

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
спеціалізації «Новітні технології та дизайн сучасних стінових
та оздоблювальних матеріалів»

Київ 2023

УДК 66.041.001.24(075)

ТЗ4

Укладачі: В.В. Троян д-р техн. наук, професор;
В.П. Азутов, канд. техн. наук, доцент
В.В. Смешко, зав. лабораторії

Рецензент О.П. Константиновський, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск В.І. Гоц, д-р техн. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри технології будівельних
конструкцій і виробів, протокол № 9 від 9 червня 2022 року.*

В авторській редакції.

Теплові процеси та теплотехнічне обладнання хімічних
ТЗ4 підприємств: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт /
уклад.: В.В. Троян та ін. – Київ: КНУБА, 2023. – 28 с.

Містять загальні положення, завдання та послідовність виконання лабораторних робіт щодо визначення параметрів теплових і массообмінних процесів в установках для теплової обробки будівельних матеріалів та виробів, що мають місце у теплотехнічних агрегатах технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів.

Призначено для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» спеціалізації «Новітні технології та дизайн сучасних стінових та оздоблювальних матеріалів».

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Мета видання – підготовка студентів до виконання лабораторних робіт з курсу «Теплові процеси та теплотехнічне обладнання хімічних підприємств».

У процесі виконання лабораторних робіт студенти знайомляться з установками і приладами, призначеними для дослідження фізичної суті теплових і масообмінних процесів, принципами керування тепловими процесами в установках для теплової обробки матеріалів і конструкцій.

Лабораторні роботи виконують бригади з 4 - 6 студентів; під час підготовки до них студенти мають вивчити теоретичний матеріал.

Звіт щодо кожної роботи, які студенти оформляють індивідуально, містить методику проведення і результати досліджень, зведені в таблиці і показані на графіках.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Методи вимірювання температури

Мета роботи: ознайомитися з найпоширенішими в теплоенергетиці методами вимірювання температури.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання фізичних основ контактних і безконтактних методів вимірювання температури різних діапазонів та вміння підбирати і використовувати прилади для вимірювання температур.

Обладнання та матеріали: моделі датчиків і зразки приладів для вимірювання температури: термопара, термометри опору, оптичний пірометр та ін. з наявності в лабораторії кафедри.

Звіт про роботу

1. Ознайомитися з приладами вимірювання температури, які додаються до лабораторної роботи (ртутний термометр, спиртовий термометр, термопара, термометр опору, пірометр, термометр на рідких кристалах).

2. Зарисувати (або вклеїти у звіт) схему термометра та зробити його опис, відмітивши:

- а) фізичний принцип роботи термометра;
- б) до якої групи термометр відноситься;
- в) яка шкала вимірювання, застосована в даному термометрі;
- г) рівномірність шкали вимірювання;
- д) межі вимірювання температури;
- ж) рекомендації до застосування.

3. Дати відповіді на контрольні запитання:

а) Які фізичні явища використовуються в термометрах?
б) У чому перевага безконтактних методів вимірювання температури над контактними?

в) Чому у ртутних термометрах покази температури після вимірювання зберігаються, а в спиртових ні?

г) Чому ртутні термометри використовують тільки для вимірювання позитивних температур?

д) Як вимірюють наднизькі температури?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Градуювання термоелектричного датчика температури

Мета роботи: ознайомитися з будовою та принципом дії термоелектричних датчиків вимірювання температури, навчитися градувати термопару.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання фізичних основ роботи термоелектричного датчика температури та компенсаційного метода вимірювання термо-е.р.с. і вміння підбирати матеріали для термопар, градувати термоелектричний датчик.

Обладнання і матеріали: хромель-копельова термопара, установка для градування термопари.

Таблиця 2.1

Градуювання термопар

Температура гарячого спая в °С	Термо-е.р.с. термопар в мВ за температури в °С для градування					
	ПП-1	ПР30/6	ХА	ХК	З	М
0	0	0	0	0	0	0
100	0,643	-	4,10	6,95	5,15	4,16
200	1,436	-	8,13	14,66	10,60	8,87
300	2,314	0,456	12,21	22,91	16,25	14,13
400	3,249	0,812	16,46	31,49	21,90	20,04
500	4,218	1,268	20,65	40,16	24,60	26,19
600	5,220	1,821	24,91	49,02	30,35	-
700	6,256	2,467	25,15	57,77	39,30	-
800	7,325	3,201	33,32	66,42	45,50	-
900	8,428	4,019	37,37	-	-	-
1000	9,564	4,913	41,32	-	-	-
1100	10,732	5,876	45,16	-	-	-
1200	11,923	6,902	48,87	-	-	-
1300	13,129	7,982	52,43	-	-	-
1400	14,398	9,109	-	-	-	-
1500	15,597	10,274	-	-	-	-
1600	16,714	11,471	-	-	-	-
1800	-	13,927	-	-	-	-

Звіт про роботу

За результатами вимірювання за допомогою термопар навести дані про температури при нагріванні та охолодженні електропечі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тарування електричного термометра опору

Мета роботи: ознайомлення з будовою пристроїв для вимірювання температур, методикою користування цими пристроями та придбання досвіду тарування (градування) електричного термометра опору.

У процесі виконання роботи необхідно набути такі знання: фізичні основи роботи електричних термометрів опору їх будову; принцип дії та галузі застосування і вміння градуювати електричний термометр опору.

