

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет будівництва і архітектури

# **ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Методичні вказівки  
до виконання практичних 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)

Т34

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

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  
Т34 підприємств: методичні вказівки до виконання практичних робіт /  
уклад.: В.В. Троян, В.П. Азутов. – Київ: КНУБА, 2023. – 24 с.

Містять теоретичні та методологічні засади розрахунків теплових процесів, що мають місце у теплотехнічних агрегатах технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів. Наведено приклади розв'язання задач і контрольні завдання для самостійної роботи.

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

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Метою та завданням виконання практичних робіт є набуття студентами умінь і навичок застосування теоретичного матеріалу щодо розрахунків основних конструктивних елементів, принципу дії та застосування теплотехнічного обладнання, підвищення ефективності теплових процесів та агрегатів, удосконалення технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів (ТНСМ) пов'язані із застосуванням інноваційних методів організації теплових процесів, одержання, перетворення, передачі й використання теплоти, застосування найбільш раціональних видів енергії та енергоносіїв.

Приклади практичних завдань наведено за трьома розділами:

Розділ 1. Розрахунки горіння палива.

Розділ 2. Розрахунки теплообміну в робочому просторі печей.

Розділ 3. Основи розрахунку процесу сушіння.

## РОЗДІЛ 1. Розрахунки горіння палива

**Задача 1.** Розрахувати нижчу теплоту згоряння сірчистого мазуту, який містить 0,4 мас. % золи ( $A_p$ ) та 2,5 мас. % вологи ( $W_p$ ). Склад горючої маси мазуту, мас. %: С – 84,9; Н – 11,3; S – 3,3; О – 0,2; N – 0,3.

Для розрахування нижчої теплоти згоряння (теплотворність) мазуту спочатку необхідно за допомогою відповідних коефіцієнтів перерахувати горючу (надану) масу мазуту на робочу. Користуючись коефіцієнтами перерахунку з горючої на робочу масу, визначають вміст вуглецю в робочій масі мазуту.

Аналогічним чином перераховують усі інші компоненти горючої маси мазуту і далі нижчу теплоту згоряння визначають за відомими формулами.

**Задача 2.** Розрахувати нижчу теплоту згоряння природного газу Яблунівського родовища (Україна), який містить 3 об'єм. % вологи. Склад сухого газу, об'єм. %:  $CH_4$  – 94;  $C_2H_6$  – 1,2;  $C_3H_8$  – 0,7;  $C_4H_{10}$  – 0,4;  $C_5H_{12}$  – 0,2;  $CO_2$  – 0,2;  $N_2$  – 3,3.

У формулі визначення нижчої теплоти згоряння газового палива слід підставляти вміст компонентів робочої маси (вологого) газу, тому також необхідно перерахувати надану масу (сухий газ) на робочу (вологий газ) усіх компонентів сухого газу.

Далі розраховують нижчу теплоту згоряння газу за відомою формулою, до якої підставляють лише ті компоненти палива, які присутні у складі робочої маси газу.

**Задача 3.** Розрахувати процес горіння (скласти матеріальний баланс, визначити калориметричну та дійсну температури горіння) природного газу. Склад сухого газу, об'єм. %:  $CH_4$  – 78,5;  $C_2H_6$  – 3,6;  $C_3H_8$  – 2,5;  $C_4H_{10}$  – 1,5;  $C_5H_{12}$  – 1,2;  $CO_2$  – 5,4;  $N_2$  – 3,7;  $H_2S$  – 3,6.

Розв'язання задачі починають з перерахунку сухого газу на вологий (з сухої маси на робочу), для чого беруть вміст вологи у робочій масі –  $H_2O_p = 1,5$  %.

Далі розраховують теоретичну витрату сухого повітря ( $L_0$ ) для горіння  $1\text{ м}^3$  газового палива ( $\text{м}^3$  повітря/ $\text{м}^3$  газу), підставляючи до рівняння вміст тільки тих компонентів, які присутні у робочій масі:

Теоретичну витрату вологого повітря ( $L_{\text{вол}}$ ) для горіння  $1 \text{ м}^3$  газового палива ( $\text{м}^3$  повітря/ $\text{м}^3$  газу) розраховують при  $d_{\text{пов}} 10 \text{ г/кг}$  сухого повітря.

Дійсні витрати сухого ( $L_{\alpha}$ ) і вологого ( $L_{\text{вол}}$ ) повітря для горіння  $1 \text{ м}^3$  газового палива розраховують з прийняттям коефіцієнта витрати повітря ( $\alpha$ ) 1,2.

Далі розраховують об'єми  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  у продуктах згоряння газового палива,  $\text{м}^3$  продукту згоряння/ $\text{м}^3$  газу.

