МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для студентів спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Технологія будівельних конструкцій,
виробів і матеріалів»

Київ 2023

УДК 66.041.001.24(075)
Т34

Укладач В.П. Азутов, канд. техн. наук, доцент

Рецензент О.Г. Гелевера, канд. техн. наук, доцент

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

Затверджено на засіданні кафедри технологій будівельних конструкцій і виробів, протокол № 9 від 09 червня 2022 року.

В авторській редакції.

Теплові процеси і установки у виробництві будівельних
Т34 матеріалів і виробів: методичні вказівки до виконання практичних робіт / уклад.: В.П. Азутов. – Київ: КНУБА, 2023 – 24 с.

Містять загальні положення, завдання та послідовність виконання практичних робіт щодо визначення параметрів теплових і масообмінних процесів в установках для теплової обробки будівельних матеріалів та конструкцій.

Призначено для студентів спеціальності 192 освітньо-професійної програми «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів».

©КНУБА, 2023

Загальні положення

Згідно з робочою програмою у процесі вивчення курсу «Теплові процеси і установки у виробництві будівельних матеріалів і виробів» студенти 2-го і 3-го курсів виконують практичні роботи за такими темами:

- теплові процеси при тепловологій обробці;
- теплові процеси при прогріванні заповнювачів;
- визначення термодинамічних параметрів атмосферного повітря;
- визначення аеродинамічного опору садки виробів.

Мета виконання практичних робіт – сприяти більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу курсу «Теплові процеси і установки у виробництві будівельних матеріалів і виробів» з питань теплових і термодинамічних процесів у технології виробництва будівельних матеріалів і залізобетонних виробів.

У процесі виконання практичних робіт студенти виконують розрахунки теплотехнічних показників робочого середовища та параметрів будівельних матеріалів, які піддаються тепловій обробці.

Розрахунково-графічні вправи

Вправа № 1. Властивості і процеси ідеального газу. Маса газу m, кг із початковим тиском $p_{1абс.}$ = 0,1 МПа і початковою температурою t, °С стискається і зменшується в об'ємі в ε разів. Стиснення здійснюється по ізотермі, адіабаті, політропі з показником політропи n.

Визначити для кожного процесу:

– початковий і кінцевий об'єми газу;

– тиск і температуру газу наприкінці стиснення;

– зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії газу;

– роботу стиснення;

– кількість відведеної або підведеної теплоти в процесі.

Вказати, який процес стиснення є найбільш вигідним (по роботі, що витрачається).

Зобразити відносне розташування цих процесів в pv- і Ts-діаграмах. На графіках процесів вказати числові значення отриманих параметрів.

Рід газу, ступінь стиснення ε і початкову температуру вибрати за останньою цифрою шифру залікової книжки з табл. 1.1. Масу газу m і показник політропи n вибрати за передостанньою цифрою шифру залікової книжки.

Результати розрахунків звести в табл. 1.2.

Таблиця 1.1

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Газ	Повітря	SO_2	N_2	He	Ne	CO	Ar	H_2	O_2	CH_4
ε	17	6	9	11	8	15	14	4	7	13
t, °С	57	47	17	67	37	27	77	87	37	7
m, кг	6	5	7	9	5	11	20	13	15	14
n	1,55	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,45	1,5	1,6	1,1

Таблиця 1.2

Процес	Розрахункові величини								
	v_1, м^3/кг	v_2, м^3/кг	p_2, МПа	t_2, °С	L, кДж	Q, кДж	ΔU, кДж	ΔH, кДж	ΔS, кДж/К
Ізотермічний									
Адіабатний									
Політропний									

Приклад вибору завдання за останніми двома числами залікової книжки (шифру) для варіанта 75 для всіх завдань позначено жирним шрифтом.

Вправа № 2. Газова суміш задана в об'ємних долях, знаходиться в балоні ємністю v, м^3 при тиску p_1 і температурі 27 ˚С. Внаслідок випускання газу в атмосферу тиск в балоні падає до p_2, а температура до 10 ˚С.

Визначити середню молекулярну масу суміші, газову постійну суміші, масу газу, випущену з балона в атмосферу, об'ємну теплоємність суміші (при $V=const$). Атмосферний тиск прийняти рівним 760 мм.рт.ст.

Необхідні дані взяти з табл. 2. Склад газової суміші в об'ємних долях взяти за останньою цифрою шифру, а v, p_1, p_2 – за передостанньою.