Обладнання, матеріали та інструменти: вимірювальний міст, електрична плитка, посуд з водою, ртутний термометр, електричний термометр опору.

Послідовність виконання роботи

1. Уважно прочитати інструкцію до вимірювального міста.
2. Увімкнути вимірювальний міст через випрямляч у мережу 220 В.
3. Згідно з інструкцією провести установку «нуля» на гальванометрі.
4. Установити перемикач меж вимірювання в положення «1000».
5. Заповнити холодною водою ємність лабораторної електроплитки і виміряти ртутним термометром її температуру.
6. Встановити перемикач гальванометра у положення «грубо» і ручкою реохорда зрівноважити міст.
7. Зняти покази опору терморезистора зі шкали реохорда вимірювального моста, помноживши їх на 1000. Дані щодо температури води та опору досліджуваного терморезистора занести до табл. 3.3 як початкові.
8. Увімкнути електричну плитку і нагріваючи воду до 70 - 80 °С, через кожні 5 °С знімати покази величини опору терморезистора по шкалі колового реохорда вимірювального моста. Дані вимірювань занести до таблиці.
9. Вимкнути електричну плитку від мережі за температури 70 або 80 °С. Зняти наступні покази при автоматичному підвищенні температури на декілька градусів до її максимального значення.
10. Повторити виміри зміни опору терморезистора при його охолодженні до 20 - 30 °С.

11.3 метою отримання коректних результатів примусове охолодження гарячої води шляхом додавання у ємність невеликої порції холодної води починати з 60 °С.

12. Результати всіх вимірів занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати вимірів

№ пор.	Нагрівання		№ пор.	Охолодження	
	<i>t, °C</i>	<i>R, Ом</i>		<i>t, °C</i>	<i>R, Ом</i>

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Вивчення теплопровідності багат шарової плоскої стінки

Мета роботи: навчитися дослідним шляхом визначати коефіцієнти теплопровідності різних матеріалів.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання закону Фур'є та методики складання рівняння теплового балансу для розрахунку теплопровідності плоскої багат шарової стінки і вміння проводити розрахунки коефіцієнтів теплопровідності та термічного опору різних стінок.:

Обладнання і матеріали: установка для визначення теплопровідності різних матеріалів, секундомір або ручний годинник.

Схему установки, яка призначена для визначення теплопровідності стінки, показано на рис. 4.1. У металічному корпусі 1 установки, покритій всередині азбестовою ізоляцією 2, поміщено електричний нагрівач 6, за допомогою якого створюється нагрівання дисків з алюмінію 5 і бетону 4. Вимірювання температури перед кожним диском і після нього здійснюють за допомогою термопар 3.

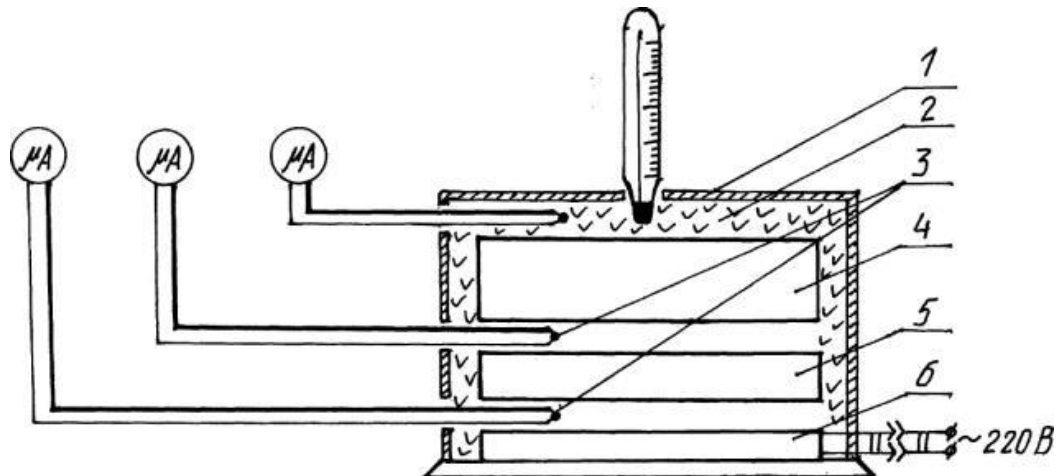


Рис. 4.1. Схема установки для визначення теплопровідності матеріалів стінки:

1 – корпус; 2 – ізоляція; 3 – термопари; 4,5 – диски (алюміній, бетон)

6 – електронагрівач

Послідовність виконання роботи

1. Увімкнути установку в електричну мережу і виставити за вказівкою викладача положення терморегулятора на цифрах 1...5.

2. Прогріти установку до стаціонарного режиму протягом часу $\eta 1$, вказаного викладачем (стрілки мікроамперметрів, до яких під'єднанні термопари, мають показувати сталу температуру, яка не буде змінюватися у часі).

3. Зняти покази на мікроамперметрах $n1, n2, n3$ і визначити температури на зовнішніх поверхнях стінки $t1=n1A1; t3=n3A3$ та на границі дотику алюмінієвого диска з бетонним $t2= n2A2$ ($A1, A2, A3$ – ціна поділки кожного мікроамперметра, яка вказана біля корпусу приладів).

4. Визначити тепловий потік, який виділяється нагрівачем установки із співвідношення, що $Q_n = N$, де N – потужність нагрівача, значення якої вказано на панелі установки.

