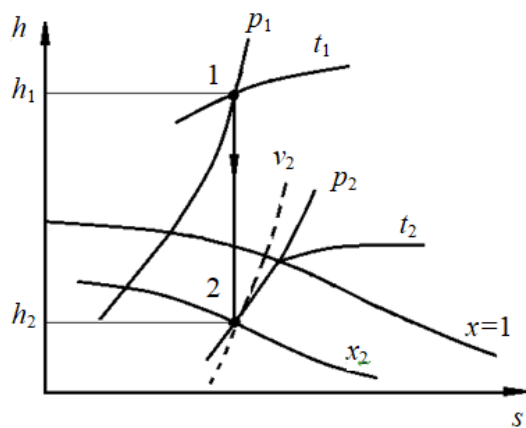


Рисунок 5.3.1 – Процес адіабатного витікання в h - s координатах до задачі 5.3.4

Контрольні запитання

1. Як можна визначити процес витікання газу в аспекті перетворення енергії?
2. Який канал витікання газу називається соплом, а який дифузором?
3. Порівняйте рівняння першого закону термодинаміки для потоку і для термодинамічної системи, що рухається в просторі.
4. Сформулюйте і запишіть рівняння нерозривності для потоку.
5. Запишіть рівняння першого закону термодинаміки для випадку, коли газ витікає із сопла адіабатично.
6. Від чого залежить величина швидкості витікання і масової секундної витрати газу із сопла?
7. Побудуйте графік зміни швидкості витікання ідеального газу із звужуваного сопла залежно від перепаду тиску.
8. Побудуйте графік зміни масової секундної витрати газу залежно від перепаду тиску.
9. Що являє собою критичне відношення тисків? Поясніть це поняття.
10. З'ясуйте поняття кризи витікання.
11. Опишіть комбіноване сопло Лавалю, в яких випадках воно застосовується?
12. Поясніть процес витікання водяної пари і визначте його особливості.
13. Які існують режими витікання газів і парів?
14. Який процес називається дроселюванням і в яких технічних галузях він використовується?
15. Яким чином змінюються параметри потоку в процесі дроселювання ідеальних і реальних газів?
16. Чи змінюється працездатність потоку при дроселюванні?
17. Побудуйте графік процесу дроселювання водяної пари в координатах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

ВИВЧЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ

Мета роботи: навчитися розраховувати параметри газів в наступних процесах теплообміну: теплопровідність, тепловіддача, випромінювання; засвоїти основні закономірності способів переносу тепла.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати основні закономірності, яким підпорядковуються теплові потоки в процесах теплопровідності, тепловіддачі, променевого теплообміну.

6.1 Теоретична частина

Метою задач є розрахунок процесів теплопровідності є визначення величини теплового потоку, що проходить через плоску або циліндричну одну- та багат шарову стінки, розрахунок його густини і необхідної товщини стінки (або її шару) при відомих температурах на її внутрішній і зовнішній поверхнях. При розрахунках багат шарової стінки треба, зазвичай, підрахувати також температури на поверхнях контакту сусідніх шарів.

Густина теплового потоку, що проходить через плоску
– одно шарову стінку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{ст.б}} - t_{\text{ст.м}}) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t, \text{ Вт/м}^2,$$

– багат шарову стінку:

$$q = (t_{\text{ст.б}} - t_{\text{ст.м}}) / \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \text{ Вт/м}^2,$$

де λ і λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, з якого зроблена одно шарова стінка або певний шар багат шарової стінки, відповідно, Вт/(м·°C); δ і δ_i – товщина одно шарової або певного шару багат шарової стінки, відповідно, м; $t_{\text{ст.б}}$ і $t_{\text{ст.м}}$ – більша та менша температури на поверхнях стінки, °C; Δt – температурний напір між поверхнями стінки, °C; n – кількість шарів у стінці.

Температура на поверхні контакту i -того та $(i + 1)$ -го шарів стінки визначається так:

$$t_{i-(i+1)} = t_i - q \frac{\delta_i}{\lambda_i} = t_{i+1} + q \frac{\delta_{i+1}}{\lambda_{i+1}},$$

де t_i та t_{i+1} – температури на протилежних поверхнях шарів, °C; δ_i та δ_{i+1} – товщина i -того та $(i + 1)$ -го шарів стінки труби, відповідно, м; λ_i та λ_{i+1} – коефіцієнти теплопровідності i -того та $(i + 1)$ -го шарів.

Формула записана для випадку, коли $t_i > t_{i+1}$. Якщо $t_i < t_{i+1}$, то знак перед другим доданком у формулі змінюється на протилежний.

Кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через стінку циліндричної труби

$$Q = \frac{\pi l \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}$$

де l — довжина труби, м; d_1 і d_2 — внутрішній та зовнішній діаметри труби, м.

Для зручності розрахунків кількість теплоти, що віддається через стінку труби, відносять зазвичай або до одиниці довжини l , або до одиниці внутрішньої F_1 чи зовнішньої F_2 поверхонь труби. При цьому розрахункові формули набувають такого вигляду:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт/м;}$$

$$q_1 = \frac{Q}{F_1} = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\lambda} d_1 \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт/м}^2 ;$$

$$q_2 = \frac{Q}{F_2} = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\lambda} d_2 \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт/м}^2.$$

Найчастіше користуються величиною q_l .

У разі багатошарової стінки

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

де d_i та d_{i+1} — внутрішній та зовнішній діаметри i -того шару стінки труби.

Температура на поверхні контакту i -того та $(i + 1)$ -го шарів стінки труби визначається так:

$$t_{i-(i+1)} = t_i - \frac{q_l}{2\pi} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} = t_{i+1} + \frac{q_l}{2\pi} \frac{1}{\lambda_{i+1}} \ln \frac{d_{i+2}}{d_{i+1}},$$

де d_{i+1} та d_{i+2} — внутрішній та зовнішній діаметри $(i + 1)$ -го шару стінки труби.

Формула складена для випадку, коли $t_i > t_{i+1}$.

Конвективний теплообмін або тепловіддача — це процес обміну теплом між твердою поверхнею та рідиною або газом, що рухаються вздовж неї.

Кількість тепла, що передається при конвекції, визначається за законом Ньютона-Ріхмана. У ньому стверджується, що тепловий потік у процесі тепловіддачі пропорційний площі поверхні теплообміну F і різниці температур стінки $t_{ст}$ та рідини t_p :

$$Q = \alpha F(t_{ст} - t_p).$$

Коефіцієнт пропорційності α називається коефіцієнтом тепловіддачі. Він характеризує інтенсивність конвективного теплообміну. Одиниця виміру коефіцієнта тепловіддачі $Вт/(м^2 \cdot К)$; на практиці частіше використовують іншу – $Вт/(м^2 \cdot ^\circ С)$.

Конвективний теплообмін – це складне явище, визначальні величини якого змінюються в часі та в просторі, а коефіцієнт тепловіддачі являє собою складну функцію різних величин, що характеризують цей процес. У загальному випадку коефіцієнт тепловіддачі є функцією форми Φ , розмірів $l_1, l_2 \dots$, температури поверхні нагріву $t_{ст}$, швидкості руху рідини w , її температури t_p , фізичних властивостей рідини – коефіцієнта теплопровідності λ , питомої теплоємності c_p , густини ρ , коефіцієнта динамічної в'язкості μ та інших факторів:

$$\alpha = f(w, t_{ст}, t_p, \lambda, c_p, \rho, \mu, \Phi, l_1, l_2 \dots).$$

Аналітично встановити вплив різних факторів на величину коефіцієнта тепловіддачі практично неможливо і це ускладнює розрахунки конвективного теплообміну.

Через обмеженість можливостей аналітичного розв'язку велике значення у вивченні процесів тепловіддачі набуває експеримент. Експериментальні дослідження конвективного теплообміну виконують, спираючись на методи теорії подібності явищ. Такий підхід дозволив поширювати отримані результати на всі подібні процеси й дуже складні та багатогранні явища описувати достатньо простими функціональними залежностями між безрозмірними числами подібності – ці залежності називаються рівняннями подібності.

У рівняння подібності входять визначальні та визначувані числа подібності. Визначальні числа подібності складені лише з величин, що входять в умови однозначності процесу, тобто вони відомі ще до розв'язання задачі. Ці числа називаються також критеріями подібності. Інваріантність (однаковість) визначальних чисел подібності є умовою, виконання якої необхідне для отримання подібності. Визначувані числа подібності включають також величини, які не входять в умови однозначності процесу, тобто які невідомі.