Визначають загальний об'єм продуктів повного згоряння палива, а також склад продуктів повного згоряння палива.

Далі складають матеріальний баланс горіння газу з розрахунків на  $100 \text{ м}^3$  газового палива.

Далі розраховують нижчу теплоту згоряння газу, після цього розраховують ентальпію газової суміші продуктів згоряння газу за калориметричної температури. Для цього припускають, що температура повітря, яке надходить на горіння, дорівнює  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а фізичним теплом палива ( $sp \cdot tp$ ) можна знехтувати. Для обраної температури повітря знаходять теплоємність повітря  $c_{\text{пов}} = 1,3005 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Розраховують калориметричну температуру горіння газу, а також дійсну температуру горіння газу, беручи значення пірометричного коефіцієнта  $\eta_{\text{п}} = 0,75$ .

**Задача 4.** Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу (за вибором варіанта).

Таблиця 1.1

### Склад деяких природних газів

Найменування природного газу	Склад сухого газу, %						
	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
Шебелинський (Україна)	93,2	4,4	0,8	0,6	0,3	0,1	0,6
Юліївський (Україна)	98,0	0,3	0,1	0,1	–	0,3	1,2
Дашавський (Україна)	97,9	0,5	0,2	0,1	–	0,1	1,2
Яблунівський (Україна)	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3
Опішнянський (Україна)	85,9	3,1	1,0	0,4	0,1	0,1	9,4
Березівський (Україна)	91,6	1,6	0,8	0,4	0,2	0,6	4,7

**Задача 5.** Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого (за вибором варіанта).

Таблиця 1.2

**Склад рідинних палив**

Найменування палива	Вміст компонентів, %					
	C	H	S	O+N	A	W
Мазут малосірчистий марки:						
20	87,2	11,7	0,5	0,6	0,1	2,0
40	87,4	11,2	0,5	0,9	0,2	3,0
60	87,6	10,7	0,7	1,0	0,2	3,0
Мазут сірчистий марки:						
10	85,2	11,6	2,5	0,7	0,1	1,0
20	85,0	11,6	2,9	0,5	0,2	2,0
40	85,0	11,4	3,2	0,4	0,3	3,0

**Задача 6.** Розрахуйте димар для видалення продуктів згорання за такими даними: кількість (витрата) димових газів  $V_{дг} = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ; температура газів біля основи димаря  $t_{осн} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура навколишнього повітря  $t_{пов} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; розрахункова величина розрідження, що його створює димар  $h_p = 200 \text{ Н/м}^2$ .

Для розв'язання задачі обирають цегляний димар, для якого за відомими  $t_{осн} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $h_p = 200 \text{ Н/м}^2$  беруть орієнтовну висоту димаря  $H' = 28 \text{ м}$ .

Температуру газів в усті визначають за формулою, приймаючи падіння температур за висотою для цегляного димаря  $\Delta t = 1,5 \text{ }^\circ\text{C/м}$ :  $t_y = 350 - 28 \cdot 1,5 = 308 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Середня температура газів у димарі становитиме:  $t_{сер} = (350 + 308) / 2 = 329 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Густину газів за середньої температури  $329 \text{ }^\circ\text{C}$  та навколишнього повітря за температури  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  визначають за формулою, беручи для продуктів згорання  $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ , для повітря  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ; далі розраховують діаметр устя димаря, для чого задаються швидкістю газів в усті  $v_{0y} = 4 \text{ м/с}$ ;  $D_y = 0,76 \text{ м}$ .

Оскільки отримане значення менше 0,8 м, беруть  $D_y = 0,8$  м і перераховують швидкість газів в усті:

$$v_{0y} = 1,8 / (0,785 \cdot 0,8^2) = 3,58 \text{ м/с.}$$

Слід зауважити, що якщо отримане значення  $D_y \geq 0,8$  м, перерахунок  $v_{0y}$  робити не потрібно.

Користуючись значенням  $D_y$ , розраховують спочатку діаметр основи димаря:  $D_{\text{осн}} = 1,5$ ;  $D_y = 1,5 \cdot 0,8 = 1,2$  м; а потім середній діаметр:  $D_{\text{сер}} = (1,2 + 0,8) / 2 = 1,0$  м.

Знову розраховують середню швидкість газів:

$$v_{0\text{сер}} = 1,8 / (0,785 \cdot 1,2^2) = 2,29 \text{ м/с.}$$

Обирають значення коефіцієнта тертя газів об стінки цегляного димаря  $\xi = 0,035$  та коефіцієнта місцевого опору при виході газів з димаря в атмосферу  $\zeta = 1,06$ . Після чого виконують розрахунок висоти димаря.