5. За формулою визначити теплові втрати (тепловий потік тепловіддачі) установки у навколишнє середовище Q_α . Значення коефіцієнта тепловіддачі жерстяного корпусу експериментальної установки α та його площа S_κ наведено на панелі установки у $см^2$. Під час розрахунків площу корпусу обов'язково необхідно переводити у $м^2$. Значення часу тривалості досліду у формулу не підставляють, оскільки він виключається з лівої та правої частини рівняння теплового балансу, наведеного нижче.

6. Визначити тепловий потік, який проходить крізь алюмінієвий та бетонний диски (багатошарову стінку), за формулою $Q_\lambda = Q_n - Q_\alpha$.

7. Визначити коефіцієнт теплопровідності кожного шару стінки з рівняння теплопровідності одношарової плоскої стінки:

а) алюмінієвої:

$$Q_{Al} = \lambda_{Al} / \delta_{Al} (t1 - t2) S_{cm};$$

б) бетонної:

$$Q_{бет.} = \lambda_{бет.} / \delta_{бет.} (t2 - t3) S_{cm}.$$

8. Визначити значення термічного опору кожного шару стінки за формулою:

$$R = \delta / \lambda.$$

9. Усі отримані виміри та розрахунки занести до табл. 4.1.

10. Виконати прогрів установки до η_2 , вказаного викладачем, і повторить п.п. 3 - 9.

Таблиця 4.1

№ пор.	$\delta_{Al}, \text{м}$	$\delta_{бет}, \text{м}$	$\lambda_{Al}, \text{Вт/(мК)}$	$\lambda_{бет}, \text{Вт/(мК)}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{м}^2\text{К/Вт}$	$R_2, \text{м}^2\text{К/Вт}$	$N, \text{Вт}$	$\eta, t_{см.сп.}, ^\circ\text{C хв}$	$t_{нов.}, ^\circ\text{C}$ $\alpha, \text{Вт/(м}^2\text{К)}$	$S_{см.}, S_{к}, \text{м}^2$	$Q_n, \text{Вт}$ $Q_\alpha, \text{Вт}$	$Q_\lambda, \text{Вт}$	$t_{нов.}, ^\circ\text{C}$	$t_{см.сп.}, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{хв}$

Звіт про роботу

Результати всіх вимірів і розрахунків занести до табл. 4.1.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному і вимушеному русі повітря в горизонтальній трубі

Мета роботи: ознайомлення з методикою експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному і вимушеному русі гарячого повітря.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання теорії конвективного теплообміну для випадків природної та вимушеної тепловіддачі і вміння визначати експериментальним шляхом коефіцієнт тепловіддачі для вільного та вимушеного руху повітря в горизонтальній трубі.

Обладнання і матеріали – експериментальна установка, термометри.

Експериментальна установка для лабораторії роботи (рис. 5.1) являє собою пустотілу сталеву трубу 5 зовнішнім діаметром $d = 100$ мм і довжиною $l = 600$ мм. Труба розміщена горизонтально так, що повітряний простір вільно дотикається з нею. Всередині труби розміщений електричний нагрівач 4, який рівномірно виділяє тепло по всій її довжині. Кількість теплоти, яка витрачається на нагрів труби, визначається за електричною потужністю, яку споживає нагрівач $Q_k = N$. Її легко підрахувати за показами амперметра і вольтметра $Q_k = I \cdot U$. Регулювання потужності здійснюють лабораторним автотрансформатором (ЛАТР). Для вимірювання температури поверхні використовують рідинні термометри 2, які вставляють у спеціальні отвори труби.

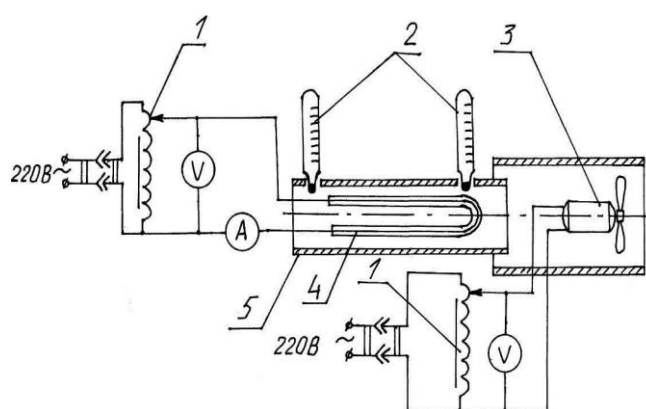


Рис. 5.1. Схема установки для визначення коефіцієнта тепловіддачі:
1 – ЛАТР, 2 – рідинні термометри, 3 – вентилятор, 4 – електронагрівач, 5 – труба

Для створення вимушеного руху повітря в трубі встановлено вентилятор 3. Регулюючи напругу ЛАТРом, можна змінювати швидкість обертання лопаток і відповідно міняти швидкість руху гарячого повітря всередині труби. Швидкість потоку повітря визначають з таблиці градування вентилятора (табл. 5.1). Температуру оточуючого повітря вимірюють за допомогою лабораторного термометра.

Таблиця 5.1

Дані градування вентилятора

Напруга на вентиляторі, $U, В$	85	90	95	100	105	110	115	120
Швидкість повітря, $v, м/с$	0,8	1,1	1,5	2,0	2,4	2,9	3,5	4,0

Послідовність виконання роботи

Вільний рух повітря:

1. Увімкнути ЛАТР в електричну мережу і, слідкуючи за показами вольтметра, встановити вказану викладачем напругу на нагрівачі.