Рівняння подібності – це залежність між яким-небудь визначуваним числом подібності та іншими визначальними числами подібності. Іншими словами, визначувані числа подібності – це невідомі, які знаходяться в

результаті розв'язання рівнянь тепловіддачі. Їх кількість має співпадати з кількістю рівнянь.

Конвективний теплообмін характеризується п'ятьма числами подібності – числом Нуссельта **Nu**, числом Ейлера **Eu**, числом Прандтля **Pr**, числом Грасгофа **Gr** і числом Рейнольдса **Re**. Користуються також числом Пекле $Pe = Re \cdot Pr$.

При розрахунку теплових апаратів величинами, які треба розрахувати, є коефіцієнт тепловіддачі α та гідравлічний опір Δp .

Число

$$Nu = \alpha l / \lambda,$$

тобто воно містить невідомий коефіцієнт тепловіддачі α ;

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w_p^2},$$

тобто до нього входить шукана величина Δp , що характеризує гідравлічний опір при русі рідини. Тому числа **Nu** і **Eu** є визначуваними числами подібності, а числа **Pr**, **Gr** і **Re** – визначальними.

При конвективному теплообміні рівняння подібності в загальному випадку можуть бути подані у такому вигляді

$$Nu = f_1(Re, Gr, Pr);$$

$$Eu = f_2(Re, Gr, Pr).$$

У часткових випадках функціональний зв'язок між числами подібності змінюється. Зараз рівняння подібності встановлені практично для всіх різновидів конвективного теплообміну, що зустрічаються на практиці.

Методика інженерних розрахунків процесів тепловіддачі полягає в наступному:

1. З навчальної літератури або з довідників знаходиться рівняння подібності, що відповідає умовам заданого процесу тепловіддачі. Вибираючи рівняння подібності треба пам'ятати про обмеженість їх області застосовності – в опису рівнянь завжди вказується інтервал зміни або критеріїв подібності, або інших величин, у межах якого можливе використання певного рівняння подібності.

При розв'язанні задач, пов'язаних з розрахунком коефіцієнта тепловіддачі, завжди необхідно звертати увагу на те, яка температура для даного рівняння подібності приймалася як визначальна.

У деякі рівняння подібності входить лінійний розмір. У цьому разі беруть характерний розмір, який визначає перебіг процесу і тому завжди необхідно звертати увагу на те, який розмір автор формули увів у число подібності як визначальний.

У всіх рівняннях подібності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі завжди використовують середню швидкість руху рідини, яка визначається за формулою

$$w = V/\omega ,$$

де V – об’ємна витрата рідини, м³/с; ω – площа поперечного перерізу каналу, м².

2. Вирішуючи рівняння подібності знаходиться величина числа Нуссельта Nu .

3. Підраховується коефіцієнт тепловіддачі за формулою

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l} ,$$

тепловий потік розраховується за рівнянням

$$Q = \alpha F(t_{ст} - t_p).$$

Рівняння подібності для деяких випадків конвективного теплообміну в примусовому та вільному потоці рідини:

1. Тепловіддача при розвиненому турбулентному русі в прямих трубах і каналах ($Re > 10\,000$).

Розрахункова формула

$$Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Визначальна температура – середня температура рідини (газу) t_p , визначальний геометричний розмір l – еквівалентний діаметр $d_{екв}$.

Для труб круглого перерізу $d_{екв} = d$.

Значення поправкового коефіцієнта ε_l , що враховує вплив на коефіцієнт тепловіддачі відношення довжини труби L до її діаметра, наведені в табл. 6.1.1.

Таблиця 6.1.1 – Значення коефіцієнта ε_l

Значення критерію Re	Відношення L/d				
	10	20	30	40	50 і більше
$1 \cdot 10^4$	1,23	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,18	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,13	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,10	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Співвідношення $Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$ можна використовувати для труб будь-якої форми поперечного перерізу – круглого, квадратного, прямокутного ($a/b = 1 \dots 40$), кільцевого ($d_2/d_1 = 1 \dots 5,6$) для газів і крапельних рідин при $Re_p = 1 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ і $Pr_p = 0,6 \dots 2500$.

Співвідношення підходить також і для каналів складного поперечного перерізу, зокрема, коли в трубі більшого діаметра знаходяться одна або декілька труб меншого діаметра (поздовжнє обтікання).

Для газів розрахункова формула

$Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$ спрощується, оскільки у цьому разі $Pr/Pr_{ст} = 1$, а Pr залежить лише від атомності газу:

$$Nu = C \varepsilon_l Re^{0,8}.$$

Наприклад, для повітря (двоатомного газу)

$$Nu = 0,018 \varepsilon_l Re^{0,8}.$$

При русі рідини у вигнутих трубах (колінах, відводах, змійовиках) неминуче виникає відцентровий ефект. Потік рідини віджимается до зовнішньої стінки, і в поперечному перерізі виникає так звана вторинна циркуляція. При збільшенні радіуса кривизни R вплив відцентрового ефекту зменшується. Через зростання швидкості та вторинної циркуляції і як наслідок збільшення турбулентності потоку значення середнього коефіцієнта тепловіддачі у вигнутих трубах вище, ніж у прямих.

Розрахунок тепловіддачі у вигнутих трубах виконується за формулами для прямої труби з подальшим уведенням як співмножника поправкового коефіцієнта ε_R , який для труб у вигляді змійовика визначається так:

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77(d/R),$$

де R — радіус змійовика; d — діаметр труби.

У змійовиках вплив відцентрового ефекту на інтенсивність тепловіддачі поширюється на всю довжину труби. У поворотах і відводах відцентрова дія має лише місцевий характер, але її вплив поширюється і далі. За рахунок збільшення турбулентності потоку в подальшій за поворотом прямій ділянці труби тепловіддача завжди дещо більша, ніж у прямій ділянці до повороту.

2. Тепловіддача в прямих трубах і каналах при $Re < 10\,000$ і $(Gr Pr) < 8 \cdot 10^5$ для вертикального або горизонтального розташування труб.

а) $Re < 2300$:

$$Nu = 1,55 \varepsilon_l \left(Re \frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}$$

Визначальна температура: $t = 0,5(t_{ст} + t_{p,ср})$,

де $t_{p,ср} = 0,5(t_{p,поч} + t_{p,кінц})$,

де $t_{p,поч}$ і $t_{p,кінц}$ – початкова та кінцева температури рідини відповідно.

Коефіцієнт ε_l ($\varepsilon_l \geq 1$) уводиться тоді, коли перед ділянкою труби, що обігривається, нема ділянки гідродинамічної стабілізації. Величина ε_l зазвичай близька до одиниці і при наближених розрахунках може не враховуватися.

Формула
$$Nu = 1,55 \varepsilon_l \left(Re \frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}$$
 виведена при значеннях $(\mu/\mu_{ст}) \geq 0,00067$ і $[Pe(d/L)] \geq 20$.

При значеннях $[Pe(d/L)] < 20$ величина Nu асимптотично прагне до граничного значення $Nu \approx 3,66$.

При ламінарній течії рідини в трубах за умови, що $L/d > 10$, $Re > 10$ і $0,06 < Pr/Pr_{ст} < 10$, розрахунок середнього коефіцієнта тепловіддачі можна виконувати також за формулою

$$Nu = 1,4 \left(Re \frac{d}{L} \right)^{0,4} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}.$$

б) $2300 < Re < 10\,000$. Для цієї області точних розрахункових формул немає. Приблизний розрахунок (із запасом) можна виконувати за графіком (рис. 6.1.1).

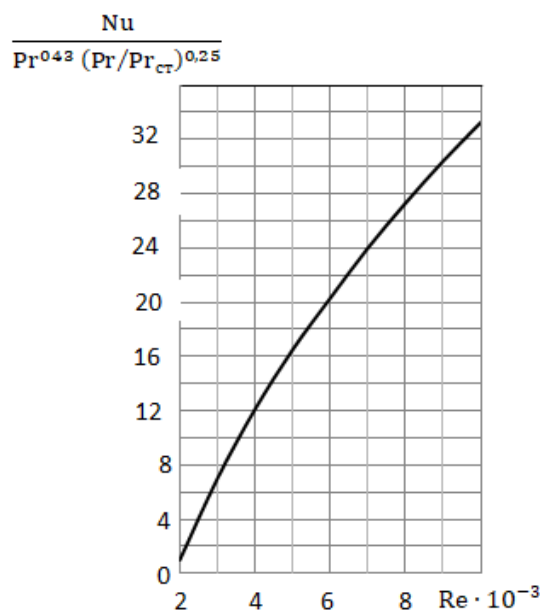


Рисунок 6.1.1 – Номограма для визначення числа Nu в області $(Gr Pr) < 8 \cdot 10^5$; $2300 < Re < 10000$

в) Вертикальне розташування труб при неспівпадінні вільної та примусової конвекції (рух рідини у вертикальній трубі від низу до верху при охолодженні та зверху вниз при нагріванні):

$$Nu = 0,037 Re^{0,75} Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^n,$$

де $n = 0,11$ при нагріванні, $n = 0,25$ при охолодженні.