**Задача 7.** Скористайтесь розрахунками процесу горіння, що були виконані під час складання матеріального балансу заданого виду палива та визначте:

1. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Шебелинського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива,  $X_{\text{п}} = 340 \text{ м}^3/\text{Год}$ ;
- загальний коефіцієнт витрати повітря,  $\alpha_{\text{заг}} = 2$ ;
- температура повітря –  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура газів біля основи димаря –  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- втрати напору димових газів,  $h_{\text{втр}} = 150 \text{ Н/м}^2$ ;
- коефіцієнти тертя газів і місцевих опорів відповідно –  $0,035$  та  $1,06$ .

### Список літератури до розділу 1

1. Ралко А.В. Тепловые процессы в технологии силикатов: учебник / А.В. Ралко, А.А. Крупа, Н.Н. Племянников и др. – Киев: Выща школа, 1986. – 232 с.

2. Ралко А.В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов /

А.В. Ралко, А.А. Крупа, Н.Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.

3. Нагорний А.О. Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 122 с.

4. Шестаков В.Л. Задачі та вправи з технічної термодинаміки та теплових процесів технології будівельних матеріалів: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2006.

5. Гоц В.І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В.І. Гоц, В.М. Кошкаръов, В.В. Павлюк, С.А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.

6. Сардак Е.М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів: навч. посіб. / Е.М. Сардак, В.І. Голеус, О.В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.

## РОЗДІЛ 2. Розрахунки теплообміну в робочому просторі печей

**Задача 1.** Визначити кількість тепла від газів і кладки конвеєрної роликової печі на поверхню плиток у секції випалу, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура продуктів згоряння (газів)  $T_{\text{газ}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура плиток  $T_{\text{м}} = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ступінь чорноти продуктів згоряння  $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,2$ ; ступінь чорноти поверхні матеріалу (плиток)  $\varepsilon_{\text{м}} = 0,75$ ; довжина секції випалу – 3 м, ширина та висота пічного каналу відповідно – 0,9 та 0,62 м.

Необхідно розрахувати сумарний тепловий потік від газів і внутрішньої поверхні кладки печі на поверхню плиток. Попередньо слід визначити видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню плиток і поверхню плиток, що сприймає випромінювання.

Спочатку розраховують ступінь розвитку кладки, який є необхідним для визначення допоміжного множника  $K$  (у формулі). При цьому враховують конструктивні особливості робочого каналу конвеєрної печі, а саме:

- загальна внутрішня поверхня кладки  $F_{\text{к}}$  може бути наближено розрахована як сума площ двох поздовжніх та однієї верхньої поверхонь вогнетривкої футерівки робочого каналу секції випалу;

- поверхня плиток, що сприймає випромінювання  $F_{\text{м}}$  наближено відповідає площі конвеєра в секції випалу, і разом з  $F_{\text{к}}$  може бути розрахована за наданими (відомими) розмірами секції, для чого визначаються:  $\omega$ ;  $\beta$  і далі множник  $K$ .

Далі визначають видимий коефіцієнт випромінювання  $c_{\text{в}}$  від газів і кладки на поверхню плиток та сумарний тепловий потік від газів і внутрішньої поверхні футерівки печі (за температури  $T_{\text{газ}} = t_{\text{газ}} + 273 = 1150 + 273 = 1423 \text{ K}$ ) на поверхню плиток (за температури  $T_{\text{м}} = 1080 + 273 = 1353 \text{ K}$ ) у секції випалу, після чого визначають температуру внутрішньої поверхні кладки, попередньо розрахувавши значення множника  $\psi$ .

**Задача 2.** Визначити кількість тепла, що його сприймає скломаса від газів і кладки ванної скловарної печі, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура газів  $T_{\text{газ}} = 1650 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура скломаси  $T_{\text{м}} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ступінь чорноти газів  $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,22$ ; ступінь чорноти

скломаси  $\varepsilon_m = 0,82$ ; ширина та довжина варильної частини печі (розміри ванни) відповідно – 6 та 12,5 м, висота полум'яного простору – 1,75 м.

Спочатку розраховують ступінь розвитку кладки, враховуючи конструктивні особливості варильної частини ванної скловарної печі, а саме:

- загальна внутрішня поверхня кладки  $F_k$  може бути наближено розрахована як сума площ двох бокових і двох поздовжніх поверхонь полум'яного простору, а також площі поверхні склепіння вогнетривкої футерівки варильної частини печі;

- поверхня скломаси, що сприймає випромінювання  $F_m$ , наближено відповідає площі варильної частини, і разом з  $F_k$  може бути розрахована за наданими (відомими) розмірами ванни. Після чого визначають значення допоміжного множника  $K$  та  $\beta$ .