Таблиця 2

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	3	8	9	0
r_{CO_2},%	12,0	10,1	10,2	6,3	-	47,5	6,6	-	13,8	4,9
r_{O_2},%	3,3	12,2	17,5	11,9	10,4	13,4	4,0	18,1	4,6	6,3
r_{N_2},%	80,7	72,7	70,3	75,8	81,2	-	86,4	76,2	-	-
r_{H_2O},%	4,0	-	-	6,0	2,2	25,0	3,0	-	40,0	60,0
r_{H_2O},%	-	5,0	2,0	-	6,2	14,1	-	5,7	41,6	28,8
v, м^3	4,0	5,1	16,2	8,3	25,4	12,4	3,6	9,3	14,8	27,9
p_1, МПа	4,0	2,5	2,0	1,6	1,2	1,0	0,8	0,3	0,6	0,4
p_2, МПа	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,08	0,06	0,02

Вправа № 3. 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 φ_a;

б) температура повітря після калорифера t_b;

в) в процесі сушки (адіабатного насичення повітря водяною парою при h =Const) температура вологого повітря зменшується на Δt = 10 °С;

Параметри повітря t_a і φ_a вибрати за останньою цифрою шифру, а t_b, m – за передостанньою (табл. 3).

Таблиця 3

Величина	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	3	8	9	0
t_a, °С	25	20	15	30	25	10	35	20	15	10
φ_a, %	15	10	25	20	35	15	10	25	20	35
t_b, °С	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
m, кг	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Методика виконання розрахунково-графічних робіт

Вправа 1. Ізотермічний процес ($T = const$).

1. З рівняння Клапейрона-Менделеєва $p_1V_1 = RT_1$ визначаємо v_1:

$$V_1 = \frac{RT}{p_1}, \quad м^3/кг,$$

де R – питома газова стала, $R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu}$, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$.

2. Визначаємо питомий об’єм v_2 :

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon}, \quad м^3/кг.$$

3. З рівняння процесу $p_1V_1 = p_2V_2$ визначаємо p_2:

$$p_2 = \frac{p_1V_1}{V_2}, \quad \text{Па}.$$

4. Визначаємо калоричні параметри процесу *ΔU*, *ΔH*:

$$\Delta U = c_V \Delta T = 0 \quad ;$$

$$\Delta H = c_p \Delta T = 0 .$$

5. Визначаємо питому роботу процесу:

$$l = \int_{V_2}^{V_1} p dv = RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad \frac{Дж}{кг} .$$

6. Визначаємо питому кількість теплоти, необхідну для здійснення процесу:

$$q = \Delta U + l ,$$

де $\Delta U = 0$, тоді $q = l$, $\frac{Дж}{кг}$.

7. Визначаємо зміну питомої ентропії в процесі:

$$ds = \int \frac{dq}{T} = \frac{1}{T} \int dq = \frac{q}{T}, \quad \frac{Дж}{кг \cdot К} .$$

8. Визначаємо повні величини *L*, *Q*, *ΔS*, помноживши питомі величини *l*,*q*,*ds* на масу *m*.

9. Графіки ізотермічного процесу схематично зображуємо в *pv*, *Ts*-координатах.

Адіабатний процес ($s = const ; q = 0$)

10. Аналогічно ізотермічному процесу з рівняння $p_1 V_1 = RT_1$ визначаємо v_1.

11. Аналогічно ізотермічному процесу визначаємо v_2.

12. З рівняння стану процесу $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$ визначаємо p_2:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k , \quad Па;$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{R}, \quad К.$$

де k – показник адіабати (коефіцієнт Пуассона), який має такі приблизні величини: для одноатомних газів – 1,67; для двоатомних – 1,4; для триатомних – 1,29.

$$k=c_p/c_v.$$

4. Визначаємо питомі калоричні параметри процесу Δh, Δu:

$$\Delta h = c_p \Delta T, \quad \frac{Дж}{кг},$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність газу, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$, визначаємо з дод. 3 за середньою температурою;

$$\Delta u = c_V \Delta T, \quad \frac{Дж}{кг},$$

де c_V – масова ізохорна теплоємність газу, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$,

5. Визначаємо питому роботу процесу:

$$l = \frac{R(T_2 - T_1)}{k-1}, \quad \frac{Дж}{кг}.$$

6. Питома кількість теплоти в адіабатному процесі: q=0.

7. Зміна питомої ентропії в процесі: $ds = 0$.

8. Визначаємо повні величини L, ΔU, ΔH аналогічно ізотермічному процесу.

9. Графіки адіабатного процесу схематично зображуємо в pv, Ts-координатах.

Політропний процес (C_n=const)

1. Аналогічно ізотермічному процесу з рівняння $p_1V_1 = RT_1$ визначаємо v_1.*4*

2. Аналогічно ізотермічному процесу визначаємо v_2.