Формула виведена при значеннях $250 < Re < 10\,000$;

$$1,5 \cdot 10^6 \leq (Gr Pr) \leq 1,2 \cdot 10^7.$$

Для приблизних розрахунків цю формулу можна використовувати і при $(Gr Pr) > 1,2 \cdot 10^7$.

г) Вертикальне розташування труб при збігу вільної та примусової конвекції (рух рідини у вертикальній трубі від низу до верху при нагріванні та зверху вниз при охолодженні). Коефіцієнти тепловіддачі при такій схемі руху теплоносіїв значно нижчі коефіцієнтів тепловіддачі при горизонтальному розташуванні труб і при вертикальному розташуванні, коли вільна та примусова конвекції не збігаються. Тому апарати з таким напрямом руху теплоносіїв використовувати не рекомендується і розрахункові формули не наводяться.

5. Тепловіддача при вільному русі (при природній конвекції).

а) Тепловіддача зовні горизонтальних труб при $10^3 < (Gr Pr) < 10^9$

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)^{0,25} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Визначальна температура – температура зовнішнього середовища; визначальний геометричний розмір – діаметр труби.

б) Для вертикальних поверхонь, плоских і циліндричних:

при $10^3 < (Gr Pr) < 10^9$ (ламінальний режим)

$$Nu = 0,76 (Gr Pr)^{0,25} (Pr/Pr_{ст})^{0,25};$$

при $(Gr Pr) > 10^9$ (турбулентний режим)

$$Nu = 0,15 (Gr Pr)^{0,33} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Визначальна температура – температура зовнішнього середовища; визначальний геометричний розмір для вертикальних поверхонь – висота.

Для газів $Pr = \text{const}$ і $Pr/Pr_{ст} = 1$, тому наведені розрахункові формули спрощуються.

Для повітря $Pr = 0,71$ і співвідношення пункту 5 методики набувають, відповідно, вигляду

$$Nu = 0,46 Gr^{0,25};$$

$$Nu = 0,695 Gr^{0,25};$$

$$Nu = 0,133 Gr^{0,33}.$$

У теплотехнічних розрахунках зазвичай треба розрахувати **променевий теплообмін** між тілами, якість поверхні, розміри та температура яких відомі. За цими даними енергія випромінювання обох тіл може бути визначена на основі закону Стефана-Больцмана за умови врахування впливу форми і розмірів тіл, їх взаємного розташування, відстані між ними та їх степеня чорноти.

Часто тіла, між якими відбувається променевий теплообмін, можна розглядати як паралельні пластини, розміри яких значно більші відстані між ними і які розділені прозорим середовищем. Для такої системи тіл результуюче теплове випромінювання розраховується за формулою:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений степінь чорноти системи тіл, між якими відбувається процес променевого теплообміну.

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1},$$

де ε_1 і ε_2 – степені чорноти кожної з поверхонь, значення яких беруться з довідників.

Розрахунок q можна також виконувати за рівнянням

$$q = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $c_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання системи тіл;

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 - 1/c_0},$$

де c_1 і c_2 – коефіцієнти випромінювання кожного тіла; їх значення беруться з довідників.

В техніці часто виникає потреба розраховувати променевий теплообмін у

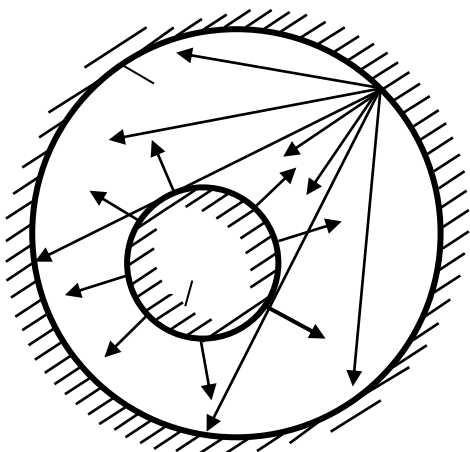


Рисунок 1 – Схема променевого теплообміну між тілами в замкнутому просторі

замкнутому просторі, коли одне тіло знаходиться в середині іншого (рис. 1). У цьому випадку на першу поверхню потрапляє лише деяка частина енергії, що випромінюється другою поверхнею, остання кількість проходить повз неї та знову потрапляє на другу поверхню. Кінцева розрахункова формула має вигляд:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де F_1 — площа меншої поверхні, м²; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведений степінь чорноти системи.

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

де F_2 — площа більшої поверхні, м².

Останні рівняння вірні для тіл будь-якої форми, лише б менше з них було випуклим. Зокрема, вони придатні для розрахунку променевого теплообміну між довгими циліндрами, а також, коли випукле та увігнуте тіла утворюють замкнутий простір. У всіх випадках у якості розрахункової приймають меншу з поверхонь. Якщо $F_1 \ll F_2$, то за цієї умови $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1$, тобто приведений степінь чорноти визначається степенем чорноти меншого тіла.

Якщо в розрахунках замість $\varepsilon_{\text{пр}}$ використовується приведений коефіцієнт випромінювання $c_{\text{пр}}$, то тепловий потік знаходиться за формулою:

$$Q_{1-2} = c_{\text{пр}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right)}.$$

В теплотехнічних системах часто виникає потреба зменшити вплив променевого теплообміну. Ефективним засобом для досягнення цього є використання теплових екранів — спеціальних перегородок, які встановлюються між випромінюючим тілом і елементом, що нагрівається. Зазвичай екран являє собою тонкий металевий лист, перепад температур по товщині якого настільки малий, що ним можна нехтувати і рахувати температури обох його поверхонь однаковими.

Розглянемо дію екрана між двома плоскими паралельними поверхнями (рис. 2), причому передачею теплоти конвекцією будемо нехтувати.

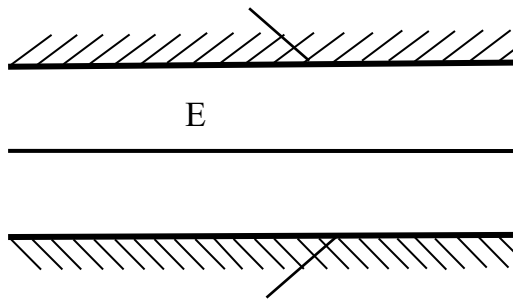


Рисунок 2 – Схема
розташування
тонкостінного екрана між
паралельними поверхнями

Вважаємо, що степені чорноти поверхонь ε_1 і екрана ε_E однакові. Температури поверхонь T_1 і T_2 підтримуються незмінними, причому $T_1 > T_2$. Температура екрана T_E .

При відсутності екрана теплообмін випромінюванням між поверхнями 1 і 2 визначається рівнянням

$$q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ де}$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений степінь чорноти

системи тіл.

При наявності екрана інтенсивність променевого теплообміну між поверхнями зміниться. Тепловий потік, що передається від першої поверхні до екрана знаходимо за формулою

$$q_{1-E} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_E}{100} \right)^4 \right],$$

а від екрана до другої поверхні – за рівнянням

$$q_{E-2} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_E}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

При стабілізованому тепловому стані $q_{1-E} = q_{E-2}$, тому

$$\varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_E}{100} \right)^4 \right] = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_E}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

Із цього співвідношення знаходимо невідому температуру екрана

$$\left(\frac{T_E}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

Підставляючи цю температуру в будь-яке із записаних рівнянь, отримуємо густину потоку результуючого випромінювання за наявності екрана

$$q_E = \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

Порівнюючи перше та останнє рівняння, бачимо, що встановлення одного екрана при прийнятих умовах зменшує енергію, що передається випромінюванням, у два рази:

$$q_E = \frac{1}{2} q_{1-2}.$$

За наявності n екранів енергія, що передається випромінюванням, за даних умов зменшується в $(n + 1)$ разів.

Ефект використання екранів суттєво зростає при зниженні його степеня чорноти ε_E , адже

$$\frac{q_E}{q_{1-2}} = \frac{1}{1 + n \frac{2 - \varepsilon_E}{2 - \varepsilon} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_E}}.$$

Якщо в розрахунках замість $\varepsilon_{пр}$ використовується приведений коефіцієнт випромінювання $c_{пр}$, то тепловий потік знаходиться за формулою:

$$q_E = \frac{1}{2} c_{пр} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

6.2 Практична частина

Індивідуальне завдання № 6

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 6. Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

Індивідуальне завдання № 7

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 7. Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

Індивідуальне завдання № 8

Відповідно до варіанту (розподіляє викладач) вирішити задачу № 8. Звіт повинен включати: титульний аркуш, умову задачі, розрахунки.