Далі визначають видимий коефіцієнт випромінювання від газів і кладки на поверхню плиток,  $c_v$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Визначають сумарний тепловий потік  $Q_m$  кВт від газів та внутрішньої поверхні футерівки печі (за температури  $T_{\text{газ}} = t_{\text{газ}} + 273 = 1650 + 273 = 1923$  К) на поверхню скломаси (за температури  $T_m = 1400 + 273 = 1673$  К). Після чого визначають температуру внутрішньої поверхні кладки, попередньо розрахувавши значення множника  $\psi$ .

**Задача 3.** Розрахуйте за наведеним складом димових газів (продуктів згоряння) вказаного виду палива їх температуру, а також визначте:

1. Тепловий потік від димових газів і кладки конвеєрної печі у секції випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1100 °С;  $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,2$ ;  $\varepsilon_m = 0,82$ ; ширина та висота пічного каналу відповідно 1,15 та 0,73 м; довжина секції – 2,5 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

**Задача 4.** Тепловий потік від димових газів і кладки конвеєрної печі у секції випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1120 °С;  $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,21$ ;  $\varepsilon_m = 0,8$ ; ширина та висота пічного каналу відповідно 1,3 та 0,75 м; довжина секції – 2,6 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння  
та теплотворність деяких видів палива**

Номер варіанта	Склад продуктів згоряння, в одиницях об'єму					$L_a$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> або м <sup>3</sup> /кг	$Q_{p_n}$ , кДж/м <sup>3</sup> або кДж/кг
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O		
1	1,538	0,022	10,618	0,651	1,952	13,438	39773
2	1,090	0,035	9,230	0,407	2,133	11,638	35824
3	1,55	0,019	10,765	0,66	1,885	13,628	40099
4	0,985	–	9,59	0,588	2,165	12,142	35133
5	1,564	0,006	9,598	0,425	1,66	12,145	38698
6	1,011	–	10,539	0,799	2,213	13,328	35845
7	0,985	–	8,627	0,38	2,065	10,845	34060

**Задача 5.** Тепловий потік від димових газів і кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси 1500 °С;  $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$ ;  $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$ ; розміри ванни 8 на 19 м; висота полум'яного простору 1,7 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

**Задача 6.** Для стаціонарного температурного поля підібрати теплоізоляційні матеріали для багатошарової футерівки секції випалу конвеєрної печі завдовжки 3 м, розрахувати температуру зовнішньої поверхні, втрати тепла у навколишнє середовище, а також побудувати криву розподілу температур у стінці, якщо:  $t_{\text{вн}} = 1100$  °С,  $q_{\text{нс}} = 890$  Вт/м<sup>2</sup>, ширина й висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,62 м.

На початку з табл. 2.2 обирають теплоізоляційні матеріали для футерівки секції випалу печі у порядку зниження робочих температур:

- 1-й шар: компактна шамотна цегла густиною 1900 кг/м<sup>3</sup>;
- 2-й шар: легковагова шамотна цегла ШЛБ-0,6 густиною 600 кг/м<sup>3</sup>;
- 3-й шар: пінодіатомітова цегла ПД-400 густиною 400 кг/м<sup>3</sup>.

## Орієнтовний набір вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів

Найменування матеріалу	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Припустима робоча температура, °С	$\lambda$ , Вт/(м·°С)	Товщина, мм
Шамот	1900	1350 – 1500	$0,7 + 0,00064 \cdot t$	115
Шамот	1200	1300	$0,35 + 0,00035 \cdot t$	200
Шамот	1000	1250	$0,28 + 0,00023 \cdot t$	200
Шамотна легковага	800	1200	$0,21 + 0,00043 \cdot t$	230
Шамотна легковага	600	1200	$0,20 + 0,00036 \cdot t$	230
Шамотна легковага	400	1150	$0,12 + 0,00024 \cdot t$	230
Діатоміт	750	800	$0,17 + 0,00035 \cdot t$	115
Пінодіатоміт	400	800	$0,11 + 0,00023 \cdot t$	115
Шлаковата	300	700	$0,065 + 0,00035 \cdot t$	115

У процесі проведення розрахунків необхідно намагатися, щоб розрахункова температура зовнішньої поверхні печі знаходилась у межах 30 - 80 °С для зон підігріву і охолодження, 50 - 100 °С для зони випалу.

Оскільки ізоляція складається з  $i$  шарів різних матеріалів, то температуру зовнішньої поверхні  $i$ -го шару ізоляції розраховують за формулою

$$t_{i,\text{зов}} = t_{i,\text{вн}} - q_{\text{нс}} \cdot \delta i / \lambda i,$$

де  $q_{\text{нс}}$  – щільність теплового потоку, що передається в навколишнє середовище, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{i,\text{вн}}$ ,  $t_{i,\text{зов}}$  – відповідно температури на внутрішній та зовнішній поверхні шару ізоляції, °С;  $\delta i$  – товщина  $i$ -го шару ізоляції, м;  $\lambda i$  – теплопровідність  $i$ -го шару ізоляції, Вт/(м·°С), що розраховується залежно від середньої температури в  $i$ -му шарі за рівняннями (див. табл. 2.2).