2. Визначити тепловий режим труби. Для цього спочатку через 10 хв, а потім через кожні 5 хв фіксувати покази термометрів. За усталеного теплового режиму, що характеризується незмінністю показів термометрів з часом (незалежністю температур від часу), зробити не менше трьох вимірів температури поверхні труби t_1 і t_2 через кожні 5 хв. У цьому випадку кількість теплоти, яка виділяється в нагрівнику, буде відповідати загальному тепловому потоку, який проходить через поверхню труби. Температуру поверхні труби вимірюють за допомогою термометрів 2 (див. рис. 5.1). Результати вимірювань занести до табл. 5.2.

3. Розрахувати кількість теплоти, яка виділяється нагрівачем за одиницю часу (тепловий потік). У даній роботі кількістю теплоти, яку віддає поверхня труби шляхом променевого теплообміну і в результаті втрат крізь торець труби, можна знехтувати. Таким чином, за повну кількість теплоти Q_n , яка виділяється поверхнею труби, приймають теплоту за рахунок конвективного теплообміну Q_k .

4. Визначити середню температуру стінки:

$$t_{cm} = (t_1 + t_2) / 2,$$

де t_1 і t_2 – покази термометрів, в $^{\circ}\text{C}$;

5. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної труби при вільному русі повітря:

$$\alpha = Q_k / S(t_{cm} - t_n),$$

де $S = \pi dl$ – площа поверхні тепловіддачі труби, m^2 ; t_n – температура повітря в приміщенні.

6. За формулами відповідними розрахувати критерії Nu та Gr . Значення критерія Pr_n та кінематичної в'язкості повітря ν взяти з табл. 5.4 для умов, що відповідають температурі повітря у приміщенні лабораторії.

Коефіцієнт $\beta = 1 / (273 + t_{cm})$.

7. Результати розрахунків занести до табл. 5.2.

Вимушений рух повітря:

1. Не вимикаючи електронагрівач, увімкнути ЛАТР 1 живлення вентилятора і встановити, слідкуючи за вольтметром, вказану викладачем напругу.

2. Приблизно через 10 хв, коли відбудеться теплова стабілізація системи, тобто покази термометрів, які знаходяться на протилежних кінцях труби не перестануть змінюватися в часі, виміряти значення t_1 і t_2 та занести їх до табл. 5.3.

3. З табл. 5.1 (дані градування вентилятора) знайти швидкість повітряного потоку.

4. За допомогою аудиторного термометра виміряти температуру навколишнього середовища.

5. Виміри провести за трьох значень напруги на ЛАТРі (тобто при трьох значеннях швидкості повітряного потоку).

6. Результати вимірювань занести до табл. 5.3.

7. За відповідною формулою визначити критерій Re (значення ν беруть з табл. 5.4 для середньої температури повітря).

8. Знайти з табл. 5.4 критерій Pr .

9. Розрахувати критерій Nu за наближеною формулою.

10. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α за формулою.

11. Результати розрахунків занести до табл. 5.3.

Звіт про роботу

Навести результати вимірів і розрахунків теплотехнічних параметрів вільної тепловіддачі у табл. 5.2:

Таблиця 5.2

Дослідження вільної тепловіддачі

№ пор.	Вимірювана величина						Розрахункові величини							
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	I, A	U, B	Q_{κ}, Bm	$\alpha \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$	Pr	Nu	Gr	$\beta, \text{К}^{-1}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$	

1. Навести результати вимірів і розрахунків теплотехнічних параметрів вимушеної тепловіддачі у табл. 5.3:

Таблиця 5.3

Дослідження вимушеної тепловіддачі

№ пор.	Вимірювана величина						Розрахункові величини							
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{cm}, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_{c.n}, ^\circ\text{C}$	U, B	$\nu \text{ м}/\text{с}$	Re	$\alpha \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$	Pr	Nu	Gr	$\beta, \text{К}^{-1}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$

Таблиця 5.4

Фізичні властивості сухого повітря при $P_n = 760 \text{ мм рт.ст.}$

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кгК})$	$\lambda, 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\mu, 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,96	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,9728	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження параметрів водяної пари за допомогою діаграми та таблиць

Мета роботи: ознайомлення з діаграмою, яка полегшує та прискорює розрахунок теплових машин, набуття досвіду використання таблиць і теплової діаграми $i-S$ для розв'язку задач з аналізу термодинамічних процесів водяної пари.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання основних термодинамічних процесів водяної пари та методів дослідження параметрів водяної пари за допомогою $i-S$ діаграми і вміння аналізувати термодинамічні цикли паросилових енергетичних установок, визначати параметри водяної пари за допомогою діаграми і таблиць.

Обладнання, матеріали та інструменти: лінійка, олівець, таблиці сухої і насиченої водяної пари, $i-S$ діаграма.

Послідовність виконання роботи

Отримавши від викладача індивідуальне завдання (один з варіантів умови восьми задач), розпочати розв'язування задач, сформульованих нижче. Водночас необхідно дотримуватися послідовності дій, наведених у розділі «Звіт до роботи».

Задача 1. Водяна пара масою m кг надходить у паросилову установку за тиску p_1 і температури t_1 . Під час здійснення механічної роботи відбувається адіабатичне розширення пари до тиску p_2 .

Визначити:

- значення ентальпії і ентропії;
- теплоперепад;
- термічний ККД установки;
- ступінь перегріву пари;
- ступінь сухості пари.