6.3 Приклади розв'язування типових задач

6.3.1. Визначити втрату тепла через цегляну стінку довжиною 5 м, висотою 3 м і товщиною 250 мм, якщо на поверхнях стінки підтримуються температури $t_1 = 20^\circ\text{C}$ і $t_2 = -30^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності цегли $\lambda = 0,6 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Густина теплового потоку, що проходить через стінку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{0,6}{0,25} [20 - (-30)] = 120 \text{ Вт/м}^2.$$

Тоді загальний тепловий потік:

$$Q = qF = 120 \cdot 5 \cdot 3 = 1800 \text{ Вт},$$

де F — площа стінки.

6.3.2. Визначити густину теплового потоку, що проходить через стінку котла, якщо її товщина $\delta_1 = 20$ мм, коефіцієнт теплопровідності матеріалу $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$. З внутрішнього боку стінка вкрита шаром котельного накипу товщиною $\delta_2 = 2$ мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_2 = 1,0 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$. Температура зовнішньої поверхні стінки $t_1 = 250 ^\circ\text{С}$; внутрішньої — $t_2 = 200 ^\circ\text{С}$. Визначити також температуру внутрішньої поверхні металевого корпусу котла (під накипом) [6].

Розв'язання

Густина теплового потоку, що проходить через двошарову стінку,

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{250 - 200}{\frac{0,02}{50} + \frac{0,002}{1}} = 20\,833 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура внутрішньої поверхні металевого корпусу котла (під накипом)

$$t'_1 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 250 - 20\,833 \frac{0,02}{50} = 241,7 ^\circ\text{С};$$

$$t'_1 = t_2 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 200 + 20\,833 \frac{0,002}{1} = 241,7 ^\circ\text{С}.$$

6.3.3. Внутрішній діаметр паропроводу $d_1 = 160$ мм, зовнішній — $d_2 = 170$ мм. Паропровід покритий двошаровою ізоляцією. Товщина першого шару $\delta_2 = 30$ мм, другого $\delta_3 = 50$ мм. Коефіцієнти теплопровідності стінки труби та ізоляції відповідно дорівнюють: $\lambda_1 = 50$, $\lambda_2 = 0,15$ і $\lambda_3 = 0,08 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$. Температура внутрішньої поверхні паропроводу $t_1 = 300 ^\circ\text{С}$, а зовнішньої поверхні ізоляції $t_4 = 50 ^\circ\text{С}$. Визначити лінійну густину теплового потоку та температури на поверхнях розділу окремих шарів [6].

Розв'язання

Діаметр першого шару ізоляції

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 170 + 2 \cdot 30 = 230 \text{ мм.}$$

Діаметр другого шару ізоляції

$$d_4 = d_3 + 2\delta_3 = 230 + 2 \cdot 50 = 330 \text{ мм.}$$

Лінійна густина теплового потоку

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14(300 - 50)}{\frac{1}{50} \ln \frac{170}{160} + \frac{1}{0,15} \ln \frac{230}{170} + \frac{1}{0,08} \ln \frac{330}{230}} = 240,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Тоді

$$t_2 = t_1 - \frac{q_l}{2\pi} \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = 300 - \frac{240,5}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{1}{50} \cdot \ln \frac{170}{160} \approx 300 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_3 = t_2 - \frac{q_l}{2\pi} \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = 300 - \frac{240,5}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{1}{0,15} \ln \frac{230}{170} = 223 \text{ }^\circ\text{C},$$

або

$$t_3 = t_4 + \frac{q_l}{2\pi} \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} = 50 + \frac{240,5}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{1}{0,08} \ln \frac{330}{230} = 223 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6.3.4. Через трубу діаметром $d = 50$ мм і довжиною $L = 3$ м із швидкістю $w = 0,8$ м/с протікає вода. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі, якщо середня температура води $t_{p,ср} = 50$ °С, а температура стінки $t_{ст} = 70$ °С [6].

Розв'язання

1. Теплофізичні параметри води при $t_{p,ср} = 50$ °С:

$$\lambda = 0,648 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}; \nu = 5,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2\text{/с; Pr} = 3,54.$$

$$t_{ст} = 70 \text{ }^\circ\text{C: Pr}_{ст} = 2,55 [1].$$

2. Визначаємо режим руху рідини:

$$\text{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{0,8 \cdot 0,05}{5,56 \cdot 10^{-7}} = 7,2 \cdot 10^4.$$

$Re > 10^4$, отже в трубі розвинений турбулентний рух, тому число Nu розраховуємо за формулою:

$$Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Оскільки $L/d = 3/0,05 = 60 > 50$, то коефіцієнт $\varepsilon_l = 1$.

Підставляючи дані, отримуємо

$$Nu = 0,021 \cdot 1 \cdot (7,2 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 3,54^{0,43} (3,54/2,55)^{0,25} = 303.$$

Тоді

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} = \frac{303 \cdot 0,648}{0,05} = 3927 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

6.3.5. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі та кількість переданої теплоти при протіканні води в горизонтальній трубі діаметром $d = 10$ мм і довжиною $L = 0,6$ м, якщо швидкість води $w = 0,1$ м/с, середня по довжині труби температура води $t_{p,ср} = 60$ °C і середня температура стінки $t_{ст} = 20$ °C [6].

Розв'язання

1. Теплофізичні параметри води при $t_{p,ср} = 60$ °C:

$\lambda = 0,659$ Вт/(м·°C); $\nu = 4,78 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $Pr = 2,98$; $\beta = 5,11 \cdot 10^{-4}$ 1/К;
 $\mu = 469,9 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

$t_{ст} = 20$ °C: $Pr_{ст} = 7,02$; $\mu_{ст} = 1004 \cdot 10^{-6}$ Па·с [1].

2. Визначаємо режим руху рідини:

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,01}{4,78 \cdot 10^{-7}} = 2092.$$

$Re < 10000$, тому підрахунок числа Nu слід виконувати за однією з формул пункту 2 (а - б) методики.

Визначальна температура для цих рівнянь:

$$t_p = 0,5(t_{ст} + t_{p,ср}) = 0,5(20 + 60) = 40 \text{ °C}.$$

Теплофізичні параметри води [1] при $t_p = 40$ °C:

$\lambda = 0,635$ Вт/(м·°C); $\nu = 6,59 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $Pr = 4,31$; $\beta = 3,87 \cdot 10^{-4}$ 1/К;
 $\mu = 653,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Для вибору розрахункової формули знаходимо добуток (Gr Pr).

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g\beta\vartheta_{\text{ст}}d^3}{\nu^2} = \frac{g\beta(t_{\text{p,ср}} - t_{\text{ст}})d^3}{\nu^2} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 3,87 \cdot 10^{-4}(60 - 20) \cdot 0,01^3 \cdot 10^{14}}{6,59^2} = 34,97 \cdot 10^4; \\ 1,3 \cdot 10^7 &> (Gr Pr) = 34,97 \cdot 10^4 \cdot 4,31 = 15,07 \cdot 10^5 > 8 \cdot 10^5; \\ 2 &> Pr = 4,31 < 10; \end{aligned}$$

При $t_p = 40^\circ\text{C}$ числа

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,01}{6,59 \cdot 10^{-7}} = 1517 < 3500;$$

$$Pe = Re \cdot Pr = 1517 \cdot 4,31 = 6538;$$

Добуток

$$Pe(d/L) = 6538 \cdot (0,01/0,6) = 109 < 120.$$

Отже, задовольняються всі умови використання формули

$$\begin{aligned} Nu &= 0,8 \left(Pe \frac{d}{L} \right)^{0,4} (Gr Pr)^{0,1} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14} = \\ &= 0,8 \cdot 109^{0,4} \cdot (15,07 \cdot 10^5)^{0,1} \cdot \left(\frac{653,3 \cdot 10^{-6}}{1004 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 20,405; \end{aligned}$$

Відповідно коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} = \frac{20,405 \cdot 0,635}{0,01} = 1296 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

3. Величина переданої теплоти

$$\begin{aligned} Q &= \alpha F \Delta t = \alpha \pi d L (t_{\text{p,ср}} - t_{\text{ст}}) = 1296 \cdot 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,6 (60 - 20) = \\ &= 977 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

6.3.6. По трубі діаметром $d = 300$ мм і довжиною $L = 6$ м проходить повітря зі швидкістю $w = 5$ м/с. Розрахувати значення середнього коефіцієнта тепловіддачі, якщо середня за довжиною труби температура повітря $t_{\text{p,ср}} = 100^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Теплофізичні параметри повітря при $t_{\text{p,ср}} = 100^\circ\text{C}$:

$$\lambda = 0,0321 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; \nu = 23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} [1].$$

2. Визначаємо число Рейнольдса як

$$\text{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{5 \cdot 0,25}{23,13 \cdot 10^{-6}} = 54042;$$

3. Розраховуємо число **Nu** за формулою

$$\text{Nu} = 0,018 \varepsilon_l \text{Re}^{0,8}.$$

У даному випадку $L/d = 6/0,3 = 20 < 50$, тому відповідно до табл. 6.1.1 при $\text{Re} = 54042$ поправковий коефіцієнт $\varepsilon_l = 1,08$.