Розрахунки виконують за методом покрокового наближення, коли задаються очікуваною температурою зовнішньої поверхні  $i$ -го шару ізоляції, за допомогою якої розраховують середню температуру шару.

Для одержаної середньої температури розраховують коефіцієнт теплопровідності і потім розрахункову температуру зовнішньої поверхні. Кожним наступним кроком розрахункову температуру беруть як очікувану і повторюють розрахунки доти, поки очікувана температура зовнішньої поверхні  $i$ -го шару ізоляції не зрівняється з розрахунковою.

Визначена зовнішня температура  $i$ -го шару ізоляції буде дорівнювати внутрішній температурі  $(i+1)$ -го шару.

Після цього проводять розрахунки другого шару, маючи на увазі, що для другого шару температурою внутрішньої поверхні буде розрахована для першого шару температура зовнішньої поверхні.

Щільність теплового потоку при цьому залишається незмінною. Аналогічним чином розраховують третій шар ізоляції.

**Задача 7.** Користуючись табл. 2.2, підберіть теплоізоляційні матеріали для футерівки секції печі, розрахуйте температуру зовнішньої поверхні, втрати тепла в навколишнє середовище, а також побудуйте криву розподілу температур у стінці, якщо: довжина секції 2,5 м, температура внутрішньої поверхні 1080 °С, щільність теплового потоку 900 Вт/м<sup>2</sup>, ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,62 м.

**Задача 8.** Для нестационарного температурного поля визначити розподіл температур при розігріві пічної стінки. Стінка складається з двох шарів: шамотного густиною 1900 кг/м<sup>3</sup> завтовшки 345 мм та теплоізоляційного (з трепельної цегли) густиною 700 кг/м<sup>3</sup> завтовшки 115 мм. Початкова температура стінки по всій товщині 20 °С. Температура навколишнього повітря 20 °С.

Розв'язання задачі виконують за допомогою методу кінцевих різниць, згідно з яким шамотний (основний) шар стінки розбивають на шість (будь-яке довільне число) рівних частин.

Для визначення коефіцієнта температуропровідності шамоту необхідно попередньо розрахувати коефіцієнти теплопровідності та теплоємності, які залежать від температури стінок, а останні є шуканими величинами. Саме тому значення  $\lambda$  та  $c$  треба визначати, враховуючи температурний режим нагріву. Середні температури за масою стінки легко визначити для стаціонарного теплового стану стінки, це будуть максимально можливі температури. Середні розрахункові температури

залежать від тривалості нагріву та можуть бути прийняті тільки орієнтовно.

**Задача 9.** Визначте температуру на поверхні розділу шарів після 5 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з корунду густиною  $2800 \text{ кг/м}^3$  (товщина шару 0,20 м) та шамоту густиною  $800 \text{ кг/м}^3$  (товщина шару 0,14 м; ступінь чорноти 0,79), розігрівали від  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  зі швидкістю  $100 \text{ }^\circ\text{C/год}$ . Температура навколишнього повітря –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте, скориставшись табл. 2.3.

Таблиця 2.3

**Теплопровідність і теплоємність вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів**

Матеріал	Густина, $\text{кг/м}^3$	$\lambda$ , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$c$ , $\text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$
Шамот	1900	$0,70+0,00064\cdot t$	$0,837+0,000264\cdot t$
Шамот	1300	$0,61+0,00018\cdot t$	
Шамот	1200	$0,35+0,00035\cdot t$	
Шамот	1000	$0,28+0,00023\cdot t$	
Шамот	800	$0,21+0,00043\cdot t$	
Динас	1900	$1,07+0,00093\cdot t$	$0,795+0,000335\cdot t$
Динас	1100	$0,58+0,00043\cdot t$	
Напівкисла цегла	1800	$0,85+0,00040\cdot t$	$0,88+0,00023\cdot t$
Глиняна цегла	1800	$0,47+0,00051\cdot t$	$0,837+0,000264\cdot t$
Високоглиноземні	2500	$2,1-0,00062\cdot t$	$0,837+0,000264\cdot t$
Високоглиноземні	1330	$0,66+0,00008\cdot t$	
Корунд	2600–2900	$2,1+0,00215\cdot t$	$0,419+0,00088\cdot t$
Силіманіт	1650	$1,66-0,0018\cdot t$	$0,67+0,000167\cdot t$
Мулітові	2200–2900	$2,96-0,00110\cdot t$	$0,67+0,000126\cdot t$
Магнезитові	2600–2700	$6,2-0,00270\cdot t$	$0,942+0,00025\cdot t$
Хромомagneзит	2900	$2,0-0,00035\cdot t$	$0,754+0,00015\cdot t$
Форстерит	3000	$3,3-0,00110\cdot t$	$0,89+0,000419\cdot t$
Периклазошпинельні	3000	$2,5-0,00058\cdot t$	$0,775+0,0003\cdot t$
Карборунд	2000–2500	$5,2-0,00130\cdot t$	$0,96+0,000146\cdot t$
Діатоміт	1100	$0,27+0,00023\cdot t$	$0,837-0,92$
Діатоміт	750	$0,17+0,00035\cdot t$	
Шлаковата	300	$0,065+0,00035\cdot t$	0,88