Задача 2. Водяна пара з початковим тиском p_1 і температурою t_1 дроселюється до тиску p_2 . Визначити дросельний ефект і температуру пари після дроселювання.

Задача 3. Визначити внутрішню енергію, ентальпію, ентропію, питомий об'єм водяної пари масою m за тиску p_1 і ступеня сухості x_1 . Знайти масу води та насиченої пари.

Задача 4. Визначити кількість теплоти, яку потрібно передати водяній парі масою m кг, що займає питомий об'єм v_1 за тиску p_1 , щоб за цього ж питомого об'єму збільшити тиск до p_2 . Визначити також кінцеву температуру пари, ступінь сухості і зміну ентропії.

Задача 5. Після ізотермічного розширення за тиску p_1 пара масою m кг, сухістю x_1 переходить у сухий насичений стан. Визначити кількість теплоти, переданої парі, роботу нею виконану та зміну внутрішньої енергії.

Задача 6. Водяна пара масою m кг, що займає питомий об'єм v_1 , за тиску p_1 розширюється адіабатично до тиску p_2 . Визначити кінцевий об'єм пари, її сухість і виконану нею роботу.

Задача 7. Визначити кількість теплоти, яку необхідно витратити для одержання перегрітої пари питомим об'ємом v_1 , за тиску p_1 і температури t_1 з води, яка має температуру t_2 . Яка буде при цьому ентропія пари?

Задача 8. Перегріта пара масою m кг, температурою t_1 розширюється адіабатично від початкового значення тиску p_1 до значення тиску p_2 . Знайти для кінцевого стану пари сухість і температуру, визначити падіння ентальпії при переході пари з початкового стану в кінцевий стан. Знайти також і температуру у той момент, коли вона в процесі розширення стає сухою, насиченою.

Звіт про роботу

1. Згідно з варіантом, виданого викладачем, дані індивідуального завдання вписати у вигляді таблиці.

2. Виконати стислий запис умови кожної задачі, визначивши початкову та кінцеву точки процесу, зазначивши у символічній формі дані, які необхідно визначити. Накреслити схему розв'язання кожної задачі на умовній i - S діаграмі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Дослідження процесу теплопередачі в теплообміннику «труба в трубі»

Мета роботи: ознайомлення з методами та засобами визначення коефіцієнта теплопередачі в теплообмінному апараті і коефіцієнтів тепловіддачі. Визначення витрат тепла у навколишнє середовище. Дослідження впливу лінійної швидкості теплоносія на інтенсивність теплопередачі.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання закономірностей теплообміну у теплообмінниках типу «труба в трубі»; впливу режиму руху рідини на коефіцієнти тепловіддачі й теплопередачі і вміння проводити елементарні розрахунки теплообмінних апаратів рекуперативного типу; експериментально визначати коефіцієнти теплопередачі; застосовувати теорію подібності для розрахунків коефіцієнтів конвективного теплообміну.

Обладнання і матеріали: лабораторний стенд, оснащений контрольно-вимірними приладами.

Опис експериментальної установки

Теплообмінник «труба в трубі» (принципову схему зображено на рис. 7.1.) складається з двох розташованих паралельно елементів А і В. Кожний елемент складається з двох коаксіальних труб: зовнішньої та внутрішньої, які з'єднані паралельно. Загальна робоча довжина теплообмінника = 3,2 м, площа поверхні теплообміну $F = 0,38 \text{ м}^2$, діаметр внутрішньої труби $d_2 = 40 \text{ мм}$, зовнішньої – $d_1 = 54 \text{ мм}$.

Для нагрівання води, яка протікає зовнішньою трубою, використовують ємність 8 з розташованими в ній нагрівними елементами. Об'ємні витрати гарячої і холодної води вимірюють за допомогою витратомірних діафрагм 2, до яких під'єднані диференційні манометри 7.

Постійні витратомірних діафрагм:

- $C_1 = 2,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{5/2} / \text{с}$ – для гарячої води;

- $C_2 = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{5/2} / \text{с}$ – для холодної води.

Температуру холодної і гарячої води на вході і виході теплообмінника вимірюють за допомогою термопар 10, під'єднаних до мілівольтметра 6, шкала якого проградуєвана у градусах Цельсія.

За потреби під'єднання якої-небудь з трьох термопар до мілівольтметра використовують перемикач 3, який має 4 положення:

у 1-му положенні вимірюють температуру t_1' гарячої води на вході в теплообмінник; у 2-му – t_2'' холодної води на виході з теплообмінника; у 3-му – t_1'' гарячої води на виході з теплообмінника. Температуру холодної води на вході в теплообмінник t_2' вимірюють рідинним термометром, який занурюють у водопровідну воду, взяту з рукомийника.