Тоді

$$\text{Nu} = 0,018 \varepsilon_l \text{Re}^{0,8} = 0,018 \cdot 1,08 \cdot 54042^{0,8} = 118,8;$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d} = \frac{118,8 \cdot 0,0321}{0,3} = 12,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

6.3.7. Гладка плита шириною $b = 1$ м і довжиною $l = 1,2$ м обдувається повітрям зі швидкістю $w = 8$ м/с. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі α і повний тепловий потік Q , якщо температура стінки $t_{\text{ст}} = 60$ °C, а температура повітря $t_p = 20$ °C [6].

Розв'язання

1. Теплофізичні параметри повітря при $t_p = 20$ °C:

$$\lambda = 0,0259 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} [1].$$

2. Критерій Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{wl}{\nu} = \frac{8 \cdot 1,2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 6,37 \cdot 10^5 > 5 \cdot 10^5$$

режим обтікання турбулентний, тому число **Nu** визначаємо за формулою

$$\text{Nu} = 0,032 \text{Re}^{0,8} = 0,032 \cdot 637000^{0,8} = 1408.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{l} = \frac{1408 \cdot 0,0259}{1,2} = 30,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Повний тепловий потік, що передається при обтіканні

$$Q = \alpha F \Delta t = \alpha b l (t_{\text{ст}} - t_p) = 30,4 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot (60 - 20) = 1459 \text{ Вт.}$$

6.3.8. Визначити втрату теплоти шляхом конвекції у вертикальному неізолюваному паропроводі діаметром $d = 100$ мм і висотою $h = 4$ м, якщо температура зовнішньої поверхні стінки $t_{\text{ст}} = 170$ °С, а температура зовнішнього середовища (повітря) $t_p = 30$ °С [6].

Розв'язання

1. Теплофізичні параметри повітря при $t_p = 30$ °С:

$$\lambda = 0,0267 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}; \quad \nu = 16,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr} = 0,701; \quad \text{Pr}/\text{Pr}_{\text{ст}} = 1; \\ \beta = 1/303 \text{ °С}^{-1} \text{ [1].}$$

2. Визначаємо число Грасгофа як

$$\text{Gr} = \frac{g \beta \vartheta_c h^3}{\nu^2} = \frac{g \beta (t_{\text{ст}} - t_p) h^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot (170 - 30) \cdot 4^3 \cdot 10^{12}}{303 \cdot 16^2} = \\ = 1,133 \cdot 10^{12};$$

$$\text{Gr Pr} = 1,133 \cdot 10^{12} \cdot 0,701 = 7,94 \cdot 10^{11} > 10^9$$

режим конвекції турбулентний, тому число Nu визначаємо за формулою

$$\text{Nu} = 0,133 \text{ Gr}^{0,33} = 0,133 \cdot 1,133^{0,33} \cdot 10^{12 \cdot 0,33} = 1264.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{\text{Nu } \lambda}{h} = \frac{1264 \cdot 0,0267}{4} = 8,44 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

3. Втрати теплоти

$$Q = \alpha F \Delta t = \alpha \pi d h (t_{\text{ст}} - t_p) = 8,44 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 4 (170 - 30) = \\ = 1484 \text{ Вт};$$

6.3.9. Визначити теплообмін випромінюванням між двома великими паралельно розташованими поверхнями з температурами $t_1 = 527^\circ \text{ С}$ і $t_2 = 127^\circ \text{ С}$. Коефіцієнт випромінювання першої поверхні $c_1 = 5,1$, другої $c_2 = 4,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Втрату теплоти боковими поверхнями не враховувати. Як зміниться теплообмін, якщо за тих самих умов коефіцієнт випромінювання другої поверхні $c_2 = 0,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ [6] ?

Розв'язання

Теплове випромінювання, що отримує друга пластина

$$q = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $c_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання.

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 - 1/c_0},$$

де $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{1/5,1 + 1/4,2 - 1/5,67} = 3,88 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Тоді

$$q = 3,88 \left[\left(\frac{273 + 527}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 127}{100} \right)^4 \right] = 14900 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Теплообмін випромінюванням за умови, що $c_2 = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$:

$$q = \frac{1}{1/5,1 + 1/0,4 - 1/5,67} \left[\left(\frac{800}{100} \right)^4 - \left(\frac{400}{100} \right)^4 \right] = 1524 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Розрахунок показує, що заміна однієї поверхні полірованим матеріалом веде до зменшення теплообміну випромінюванням майже в 10 разів.

6.3.10. Визначити втрату теплоти шляхом випромінювання з поверхні сталевий окисленої труби діаметром $d = 100$ мм і довжиною $l = 3$ м при температурі поверхні $t_1 = 227^\circ \text{С}$, якщо ця труба знаходиться: а) у великому цегляному приміщенні, температура стінок якого $t_2 = 27^\circ \text{С}$; б) в цегляному каналі, площа перерізу якого становить $0,3 \times 0,3$ м при температурі стінок $t_2 = 27^\circ \text{С}$ [6].

Розв'язання

Тепловий потік випромінювання з поверхні труби на поверхню стінок, що її охоплює

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений степінь чорноти системи,

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

де F_1 і F_2 — площі поверхонь труби та стінок; ε_1 і ε_2 — степені чорноти цих поверхонь.

За умови а): $F_1 \ll F_2$, тобто в цьому випадку $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1$.

для окисленої сталі $\varepsilon_1 = 0,79$.

Площа $F_1 = \pi dl = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 3 = 0,942 \text{ м}^2$.

Тоді

$$Q_{1-2} = 0,79 \cdot 5,67 \cdot 0,942 \left[\left(\frac{273 + 227}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 27}{100} \right)^4 \right] = 2295 \text{ Вт.}$$

За умови б):

для цегляної кладки $\varepsilon_2 = 0,93$.

Площа $F_2 = \Pi l$, де Π — периметр поперечного перерізу каналу;

$$F_2 = 0,3 \cdot 4 \cdot 3 = 3,6 \text{ м}^2.$$

Тоді

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{0,79} + \frac{0,942}{3,6} \left(\frac{1}{0,93} - 1 \right)} = 0,778;$$

$$Q_{1-2} = 0,778 \cdot 5,67 \cdot 0,942 \left[\left(\frac{273 + 227}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 27}{100} \right)^4 \right] = 2260 \text{ Вт.}$$

6.3.11. Між двома поверхнями, температури яких $T_1 = 600 \text{ К}$ та $T_2 = 300 \text{ К}$, встановлено екран. Коефіцієнти випромінювання поверхонь $c_1 = c_2 = 4,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Визначити теплообмін випромінюванням до та після встановлення екрану, а також температуру екрану [6].

Розв'язання

Теплообмін між поверхнями до встановлення екрану

$$q = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 - 1/c_0} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= \frac{1}{1/4,8 + 1/4,8 - 1/5,67} \left[\left(\frac{600}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right] = 5056 \text{ Вт/м}^2.$$

Теплообмін після встановлення екрану за даних умов

$$q_E = 0,5q = 0,5 \cdot 5056 = 2528 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура екрану

$$\left(\frac{T_E}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{600}{100} \right)^4 + \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right] = 688.$$

Звідси $T_E = 512 \text{ К}$.

Умови задачі № 6 відповідно до варіанту.

Задача 6.1. Плоску поверхню потрібно ізолювати так, щоб втрата тепла з одиниці поверхні за одиницю часу не перевищувала q , Вт/м². Температура поверхні під ізоляцією $t_{\text{ст}1}$, °С, на зовнішній поверхні ізоляції $t_{\text{ст}2}$, °С.