3. З рівняння стану процесу $p_1V_1^n = p_2V_2^n$ визначаємо p_2:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n , \quad Па;$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{R} , \quad К.$$

4. Визначаємо питомі калоричні параметри процесу Δh, Δu аналогічно адіабатному процесу.

5. Визначаємо питому роботу процесу:

$$l = \frac{R(T_2 - T_1)}{n-1} , \quad \frac{Дж}{кг} .$$

6. Питома кількість теплоти в адіабатному процесі:

$$q = c_n \Delta T , \quad \frac{Дж}{кг} ,$$

де c_n – теплоємність в політропному процесі, визначаємо за залежністю:

$$c_n = \frac{c_V (n-k)}{n-1} , \quad \frac{Дж}{кг \cdot К} .$$

7. Зміна питомої ентропії в процесі визначаємо за залежністю:

$$\Delta S = c_n \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} , \quad \frac{Дж}{кг \cdot К} .$$

8. Визначаємо повні величини L, ΔU, ΔH, ΔS аналогічно ізотермічному процесу.

9. Графіки політропного процесу схематично зображуємо в pv, Ts-координатах. Зображення політропного процесу залежить від показника політропи n [1].

Розрахункові величини за всіма процесами зводимо в табл. 1.2. Робимо висновок, який процес стиснення є найбільш вигідним (по роботі, що витрачається).

Вправа 2.

1. Визначаємо середню молекулярну масу суміші $\mu_{сум}$ (за залежностями, наведеними в дод. 1.)

2. Визначаємо газову сталу суміші

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{сум}}},$$

де R_{μ} – універсальна газова стала, $R_{\mu} = 8314 \frac{Дж}{кмоль \cdot К}$.

3. Визначаємо об'ємну теплоємність суміші $C'_{сум}$, $\frac{Дж}{м^3 \cdot К}$ (за залежностями, наведеними в дод. 1. Об'ємні теплоємності окремих газів визначаємо за дод. 4).

4. Визначаємо масу газу, випущену з балона в атмосферу. Газова суміш міститься в балоні при *V=const*. Для різних станів суміші рівняння Клапейрона–Менделєєва має вигляд:

$$P_1 \cdot V = m_1 R_{сум} \cdot T_1;$$

$$P_2 \cdot V = m_2 R_{сум} \cdot T_2,$$

де Т – абсолютна температура. $T\left[{}^0K\right] = t\left[{}^0C\right] + 273.15$.

Розв'язавши обидва рівняння відносно мас, знаходимо величину:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{V}{R_{сум}} \cdot \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right), \quad кг.$$

Вправа 3.

Під час розрахунків сушарки спочатку виконують побудову процесів (*a-b* – нагрівання і *b-c* – сушки), що відбуваються у вологому повітрі на *hd* – діаграмі (дод. 2). 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:

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

Вправа 4

Визначити опір газового тракту, виходячи з таких даних:

Номер варіанта	Довжина, м	Температура газів, °С	Температура повітря, °С	Висота каналу, м	Швидкість газів, ω, м/с	Поперечний переріз, мм (а х в)	Місцевий опір (к-сть прямих кутів)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	20	200	-20	10	2,0	200х300	5
2	40	250	-15	15	2,5	200х400	6
3	60	300	-10	20	3,0	300х400	7
4	80	350	-5	25	3,5	300х500	8
5	100	400	0	30	4,0	400х400	9
6	110	450	+5	35	4,5	400х500	10
7	120	500	+10	40	5,0	400х600	11
8	130	550	+15	45	5,5	500х500	12
9	140	600	+20	50	6,0	500х600	13
10	150	650	+25	55	6,5	500х700	14

Розв’язання вправи передбачає визначення повного аеродинамічного опору теплової установки або її вентиляційних систем.

Структура роботи і послідовність виконання

1. Складання схеми повітропроводів і вентиляційних каналів.
2. Визначення опору ходу повітря і газів.

Для виконання роботи викреслюють схему газоходів і повітропроводів із зазначенням довжин та розмірів ділянок.

Опір руху повітря і газів складається із витрат на тертя і місцевого опору.

Витрати на тертя в прямих каналах $P_{тер}$ залежать від їх довжин і поперечного перерізу, динамічного тиску і дослідного коефіцієнта тертя, який залежить від жорсткості каналу й числа Рейнольдса, Н/м^2:

$$P_{тер} = \beta \frac{l}{d} \frac{\vartheta^2}{2} P_0 (1 + t_2/273)[(t_2 + 273)/(t_{ст} + 273)]^{0,573}. \quad (1)$$

За відсутності теплового обміну на відрізку останній множник опускають.