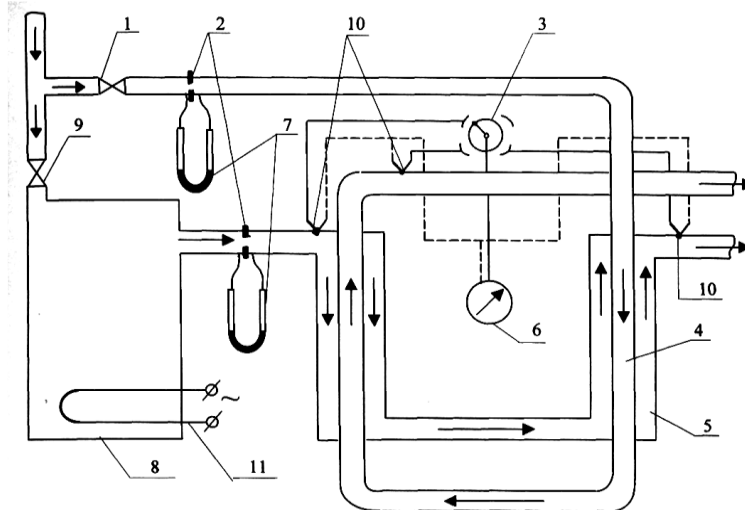


Рис. 7.1. Схема теплообмінника «Труба в трубі»:

1 – вентиль, 2 – витратомірні діафрагми, 3 – перемикач термопар, 4 – внутрішня труба, 5 – зовнішня труба, 6 – мілівольтметр, 7 – диференційні манометри, 8 – ємність (бак для води), 9 – вентиль, 10 – термопари, 11 – електронагрівач

Послідовність виконання роботи

1. Обережно відкрити вентиль 9 і заповнити водою ємність 8, після чого вентиль 9 закрити.
2. Уввімкнути підігрівач і нагріти воду до 70 - 90 °С.
3. Дуже обережно (під наглядом викладача або лаборанта) відкрити вентилі 9 і 1, запустивши теплоносії до теплообмінника. Водночас підігрівач води не вимикають.
4. Виміри температур t_1' , t_2'' , t_1'' проводять за стаціонарного режиму (коли стабілізуються температури).
5. Виміряти покази диференційних манометрів Δh_1 Δh_2 .

6. Закрити вентилі 9 і 1, знов підігріти воду в ємності 8 до 70 - 90 °С і повторити дослід.

Виміри повторюють за трьох різних значень витрат гарячої або холодної води (за вказівками викладача). Результати вимірювань занести до табл. 7.1.

Звіт про роботу

Навести результати розрахунків об'ємних витрат і вимірів температури гарячої та холодної води теплообмінника. Дані занести до табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Результати вимірювань

№ пор.	Вимірюваний параметр	Позначення	Одиниця	Номер досліду		
				1	2	3
1	Витрати гарячої води	$V1$	m^3/c			
2	Витрати холодної води	$V2$	m^3/c			
3	Температура холодної води на вході	$t2'$	°C			
4	Температура гарячої води на вході	$t1'$	°C			
5	Температура холодної води на виході	$t2''$	°C			
6	Температура гарячої води на виході	$t1''$	°C			

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Дослідження роботи поршневого компресора

Мета роботи: ознайомлення з будовою та принципом роботи одноступінчастого двоциліндрового поршневого компресора та визначення його основних характеристик.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання основних закономірностей термодинамічних процесів стискання газів у компресорних установках; будови й принципу дії компресорних установок і вміння проводити експериментальне дослідження та розрахунок основних параметрів одноступінчастого поршневого компресора; будувати індикаторну діаграму компресора.

Обладнання і матеріали: лабораторна установка для дослідження компресора, оснащена контрольно-вимірювальними приладами.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 8.1) складається з компресора – двоциліндрового поршневого 3, який нагнітає повітря в бак 7. Тиск (надлишковий) у баці вимірюють пружинним манометром 5. Тиск всмоктуваного повітря (тобто атмосферний) – лабораторним барометром. Температуру стиснутого повітря визначають за допомогою термопари 2, яка під'єднана до мілівольтметра 1.

Для визначення об'ємних витрат стиснутого повітря використовують ротаметр 4 з прикладеним графіком його градування (крива градування ротаметра наведена у кінці інструкції). Для випуску стиснутого повітря із баку використовують вентиль 6. Паспортні дані компресора, електродвигуна і постійна термопари (A_t) наведено в таблиці, що подається до установки.

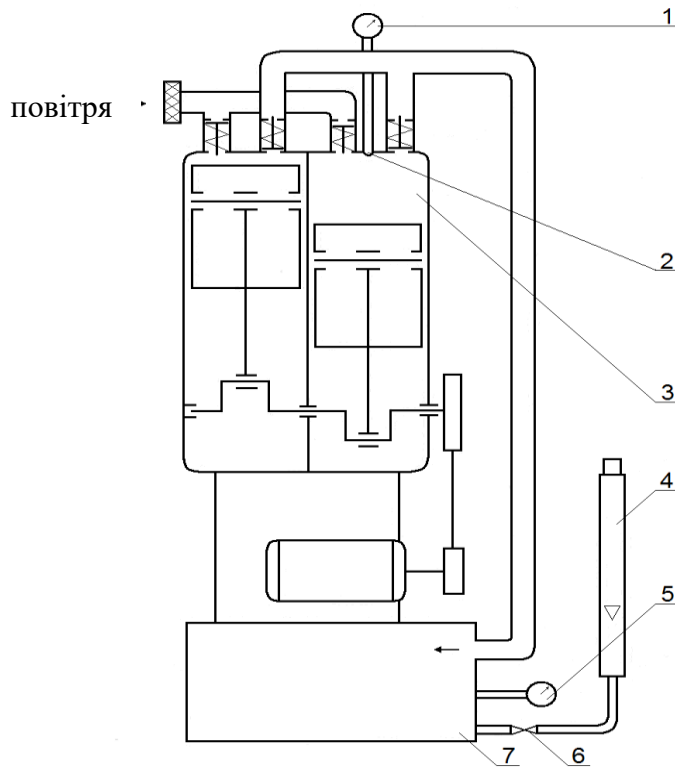


Рис. 8.1. Схема установки для вивчення роботи одноступінчастого компресора:
 1 – мілівольтметр, 2 – термопара, 3 – компресор, 4 – ротаметр, 5 – манометр,
 6 – вентиль, 7 – бак