Визначити товщину ізоляції, якщо її середній коефіцієнт теплопровідності складає λ , Вт/м · °С.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до задачі 6.1

Варіант	q , Вт/м ²	$t_{\text{ст}1}$, °С	$t_{\text{ст}2}$, °С	λ , Вт/м · °С
1	450	450	30	0,0901
2	500	470	50	0,046
3	600	300	25	0,087
4	550	500	40	0,103
5	650	600	60	0,120
6	700	150	13	0,144
7	540	750	50	0,081
8	470	350	40	0,081
9	680	400	30	0,080
10	750	600	50	0,113

Задача 6.2. Стінка неекранованої топкової камери виконана з шару вогнетривкого матеріалу товщиною δ_1 , мм із середнім коефіцієнтом теплопровідності λ_1 , Вт/м · °С та шару червоної цегли товщиною $\delta_2 = 500$ мм, коефіцієнт теплопровідності якої $\lambda_2 = 0,7$ Вт/м · °С. Шари щільно прилягають

один до одного. Температура на внутрішній поверхні топкової камери $t_{ст1}$, °C, на зовнішній поверхні стінки $t_{ст2} = 50$ °C.

Визначити теплові втрати через 1 м² стінки топкової камери та температуру в площині контактування шарів, йдучи від температури $t_{ст1}$ та від температури $t_{ст2}$.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані до задачі 6.2

Варіант	$t_{ст1}$, °C	δ_1 , мм	λ_1 , Вт/м · °C
1	1300	100	0,845
2	1700	300	0,921
3	1600	200	0,822
4	1400	150	0,863
5	1650	300	4,672
6	1200	150	0,287
7	1540	300	0,935
8	1450	150	0,851
9	1680	300	4,681
10	1350	125	0,297

Задача 6.3. Змійовики пароперегрівача виконані з труб жаротривкої сталі діаметром d_1/d_2 , мм з коефіцієнтом теплопровідності λ , Вт/м·°C. Температура зовнішньої поверхні труби $t_{ст2}$, °C, внутрішньої поверхні $t_{ст1}$, °C.

Визначити питомий тепловий потік через стінку на одиницю довжини труби.

Таблиця 6.3 – Вихідні дані до задачі 6.3

Варіант	d_1/d_2 , мм	$t_{ст1}$, °C	$t_{ст2}$, °C	λ , Вт/м · °C
1	32/40	430	600	22,0
2	38/50	480	650	23,8
3	43/53	525	620	23,5
4	40/56	440	550	20,2
5	46/57	460	630	22,3
6	59/60	450	560	21,6
7	47/56	550	700	25,5
8	45/57	540	680	26,2
9	40/51	510	640	21,4
10	42/54	450	600	22,7

Задача 6.4. Для теплової ізоляції сталевого паропроводу діаметром d_1/d_2 , мм використовується матеріал з коефіцієнтом теплопровідності λ_2 , Вт/м · °С. Якою повинна бути товщина ізоляційного шару для підтримки на його зовнішній поверхні температури $t_{ст2}$, °С, якщо температура внутрішньої поверхні стінки паропроводу $t_{ст1}$, °С, а коефіцієнт теплопровідності сталі λ_1 ? Якою в цьому разі буде температура на зовнішній поверхні паропроводу $t'_{ст1}$? Температуру знайти за двома напрямками.

Вказівка. Зважаючи на дуже мале падіння температури в стінці з вуглецевої сталі товщиною 4 ... 6 мм, слід у першому наближенні прийняти падіння температури в стінці паропроводу на рівні 0,1°С. За цією величиною підрахувати питомий лінійний тепловий потік через стінку паропроводу. Величина цього теплового потоку однакова для усіх шарів, тому, маючи величину q_l , можна розрахувати необхідний зовнішній діаметр ізоляційного шару $d_{із}$ та уточнити значення q_l . Після цього уточнюємо температуру на зовнішній поверхні паропроводу, йдучи від температури на його внутрішній поверхні та від температури на зовнішній поверхні ізоляції. Товщина ізоляційного шару

$$\delta_{із} = \frac{d_{із} - d_2}{2}.$$

Таблиця 6.4 – Вихідні дані до задачі 6.4

Варіант	d_1/d_2 , мм	$t_{ст1}$, °С	$t_{ст2}$, °С	λ_2 , Вт/м · °С	λ_1 , Вт/м · °С
1	142/152	170	50	0,135	46
2	150/159	180	46	0,148	45
3	156/168	193	35	0,1624	44
4	170/180	215	40	0,122	41
5	138/146	130	55	0,146	48
6	132/140	160	45	0,195	47
7	140/152	175	57	0,1628	46
8	118/127	180	42	0,132	45
9	104/121	135	51	0,163	47
10	102/114	132	46	0,147	50

Умови задачі № 7 відповідно до варіанту.

Задача 7.1. По трубі водонагрівача із внутрішнім діаметром d , мм і довжиною L , м із швидкістю w , м/с протікає вода. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі, якщо середня температура води $t_{p,ср}$, °С, а температура стінки $t_{ст}$, °С.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані до задачі 7.1

Варіант	d , мм	L , м	w , м/с	$t_{p.c.p.}$, °C	$t_{ст.}$, °C
1	45	4,5	0,5	55	80
2	50	4,7	0,7	40	85
3	60	3,0	0,75	45	75
4	55	5,0	0,9	38	70
5	65	6,0	0,6	35	65
6	70	5,5	1,0	30	73
7	54	3,5	0,9	25	64
8	47	3,0	0,4	32	72
9	68	4,0	0,5	43	78
10	75	6,0	0,65	34	68

Задача 7.2. Повітря, стиснене в компресорі, транспортується по трубопроводу із внутрішнім діаметром d , мм, середня швидкість повітряного потоку w , м/с. Розрахувати значення середнього коефіцієнта тепловіддачі на ділянці трубопроводу довжиною L , м, якщо середня за довжиною ділянки труби температура повітря $t_{p.c.p.}$, °C.

Таблиця 7.2 – Вихідні дані до задачі 7.2

Варіант	d , мм	L , м	w , м/с	$t_{p.c.p.}$, °C
1	300	45	5	125
2	350	47	7	120
3	400	30	7,5	90
4	450	50	9	85
5	365	60	6	110
6	420	55	10	80
7	340	35	8	100
8	470	30	6,5	95
9	360	40	6,8	130
10	275	60	5,3	140

Задача 7.3. Газ із магістральної компресорної станції спрямовується в трубопровід із зовнішнім діаметром d , мм. Визначити кількість тепла, що відводиться з поверхні трубопроводу на ділянці довжиною L , м, якщо середня за довжиною ділянки температура на поверхні труби $t_{ст.c.p.}$, °C, а температура зовнішнього середовища (повітря) t_p , °C.

Таблиця 7.3 – Вихідні дані до задачі 7.3

Варіант	d , мм	L , м	$t_{\text{ст.ср}}$, °C	t_p , °C
1	273	145	85	25
2	299	247	77	20
3	325	130	90	19
4	351	250	70	18
5	377	360	60	10
6	402	255	75	15
7	426	335	55	9
8	450	230	78	25
9	351	340	68	12
10	299	260	82	14

Умови задачі № 8 відповідно до варіанту.

Задача 8.1. Обмурівка топкової камери парового котла виконана з вогнетривкої цегли зі степенем чорноти ε_1 , а зовнішня обшивка – з листової сталі. Відстань між обшивкою та цегляною кладкою становить 30 мм і її можна вважати малою в порівнянні з розмірами стін топки.

Розрахувати втрати тепла в оточуюче середовище з одиниці поверхні за одиницю часу в умовах стаціонарного режиму за рахунок променевого теплообміну між поверхнями обмурівки та обшивки. Температура зовнішньої поверхні обмурівки t_1 , °C, а температура сталеві обшивки t_2 , °C.

Таблиця 8.1 – Вихідні дані до задачі 8.1

Варіант	ε_1	t_1 , °C	t_2 , °C
1	0,8	130	55
2	0,85	137	50
3	0,75	140	57
4	0,82	142	60
5	0,78	134	54
6	0,84	129	51
7	0,79	135	49
8	0,81	146	47
9	0,77	143	45
10	0,75	127	40

Задача 8.2. Зовнішній діаметр вихідного колектора пароперегрівача високого тиску d , мм, його поверхня має температуру $t_{\text{ст}}$, °C і ступінь чорноти $\varepsilon_{\text{ст}}$.

Розрахувати теплові втрати з 1 погонного метра неізолюваного колектора шляхом променевого теплообміну, якщо температура внутрішньої поверхні огороження $t_{ог}$, а її степінь чорноти $\epsilon_{ог}$. Загальна площа внутрішньої поверхні огороження $F_{ог}$ перевищує площу зовнішньої поверхні колектора $F_{ст}$ у k -разів.