**Задача 10.** Визначте температуру на поверхні розділу шарів після 7 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з хромомагнетиту густиною  $3000 \text{ кг/м}^3$  (товщина шару  $0,15 \text{ м}$ ) та шамоту густиною  $1000 \text{ кг/м}^3$  (товщина шару  $0,20 \text{ м}$ ; ступінь чорноти  $0,72$ ), розігрівали від  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  зі швидкістю  $130 \text{ }^\circ\text{C/год}$ . Температура навколишнього повітря –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте, скориставшись табл. 2.3.

**Задача 11.** Розрахувати режим випалу нормальної шамотної цегли з часів'ярської глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч  $w_a = 5 \%$ . Вага сухої цегли  $3,8 \text{ кг}$ , товщина цегли  $0,066 \text{ м}$ , довжина та висота відповідно  $0,23$  та  $0,113 \text{ м}$ .

Розв'язання задачі слід починати з визначення часу, необхідного для нагріву виробу до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пам'ятаючи про те, що абсолютна вологість матеріалу відповідає відношенню кількості або ваги води, що міститься у матеріалі, до ваги абсолютно сухого матеріалу, розраховують кількість води, яка випаровується ( $G_{\text{вол}}$ ):

$$G_{\text{вол}} = 3,8 \cdot 0,05 = 0,19 \text{ кг.}$$

Враховуючи розміри цегли, визначають активну поверхню теплообміну та випаровування ( $F$ ) однієї цегли, що стоїть на ребрі:

$$F = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,113 + 0,23 \cdot 0,066 + 2 \cdot 0,113 \cdot 0,066 = 0,082 \text{ м}^2.$$

Кількість води на  $1 \text{ м}^2$  активної поверхні ( $G_F$ ) становитиме:

$$G_F = \frac{G_{\text{вол}}}{F} = \frac{0,19}{0,082} = 2,32 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Випал шамотних виробів здебільшого відбувається у тунельних печах, де у низькотемпературних зонах основним способом теплообміну є конвекція. За таких умов інтенсивність випаровування або знімання води з активної поверхні можна прийняти приблизно  $0,3 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$ . Тоді час, необхідний для нагріву цегли до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  становитиме:

$$\tau_1 = \frac{2,32}{0,3} = 7,73 \text{ год.}$$

Далі відповідно до табл. 2.4 розраховують тривалість періодів нагріву, витримки та охолодження.

Таблиця 2.4

**Допустимі перепади температур у масі при випалі**

Найменування матеріалу	Нагрів, °С			Охолодження, °С		
	100-700	700-1000	1000-1400	1400-1000	1000-850	850-100
Спондилова глина	110	85	–	–	30	125
Силідівська глина	115	77	–	–	33	123
Часів'ярська глина	120	85	80	30	125	140
Дружківська глина	120	80	75	30	120	135
Часів'ярська глина 60 % і шамот 40 %	135	75	70	25	100	130

Загальна тривалість випалу буде дорівнювати сумарному часу нагріву, витримки та охолодження.

**Задача 11.** Використайте допустимі перепади температур у масі при нагріві та охолодженні відповідних матеріалів (див. табл. 2.4) для розв'язання задачі:

Розрахуйте режим випалу рядової порожнистої цегли зі спондилової глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч,  $w_a = 4\%$ . Вага сухої цегли 3,5 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно  $0,3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

**Список літератури до розділу 2**

1. Кошкарєв В.Н. Тепловые установки: учебник / В.Н. Кошкарєв, А.А. Кучеренко. – К.: Вища школа, 1990.
2. Дуніков О.В. Методичні вказівки для курсового проектування і теплотехнічних розрахунків конвеєрних ліній по виробництву керамічних плиток / О.В. Дуніков, М.І. Рищенко. – Харків: ХДПУ, 2000. – 86 с.
3. Драганов Б.Х. Теплотехніка / Б.Х. Драганов, А.А. Долинський, А.В. Мінденко, К.М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.