При русі у каналі не круглого перерізу замість діаметру ставлять еквівалентний діаметр:

$$d_e = 4f/P, \quad (2)$$

де f – площа перерізу, м^2; P – периметр каналу, м.

Для каналів прямокутного перерізу $d_e = 2ав/(а+в)$, число Рейнольдса $Re = \frac{\omega \ell}{\nu}$, *де* ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості газів, м^2/с, який залежить від температури.

Втрати місцевих опорів, Н/м^2:

$$P_м = \xi \cdot \rho_0 \cdot \omega^2/2 \cdot (1+t/273). \quad (3)$$

Таблиця місцевих опорів ξ наведена в [1, с. 54, рис. 9].

Самотяга являє собою геометричний тиск вертикального або похилого відрізків газоходу. Її розраховують за формулою, Н/м^2:

$$P_c = H \cdot g \left(\frac{\rho_{оп}}{1+{}^{t_1}/_{273}} - \frac{\rho_{ог}}{1+{}^{t_2}/_{273}} \right), \quad (4)$$

де H – висота каналу, м; $\rho_{оп}$ – густина повітря, кг/м^3, t_1 – температура повітря, t_2 – температура газу, ºС.

Самотяга допомагає руху газів і перешкоджає йому, якщо газ проходить вниз вертикальною ділянкою.

Загальний опір руху газів теплової установки визначають як суму затрат місцевих і на тертя:

$$P_з = \Sigma P_{тер} + \Sigma P_м + \Sigma P_с \qquad (5)$$

Приклад роз'вязання вправи № 4

Визначити опір прямокутного каналу ℓ = 40 м перерізом 500х300 мм, якщо наведена швиідкість руху газів ω=2 м/с при t = 300 ºС, кількість прямих кутів – 5.

Вертикальний канал висотою 50 м, температура повітря +20 ºС. Густина повітря і газів відповідно $\rho_{оп}$ = 1,2 кг/м^3, $\rho_{ог}$ = 1,3 кг/м^3

За умовами прикладу $P_{сад}$ = 0. Затрати на тертя за довжиною газоходу визначають за формулою (1).

Для цегляних каналів β = 0,05.

Для металевих повітряпроводів β = 0,045.

Еквівалентний діаметр

$$d_e = 2ab/(a+b) = 2\cdot0,6\cdot0,3/(0,5+0,3) = 0,376.$$

Густина повітря ρ = 1,2 кг/м^3.

$$P_{тер} = 0,05 \cdot 40/0,376 \cdot 4,2 \cdot 1,2\ (1+300/273) = 26\ Н/м^2.$$

Місцеві опори, Н/м^2:

$$P_м = \Sigma\xi\cdot\omega^2/2\cdot\ \rho_0(1+t_2/273)=1,2\cdot5\cdot4/2(1+300/273)=30,4\ Н/м^2.$$

$$P_с = 509,8[1,2/(1+20/273) - 1,3/(1+500/273)]=364\ Н/м^2.$$

Загальний опір

$$P_з = P_{тер}+P_м+P_с=26,0+30,4+364=42,04\ Н/м^2.$$

Вправа 5.

Визначити температурні параметри у бетоні виробу під час теплової обробки, виходячи з таких даних:

Виріб: ребриста панель з розмірами в мм:

- довжина – 6820, ширина – 3280, товщина – 310;
- об'єм бетону у виробі 3,14 $м^3$
- щільність бетону ρ= 2400 $кг/м^3$
- коефіцієнт теплопровідності λ =1,56 Вт/(м·ºС)
- коефіцієнт теплоємності с= 0,84 кДж/(кг·ºС)
- бетон В15.

Методика виконання вправи 5

Завдання розв'язуємо за таким порядком:

Виходячи з типу залізобетонного виробу, його об'єму, геометричних розмірів визначаємо приведену товщину виробу, яка буде позначатися як 2R, тому що температура визначається у центрі виробу, тобто на відстані від поверхні як R. Для суцільних виробів це буде просто товщина, а для просторових і ребристих розрахункова товщина буде визначатися діленням об'єму виробу на його площу.