Послідовність виконання роботи

1. Повністю відкрити вентиль 6 випуску повітря з баку 7 і запустити компресор.
2. Поступово закриваючи вентиль 6, встановити заданий викладачем тиск P_2 у баці 7.
3. За допомогою ротаметра і кривої градування визначити дійсну об'ємну продуктивність V_{cm} компресора.
4. Виміряти температуру стиснутого повітря t_2 за допомогою термопари ($t_2 = At \cdot Nmv$) і всмоктуваного t_1 повітря за допомогою лабораторного термометра.
5. Після вимірів повністю відкрити кран 6 і вимкнути компресор.
6. Визначити коефіцієнт подачі $\lambda = \lambda_0$ компресора, σ – коефіцієнт шкідливого об'єму. Під час розрахунків треба мати на увазі, що до формул підставляють абсолютне значення тиску $P_2 = P_{ман} + P_{атм}$ і абсолютну температуру $T_{1-2} = t_{1-2} + 273$. Манометром вимірюють надлишковий тиск у баці 7.

7. Визначити роботу стиску 1 м^3 повітря.
8. Визначити *ККД* установки.

Звіт про роботу

1. Навести дані вимірів барометричного та манометричного тиску повітря та його температури до і після стискування в компресорі у табл. 8.1.

2. Побудувати для одного з дослідів (за вказівкою викладача) індикаторну діаграму досліджуваного компресора.

Таблиця 8.1

Результати вимірювань

<i>T, град. К</i>		<i>P, атм.</i>		<i>V, м³/с</i>			$\frac{P_2}{P_1}$	λ	σ	η
<i>T₁</i>	<i>T₂</i>	<i>P₁</i>	<i>P₂</i>	<i>V_{ст}</i>	<i>V_д^в</i>	<i>V_{теор.}</i>				

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Визначення теплоємності газів

Мета роботи: вивчити методику визначення теплоємності газів (повітря) та визначити об'ємну і масову теплоємності повітря для сталого тиску.

У процесі виконання роботи необхідно набути знання визначення теплоємності, види теплоємності методи їх визначення, залежність теплоємності і вміння визначати теплоємність різного типу.

Обладнання і матеріали: лабораторна установка.

Таблиця 9.1

Види теплоємностей та їх значення

Теплоємність	Мольна, кДж/(моль К)		Масова, кДж/(кг · К)		Об'ємна, кДж/(м · К)	
	Середня	Істинна	Середня	Істинна	Середня	Істинна
Ізохорна	μc_{vm}	μc_v	c_{vm}	c_v	c'_{vm}	c'_v
Ізобарна	μc_{pm}	μc_p	c_{pm}	c_p	c'_{pm}	c'_p

Методика вимірювання теплоємності

Ізобарна теплоємність (c_p) має велике практичне значення. Її найпростіше визначити експериментальним шляхом. Ізохорну теплоємність (c_v) експериментально визначити важко. Тому її розраховують за формулою Маєра, а більш точніше за допомогою диференціальних рівнянь термодинаміки.

Основним методом визначення теплоємності для металів, ізоляторів є метод контактного тепловимірювання. Для визначення теплоємності газів і рідини використовують два методи, а саме: нагрівання окремої порції речовини і проточним калориметром. У лабораторній установці повітря з постійною витратою безперервно проходить через колориметр, до якого підводиться тепло. Вимірявши кількість повітря, кількість теплоти, температуру повітря на вході і виході з колориметра, за формулою легко вирахувати значення теплоємності. Схему дослідної установки наведено на рис. 9.1.

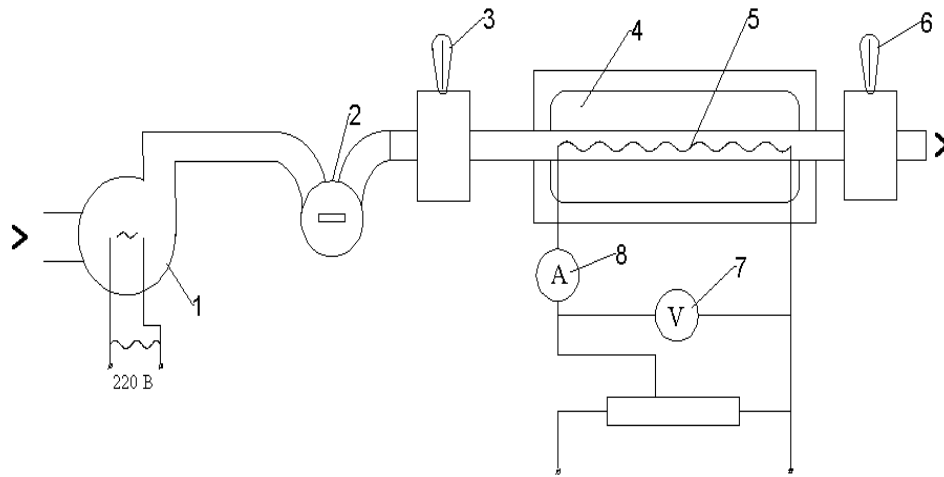


Рис. 9.1. Схема дослідної установки:

1 – вентилятор; 2 – газовий лічильник; 3,6 – ртутні термометри; 4 – калориметр;
5 – нагрівник; 7 – вольтметр; 8 – амперметр

Після ознайомлення з дослідною установкою необхідно ввімкнути вентилятор. Показання термометрів на вході і виході калориметра мають бути однаковими. Потім потрібно ввімкнути нагрівач калориметра. Температура повітря на виході з калориметра буде зростати. Регулюючи потужність нагрівача, потрібно добитися, щоб повітря в калориметрі нагрівалося на 15...20 °С. Сталий режим потрібно вважати досягнутим, якщо протягом деякого часу, різниця температур на вході і виході калориметра не буде змінюватися.