Таблиця 8.2 – Вихідні дані до задачі 8.2

Варіант	d , мм	$t_{ст}$, °C	$\epsilon_{ст}$	$t_{ог}$, °C	$\epsilon_{ог}$	k
1	273	580	0,78	28	0,93	10
2	299	485	0,77	30	0,92	7
3	325	550	0,75	32	0,91	8
4	351	600	0,79	29	0,95	9
5	377	565	0,8	35	0,94	6
6	402	470	0,81	36	0,89	5,5
7	426	520	0,82	38	0,93	6,5
8	450	500	0,81	34	0,92	7
9	351	490	0,80	30	0,91	8,0
10	299	530	0,79	29	0,93	9,0

Задача 8.3. Між двома поверхнями, температури яких t_1 , °C і t_2 , °C, встановлено екран. Степені чорноти поверхонь однакові і дорівнюють ϵ . Визначити теплообмін випромінюванням між поверхнями до та після встановлення екрану, а також температуру екрану.

Таблиця 8.3 – Вихідні дані до задачі 8.3

Варіант	t_1 , °C	t_2 , °C	ϵ
1	480	28	0,73
2	385	30	0,72
3	450	32	0,71
4	500	39	0,75
5	465	35	0,84
6	370	36	0,80
7	420	38	0,83
8	400	44	0,81
9	390	40	0,78
10	430	29	0,79

Контрольні запитання

1. Яка фізична сутність процесу теплопровідності?

2. Що називається температурним полем та основні його види?
3. Дайте визначення градієнта температури.
4. Що являють собою тепловий потік та густина теплового потоку?
5. Сформулюйте закон Фур'є та наведіть його математичний вираз.
6. Що являє собою коефіцієнт теплопровідності речовини та від чого залежить його значення?
7. Як визначається густина теплового потоку для однорідної плоскої стінки?
8. Дайте визначення теплової провідності стінки та її термічного опору.
9. Як змінюється температура в однорідній плоскій стінці зі сталим коефіцієнтом теплопровідності?
10. За якою формулою визначається густина теплового потоку в багатшаровій плоскій стінці?
11. Яка формула лежить в основі розрахунку температури в місцях контактування шарів у багатшаровій плоскій стінці?
12. Як визначається тепловий потік, що проходить через однорідну циліндричну стінку?
13. Що являє собою лінійна густина теплового потоку, що проходить через однорідну циліндричну стінку?
14. Як розраховують лінійну густину теплового потоку в багатшаровій циліндричній стінці?
15. За якими формулами розраховують температури в місцях контактування шарів у багатшаровій циліндричній стінці?
16. У чому полягає сутність конвективного теплообміну?
17. Сформулюйте та наведіть математичний вираз закону Ньютона-Ріхмана.
18. Дайте визначення коефіцієнта тепловіддачі та назвіть його одиницю виміру.
19. Як пов'язаний процес тепловіддачі з режимом руху рідини?
20. У чому полягає сутність променевого теплообміну?
21. Що являють собою інтегральний потік випромінювання та його густина? Назвіть одиниці їх виміру.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

ПРОЦЕСИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ

Мета роботи: опанувати особливості складного виду теплообміну; знайомитися з методами інтенсифікації та гальмування процесів теплопередачі.

В результаті опанування практичної роботи буде сформований наступний **результат навчання:** знати методи інтенсифікації та гальмування процесів теплопередачі в технічних системах.

7.1 Теоретична частина

Теплопередача через одношарову плоску стінку

$$q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{p1} - t_{p2}),$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К).

Для теплопередачі через одношарову плоску стінку

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Теплопередача через багатошарову плоску стінку. Для n - шарової стінки

$$q = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{p1} - t_{p2}),$$
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Теплопередача через одношарову циліндричну стінку. Для n - шарової циліндричної стінки

$$Q = \frac{\pi l(t_{p1} - t_{p2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}.$$

Інтенсифікація теплопередачі. Площа зовнішньої поверхні теплообміну на кроці оребрення

$$F_{\text{ор}} = \pi D \delta + \pi d_3 (t - \delta) + 2\pi \left(\frac{D^2 - d_3^2}{4} \right) = \pi \left[D \delta + d_3 (t - \delta) + \frac{D^2 - d_3^2}{2} \right].$$

Площа зовнішньої поверхні неоребреної (гладкої) труби довжиною t

$$F_{\text{неор}} = \pi d_3 t.$$

Відмінність площ оребреної і неоребреної труб враховується коефіцієнтом оребрення

$$\varphi_{\text{ор}} = \frac{F_{\text{ор}}}{F_{\text{неор}}}.$$

Якщо за поверхню теплообміну приймається неоребрена (гладка) зовнішня поверхня труби, то коефіцієнт теплопередачі, віднесений до цієї поверхні, буде визначатися за формулою

$$k_{d_3} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_3}{d_{\text{в}}} + \frac{d_3}{2\lambda} \ln \frac{d_3}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\varphi_{\text{ор}} \eta_{\text{р}} \alpha_2}},$$

де $\eta_{\text{р}}$ – коефіцієнт ефективності ребра, який враховує зміну температури за висотою ребра та відмінність коефіцієнта тепловіддачі на торцях, впадинах та бокових поверхнях ребер.

7.2 Практична частина

7.2.1. Приклади розв'язування типових задач

7.2.1.1. З'ясувати вплив коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 на величину коефіцієнта теплопередачі k [4].

Розв'язання

Запишемо формулу коефіцієнта теплопередачі через плоску стінку при допущенні, що термічний опір теплопровідності стінки дуже малий

$$R_{t,\lambda} = \delta / \lambda \rightarrow 0:$$

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_2}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}},$$

де k^* – коефіцієнт теплопередачі, розрахований при допущенні $R_{t,\lambda} \rightarrow 0$.

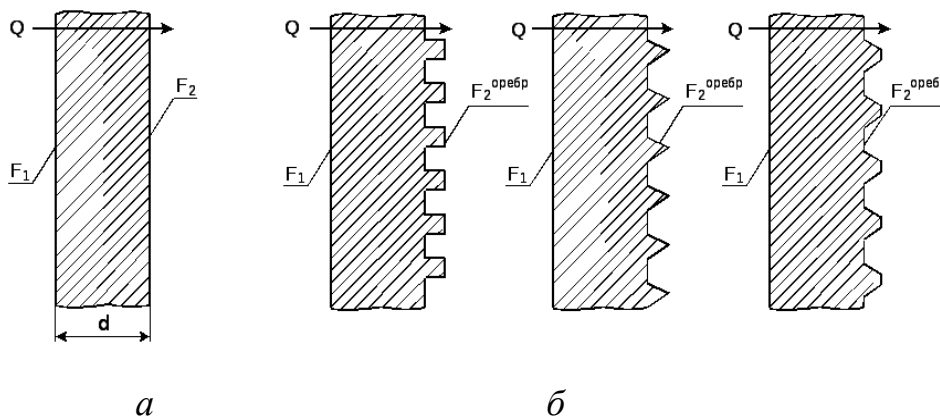


Рисунок 7.3.1 – Конструктивний спосіб інтенсифікації теплопередачі за рахунок оребрення поверхні:

а) плоска стінка ($F_1 = F_2$) б) оребрена стінка ($\alpha_2 < \alpha_1$; $F_2^{\text{оробр}} > F_1$)

Розглянемо два крайні випадки співвідношення коефіцієнтів тепловіддачі:

а) якщо $\alpha_2 \gg \alpha_1$, (хай $\alpha_2 \rightarrow \infty$), то в цьому випадку з останньої формули виходить, що $k^* \rightarrow \alpha_1$;

б) якщо $\alpha_1 \gg \alpha_2$, (хай $\alpha_1 \rightarrow \infty$), то в цьому випадку $k^* \rightarrow \alpha_2$.

Таким чином, коефіцієнт теплопередачі не може бути більше меншого з коефіцієнтів тепловіддачі, тобто $k^* \leq \min(\alpha_1, \alpha_2)$.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що для збільшення коефіцієнта теплопередачі необхідно збільшувати менший коефіцієнт тепловіддачі за рахунок зміни режиму руху теплоносія.

7.2.1.2 Визначити коефіцієнт теплопередачі у вертикальному трубчастому теплообміннику, призначеному для нагрівання 30 т/год води від 20 °С до 95 °С. Швидкість води в трубах (латунь) діаметрами 14/12 мм та висотою 2,45 м дорівнює 1,5 м/с. Труби обігріваються сухою насиченою парою за тиску 0,128 МПа. Визначити витрату пари. Врахувати, що поверхня нагріву теплообмінника складає 19,38 м² [4].