4. Бордюженко О.М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2010.

5. Кошельник В.М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посіб. / В.М. Кошельник, Ю.В. Шульгін, О.В. Кошельник, В.В. Соловей. – Х.: НТУ «ХП», 2010.

6. Гоц В.І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В.І. Гоц, В.М. Кошкарьов, В.В. Павлюк, С.А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.

7. Нагорний А.О. Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 122 с.

### РОЗДІЛ 3. Основи розрахунку процесу сушіння

**Задача 1.** Визначити параметри сушильного агента, а також тривалість сушіння нормальної цегли (пластини) зі спондилової глини завтовшки 65 мм від початкової вологості 30 % до кінцевої 8 %. Температура поверхні матеріалу 40 °С.

Розв'язання задачі починають з визначення максимально припустимої швидкості сушіння. Для цього, користуючись табл. 3.1 для  $t_m = 40$  °С, обирають значення коефіцієнта  $A = 0,7$ , а з табл. 3.2 для виробу зі спондилової глини значення коефіцієнта  $K_c = 1,17$ .

Далі за відповідними розрахунками визначають усі необхідні параметри.

Таблиця 3.1

**Значення коефіцієнта  $A$  та парціальний тиск водяної пари  $p_{п}$  залежно від температури поверхні**

$t_m, ^\circ\text{C}$	30	35	40	45	50
$A$	0,53	0,62	0,7	0,75	0,8
$p_{п}, \text{H}/\text{M}^2$	4244	5225	7379	9587	12338

Таблиця 3.2

**Експериментальні дані  $K_c$**

Найменування матеріалу	$K_c$
Глина спондилова	1,17
Глина силідівська	1,13
Глина никифорівська	1,71
Глина часів'ярська	1,89
Глина часів'ярська 60 % + шамот 40 %	1,48
Каолін просянівський	0,74
Фарфорова маса з часів'ярською глиною	1,24

**Задача 2.** Скористайтесь табл. 3.1 та 3.2, а також  $I - d$  діаграмою для розв'язання задачі. Визначте тривалість сушіння цегли з силідівської глини завтовшки 65 мм, від початкової вологості 25 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

**Задача 3.** Визначити витрати тепла та повітря для сушіння будівельної цегли у тунельній сушарці продуктивністю 700 кг/год висушених виробів. Вироби висушуються від початкової вологості 20 % до кінцевої 6 %. Сушіння відбувається атмосферним повітрям з температурою 17 °С та відносною вологістю 70 %, підігрітим до 120 °С. Кінцева температура процесу сушіння 40 °С.

**Задача 4.** Визначити питомі витрати теплоти (кількість теплоти, витрачену на  $m$  кг вологи) при сушці в теоретичній сушарці за таких умов:

- а) температура зовнішнього повітря  $t_a$ , відносна вологість  $\varphi_a$ ;
- б) температура повітря після калорифера  $t_b$ ;
- в) у процесі сушки температура вологого повітря зменшується на  $\Delta t = 10$  °С.

Таблиця 3.3

**Параметри повітря  $t_a$  і  $\varphi_a$  вибрати (за варіантами)**

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	3	8	9	10
$t_a, ^\circ\text{C}$	25	20	15	30	25	10	35	20	15	10
$\varphi_a, \%$	15	10	25	20	35	15	10	25	20	35
$t_b, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$m, \text{кг}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Під час розрахунків сушарки спочатку виконують побудову процесів ( $a-b$  – нагрівання і  $b-c$  – сушки), що відбуваються у вологому повітрі на  $h-d$  – діаграмі. За допомогою діаграми знаходять значення вологовмісту  $d$  і ентальпії  $h$  вологого повітря в характерних точках  $a$ ,  $b$  і  $c$ , враховуючи, що  $d_a = d_b$ , а  $h_b = h_c$ . Знаходимо зростання вологовмісту повітря:

$$\Delta d = d_c - d_a, \text{ г/кг сухого повітря.}$$

Вологовміст повітря збільшується за рахунок видаленої з матеріалу вологи, причому, цю кількість вологи відбирає 1 кг повітря. Це дає можливість знайти масу повітря, необхідну для видалення 1 кг вологи з матеріалу:

$$M = \frac{1000}{\Delta d}, \text{ кг повітря.}$$

Кількість теплоти, витрачена на нагрівання 1 кг повітря:

$$\Delta h = h_b - h_a, \text{ кДж /кг сухого повітря.}$$

Загальна кількість теплоти, витрачена на нагрівання  $M$  кг повітря:

$$Q = M \cdot \Delta h, \text{ кДж.}$$

**Задача 5.** Визначити витрати тепла та сушильного агента для сушіння глини у барабанній сушарці продуктивністю 10 т/год по висушеній глині від початкової відносної вологості  $w_{\text{поч}} = 20\%$  до кінцевої  $w_{\text{к}} = 6\%$ . Сушіння відбувається топковими газами, розбавленими атмосферним повітрям у змішувальній камері на вході до барабана. Спалюється мазут марки ММ40. Початкова температура сушіння – 800 °С, кінцева – 110 °С. Початкові параметри атмосферного повітря: відносна вологість 70 %, температура 20 °С.