Після досягнення сталого режиму проводять дослід протягом 8...10 хв. Для цього кожні 2 хв записують показання термометрів, вольтметра і амперметра. Показання газового лічильника записують на початку та в кінці досліду. Усі виміряні величини заносять до табл. 9.1.

Для подальших розрахунків використовують середні величини і значення атмосферного тиску повітря (за барометром). Після закінчення досліду вимикають спочатку нагрівник і тільки через 5 хв – вентилятор.

Оскільки в досліді вимірюють не масову витрату повітря, а об'ємну, то спочатку розраховують середню об'ємну теплоємність, Дж/(м³·град):

$$C_{pm}^1 = \frac{Q_{ел}}{V_0(t_2 - t_1)} = \frac{UI_{наг}}{V_0(t_2 - t_1)}, \quad (9.1)$$

де $Q_{\text{ел}}$ – теплота, що віддається нагрівником за 1 с, Вт; U – напруга на нагрівальнику, В; I – сила струму, що проходить через нагрівач, А; t_1, t_2 – температура повітря відповідно на вході і виході з калориметра; V – об’ємна витрата повітря через калориметр, зведена до нормальних умов, м³/с.

Величину V розраховують за результатами вимірювань з рівняння:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}, \quad (9.2)$$

де P_1 – атмосферний тиск, Па; T_1 – температура повітря на вході в калориметр, К; V_1 – об’ємна витрата повітря через калориметр (визначають за показниками газового лічильника, м³/с).

Нормальні умови: тиск $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ або $101,3 \cdot 10^3$ Па і температура $T_0 = 273,15$ К. Розраховане за рівняння (9.1) значення об’ємної теплоємності дає змогу перейти до масової теплоємності, Дж/(кг·град):

$$C_{pm} = C_{pm}^1 \frac{22,4}{\mu_B}, \quad (9.3)$$

де μ_B – маса 1 кмоль повітря, $\mu_B = 28,96$ кг/кмоль.

Крім масової ізобарної теплоємності C_p необхідно розрахувати і ізохорну теплоємність C_v за рівнянням Майєра, оскільки повітря в даному стані близьке до ідеального газу. Отримані величини C_p і C_v потрібно порівняти з табличними значеннями. Далі необхідно обчислити показник адіабати повітря:

$$K = \frac{C_p}{C_v}; \quad (9.4)$$

$$C_v = C_p - R; \quad (9.5)$$

$$R = \frac{8314}{\mu_B}; \quad (9.6)$$

Результати вимірювань

Час τ , хв	Сила струму I , А	Напруга U , В	Температура повітря на вході в калориметр t_1 , °С	Температура повітря на виході в калориметр t_2 , °С	Показання лічильника на початку дослідю N_1 , л	Показання лічильника у кінці дослідю N_2 , л	Витрата повітря V , м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7	8

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лабай В.Й. Теплообмін: підручник. – Л.: Тріада плюс, 1998. – 260 с.
2. Мисак Й.С. Пристрої для утилізації теплової енергії / Й.С. Мисак, Я.М. Гнатишин, В.Ф. Близнюк та ін. – Л.: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 152 с.
3. Мисак Й.С. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив: навч. посіб. / Й.С. Мисак, Я.М. Гнатишин, Я.Ф. Івасик. – Л.: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2002. – 136 с.
4. Теплотехніка / За ред. Б.Х. Драганова, О.Ф. Буляндри. – К.: Вища шк., 1998. – 334 с.
5. Ханик Я.М. Енергозбереження: Ч.1 Термодинаміка / Я.М. Ханик, Я.М. Гнатишин. – Л., 2004. – 125 с.
6. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. – К.: Наук, думка, 1991. – 360 с.
7. Гоц В.І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В.І. Гоц, В.М. Кошкаръов, В.В. Павлюк та ін. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.
8. Гетта В.Г. Теплотехніка і теплові машини: лабораторний практикум. – Чернігів: ЧНПУ ім. Т.Г. Шевченка, 2016. – 163 с.

Навчально-методичне видання

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
спеціалізації «Новітні технології та дизайн сучасних стінових
та оздоблювальних матеріалів»

Укладачі: **ТРОЯН** В'ячеслав Васильович,
АЗУТОВ Володимир Павлович,
СМЕШКО Володимир Володимирович

Випусковий редактор *В.С. Сасько*
Комп'ютерне верстання *Д.М. Ніколаєвич*

Підписано до друку 2023. Формат 60x84_{1/16}
Ум. друк. арк. 1,63. Обл.-вид. арк. 1,75.
Електронний документ. Вид. № 46/III-23

Видавець і виготовлювач:
Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

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