Розв'язання

Для температури $\bar{t}_e = 0,5(t'_e + t''_e) = 0,5(20 + 95) = 57,5$.

Теплофізичні характеристики води для середньої температури:

$\rho = 984 \text{ кг/м}^3$; $c_{pe} = 4,187 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\lambda = 0,665 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\nu_e = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $Pr_B = 3,12$.

Секундна витрата води

$$G_e = \frac{30}{3,6} = 8,333 \text{ кг/с.}$$

Теплова потужність теплообмінника

$$Q = G_e \cdot c_{pe} (t''_e - t'_e) = 8,333 \cdot 4,187 \cdot (95 - 20) = 2620 \text{ кВт.}$$

Параметри пари на лінії насичення:

$t_n = 107 \text{ °С}$; $h'' = 2685 \text{ кДж/кг}$; $r = 2238 \text{ кДж/кг}$; $h' = 447 \text{ кДж/кг}$.

Витрата пари, що гріє

$$G_n = \frac{Q}{h'' - h'} = \frac{2620}{2685 - 447} = 1,17 \text{ кг/с.}$$

Для температури $t_n = 107^\circ\text{C}$ визначаємо: $A = 57,6 \text{ 1/м; } B = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/Вт.}$

Температуру зовнішньої стінки труби в першому наближенні беремо рівною $t_{3н} = 85^\circ\text{C}$. значення критерію Прандтля $Pr_p = 1,7$.

Різниця температур в процесі конденсації пари

$$\Delta t_k = t_n - t_{3н} = 107 - 85 = 22^\circ\text{C.}$$

Приведена висота труб

$$z = \Delta t_k \cdot h \cdot A = 22 \cdot 2,45 \cdot 57,6 = 3104,6$$

Оскільки $z > z_{кр} = 2300$, то рух конденсату змішаний і

$$\begin{aligned} Re &= 1600 \cdot \left[1 + 0,625 \cdot Pr^{0,5} \left(\frac{z}{2300} - 1 \right) \right]^{\frac{3}{4}} = \\ &= 1600 \cdot \left[1 + 0,625 \cdot 1,7^{0,5} \left(\frac{3104,6}{2300} - 1 \right) \right]^{\frac{3}{4}} = 2235,22. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі в процесі конденсації пари

$$\alpha_k = \frac{Re}{h \cdot B \cdot \Delta t_k} = \frac{2235,22}{2,45 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 22} = 6190 \text{ Вт/(м}^2\text{·K).}$$

Критерій Рейнольдса для потоку води в трубах

$$Re = \frac{w_\epsilon \cdot d_\epsilon}{\nu_\epsilon} = \frac{1,5 \cdot 0,012}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 3,6 \cdot 10^4.$$

Температуру внутрішньої стінки труби в першому наближенні беремо рівною $83,6^\circ\text{C}$. Критерій Прандтля для цієї температури $Pr_{ст} = 2$.

Критерій Нуссельта

$$\begin{aligned} Nu &= 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} (Pr_p / Pr_{ст})^{0,25} \cdot \epsilon_l = \\ &= 0,023 (3,6 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 3,12^{0,43} (3,12/2)^{0,25} \cdot 1 = 169,2. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки труби до води,

$$\alpha_\epsilon = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_\epsilon} = \frac{169,2 \cdot 0,0665}{0,012} = 9376 \text{ Вт/(м}^2\text{·K).}$$

Коефіцієнт теплопровідності латуні: $\lambda_n = 104 \text{ Вт/(м·K).}$

Оскільки відношення діаметрів $d_3/d_B = 14/12 = 1,166 < 1,2$, то коефіцієнт теплопередачі можна визначати як для плоскої стінки, тобто, $\text{Вт/(м}^2\text{·K)}$

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_{1\epsilon}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{6190} + \frac{10^{-3}}{104} + \frac{1}{9356} \right)^{-1} = 3599.$$

Питомий тепловий потік

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{2620}{19,38} = 135,2 \text{ кВт/м}^2.$$

Перевіряємо обрані температури стінок труби

$$t_{zn} = t_n - \frac{q}{\alpha_k} = 107 - \frac{135,2 \cdot 10^3}{6190} = 85,15 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{en} = t_{zn} - q \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} = 85,15 - 135,2 \cdot 10^3 \frac{0,001}{104} = 83,86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки розбіжність між вибраними і розрахунковими значеннями температур не перевищує 1%, уточнювати розрахунки не потрібно.

Контрольні запитання

1. Що являє собою складний теплообмін та як його розраховують?
2. Який теплообмінний процес називається теплопередачею?
3. Сукупна дія яких частинних явищ складає процес теплопередачі?
4. Як розподіляється температура в процесі теплопередачі?
5. Що визначають за рівнянням теплопередачі та який воно має вигляд?
6. Що являє собою коефіцієнт теплопередачі та яка його одиниця виміру?
7. Як визначають густину теплового потоку теплопередачі через плоску стінку?
8. Як розраховують коефіцієнт теплопередачі для однорідної плоскої стінки?
9. Із яких частинних термічних опорів складається загальний термічний опір теплопередачі? Яка одиниця виміру термічного опору?
10. Як встановлюються температури на поверхнях плоскої стінки, що розділяє потоки при теплопередачі?
11. Як розраховують коефіцієнт теплопередачі та густину теплового потоку для багатшарової плоскої стінки?
12. Як визначається величина загального термічного опору багатшарової плоскої стінки?
13. Як розраховують температури в багатшаровій плоскій стінці на поверхнях контактування окремих шарів?
14. Чому дорівнює лінійний коефіцієнт теплопередачі та загальний лінійний термічний опір однорідної циліндричної стінки?
15. Як знаходиться лінійна густина теплового потоку в однорідній циліндричній стінці?
16. За якою формулою розраховують лінійний коефіцієнт теплопередачі та загальний лінійний термічний опір багатшарової циліндричної стінки?
17. Як розраховують лінійну густину теплового потоку в багатшаровій циліндричній стінці?
18. Як визначають температури поверхонь циліндричної стінки при теплопередачі?
19. Наведіть методи інтенсифікації процесу теплопередачі.
20. З якою метою використовують ребра на поверхні стінки, що розділяє потоки робочих рідин при теплопередачі?
21. На якій поверхні стінки, що розділяє потоки робочих рідин при теплопередачі, встановлюють ребра?

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

За індивідуальним завданням здобувач вищої освіти отримує 10 запитань з переліку контрольних запитань. Кількість вірних відповідей визначають кількість отриманих балів, 1 індивідуальне завдання (всього 8) оцінюється у 5 балів (разом 40 балів), причому:

- **5 балів** – відповідність еталону;
- **4 бали** – відповідність еталону з незначними помилками;
- **3 бали** – часткова відповідність еталону, питання повністю не розкриті;
- **2 бали** – невідповідність еталону, але відповідність темі запитання;
- **1 бал** – відповідь повністю не відповідає еталону;
- **0 балів** – відповідь не наведено.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Розрахунок теплонасосної установки гарячого водопостачання [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання індивідуального завдання з дисципліни «Установки для кондиціювання повітря шахт» для здобувачів ступеня бакалавра освітньо-професійної програми «Енергомеханічні комплекси гірничих підприємств» зі спеціальності 184 Гірництво / уклад.: О.П. Трофимова, Ю.О. Комісаров ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 51 с.
2. Фелоненко С.В. Практикум з термодинаміки : навч. посіб. / С.В Фелоненко, І.С. Ільїна, О.П. Трофимова, Ю.О Комісаров, О.О. Бобришов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 221 с.
3. Алексахін О. О. Теплообмінні апарати в системах тепlopостачання : навч. посібник / О. О. Алексахін, А. М. Ганжа, О. В. Круглякова ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Друкарня Мадрид, 2023. – 249 с.
4. Тепломасообмін. Методи інтенсифікації : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / О. Ю. Співак., Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 112 с.
5. Омельченко О. В. Тепломасообмін : навч. посібник / О. В. Омельченко, Л. О. Цвіркун. – Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. – 100 с.
6. Холоменюк М.В. Термодинаміка: навч. посіб. / М.В. Холоменюк; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 106 с.

Навчальне видання

Ширін Леонід Никифорович
Трофимова Олена Павлівна
Комісаров Юрій Олексійович

ТЕРМОДИНАМІКА ТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня бакалавра
освітньо-професійної програми
«Нафтогазова інженерія та технології»
зі спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.
Підписано до видання 18.02.2025. Авт. арк. 6,4.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.