**Задача 6.** Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %:  $\text{CH}_4 - 93,2$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 - 4,4$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,8$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,6$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,3$ ;  $\text{CO}_2 - 0,1$ ;  $\text{N}_2 - 0,6$ ;
- теплотворність  $Q_p = 37\,293$  кДж/м<sup>3</sup>;
- дійсна витрата атмосферного повітря за  $\alpha = 1,2$ ,  $L\alpha = 12,86$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;
- об'єми продуктів згоряння за  $\alpha = 1,2$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:  $\text{CO}_2 - 1,06$ ;  $\text{N}_2 - 10,17$ ;  $\text{O}_2 - 0,62$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 2,26$ .

### Список література до розділу 3

1. Кошкарєв В.Н. Тепловые установки: учебник / В.Н. Кошкарєв, А.А. Кучеренко. – Киев: Вища школа, 1990.

2. Ралко А.В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / А.В. Ралко, А.А. Крупа, Н.Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.

3. Дуніков О.В. Методичні вказівки для курсового проектування і теплотехнічних розрахунків конвеєрних ліній по виробництву керамічних плиток / О.В. Дуніков, М.І. Рищенко. – Харків: ХДПУ, 2000. – 86 с.

4. Драганов Б.Х. Теплотехніка / Б.Х. Драганов, А.А. Долинський, А.В. Мінденко, К.М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.

5. Бордюженко О.М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2010.

6. Кошельник В.М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посіб. / В.М. Кошельник, Ю.В. Шульгін, О.В. Кошельник, В.В. Соловей. – Харків: НТУ «ХП», 2010.

7. Гоц В.І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В.І. Гоц, В.М. Кошкар'юв, В.В. Павлюк, С.А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.

8. Нагорний А.О. Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 122 с

9. Сардак Е.М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів: навч. посіб. / Е.М. Сардак, В.І. Голеус, О.В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.

10. Вінниченко В.І. Енергозбереження та екологія виробництва будівельних матеріалів: навч. посіб. / В.І. Вінниченко, Т.Г. Іващенко, О.М. Рязанов. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 212 с.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ралко А.В. Тепловые процессы в технологии силикатов: учебник / А.В. Ралко, А.А. Крупа, Н.Н. Племянников и др. – Киев: Выща школа, 1986. – 232 с.
2. Ралко А.В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / А.В. Ралко, А.А. Крупа, Н.Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.
3. Нагорний А.О. Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 122 с.
4. Шестаков В.Л. Задачі та вправи з технічної термодинаміки та теплових процесів технології будівельних матеріалів: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2006.
5. Гоц В.І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В.І. Гоц, В.М. Кошкар'юв, В.В. Павлюк, С.А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.
6. Сардак Е.М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів: навч. посіб. / Е.М. Сардак, В.І. Голеус, О.В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.
7. Кошкар'єв В.Н. Тепловые установки: учебник / В.Н. Кошкар'єв, А.А. Кучеренко. – К.: Вища школа, 1990.
8. Дуніков О.В. Методичні вказівки для курсового проектування і теплотехнічних розрахунків конвеєрних ліній по виробництву керамічних плиток / О.В. Дуніков, М.І. Рищенко. – Харків: ХДПУ, 2000. – 86 с.
9. Драганов Б.Х. Теплотехніка / Б.Х. Драганов, А.А. Долинський, А.В. Мінденко, К.М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
10. Бордюженко О.М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2010.
11. Кошельник В.М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посіб. / В.М. Кошельник, Ю.В. Шульгін, О.В. Кошельник, В.В. Соловей. – Х.: НТУ «ХП», 2010.

12. Бордюженко О.М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. – Рівне: НУВГП, 2010.

13. Вінниченко В.І. Енергозбереження та екологія виробництва будівельних матеріалів: навч. посіб. / В.І. Вінниченко, Т.Г. Іващенко, О.М. Рязанов. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 212 с.

Навчально-методичне видання

# ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Методичні вказівки  
до виконання практичних 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**

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

Підписано до друку 2023. Формат 60x84<sub>1/16</sub>  
Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.  
Електронний документ. Вид. № 45/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.