Визначаємо режим ТВО за нормативними документами, а також з підручнику [3 табл.4…10]:

$$\tau_1+\tau_2+\tau_3.,$$

де τ_1; τ_2; τ_3 – відповідно часи підйому температури, ізотермічного витримування і охолодження в тепловому агрегаті (год)

Загальна тривалість циклу ТВО $\tau_ц$ визначається як:

$$\tau_ц=\tau_{зав.}+\tau_{попер.}+\tau_1+\tau_2+\tau_3+\tau_{раз}, \quad (1)$$

де $\tau_{зав}$ $\tau_{попер}$ $\tau_{раз}$ – час на завантаження, попереднього витримування і розвантаження теплового агрегату

Після цього визначаємо температурні параметри у бетоні виробу під час теплової обробки на практичному прикладі:

1. Режим ТВО визначаємо за нормативними документами:

У нашому випадку це: $\tau_1+\tau_2+\tau_3$=3+5+2=10 год.

2. Загальна тривалість циклу ТВО:

$\tau_ц=\tau_{заг.}+\tau_{пред.}+\tau_1+\tau_2+\tau_3+\tau_{раз.}$= 0,5+1+(3+5+2)+0,5=12 год.

Технологічний розрахунок установки

1. Розрахункова товщина виробу 2R=0,14м; (3,14/6,82/3,28); R=0,07 м

2. Швидкість підйому температури середовища в камері $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{85-20}{3} =$ 21,67 ºС/год. Протягом 3 годин, де 20 і 85 температури початкова (у цеху) і максимальна при ізотермічному витримуванні, ºС;

3. Кількість годин, які прийнята для визначення температури у середовищі камери під час обробки виробів по стадіям, год: $\tau_{1\text{-}i} = \frac{\tau 1}{3} = \frac{3}{3} =$ 1 год.

4. Температура середовища в кінці кожної стадії,

$$t''_{1\text{-}i} = t'_{1\text{-}i} + \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \cdot \tau 1 - i \quad ^{o}C,$$

де $t'_{1\text{-}i}$ – температура середовища на початку стадії.

$t''_{1\text{-}1}$=20+21,67 ·1=41,67 ºС;

$t''_{1\text{-}2}$=41,67+21,67 ·1=63,34 ºС;

$t''_{1\text{-}3}$=63,34+21,67 ·1=85,01 ºС.

5. Середня температура середовища в стадії: $t_{1\text{-}i}$=0,5($t'_{1\text{-}i}$+ $t''_{1\text{-}i}$)

$t_{1\text{-}1}$=0,5(20+41,67)=30,835 ºС;

$t_{1\text{-}1}$=0,5(41,67+63,34)= 52,505 ºС;

$t_{1\text{-}1}$=0,5(63,34+85,01)= 74,175 ºС.

З огляду на вище викладені розрахунки будуємо графік ТВО (рис. 1)

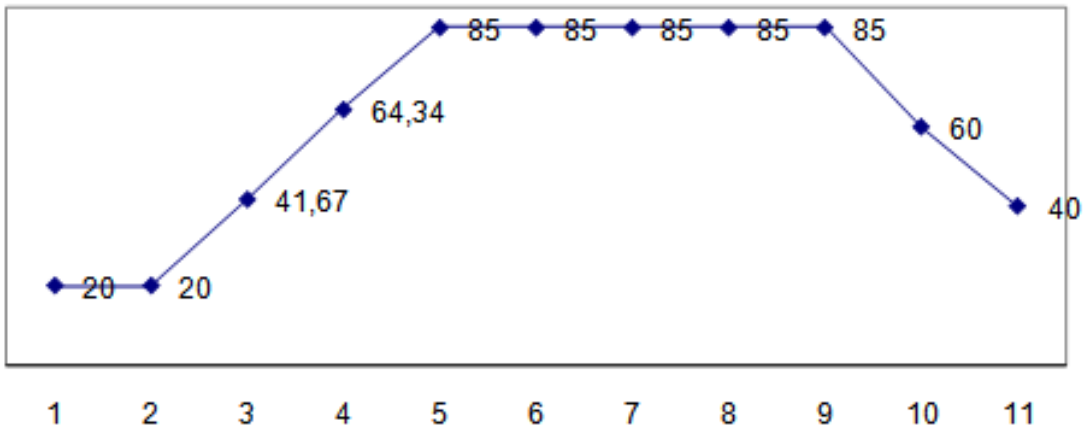


Рис. 1. Графік ТВО

Для нестаціонарного режиму, який характеризується зміною температур точок тіла за часом з використанням критерії Фур'є і Біо. визначаємо температурні параметри центру вироба і на його поверхні по стадіях за допомогою графіків (рис. 22) [1] (див. додаток).

1. Період нагріву

Перша стадія

1. Критерій Біо: $Bi_{1-1}=\frac{\alpha \cdot R}{\lambda_м}=70\cdot 0,07/1,56=6,28.$

2. Критерій Фур'є: $F_0=\alpha\cdot\tau/R^2=0,0028\cdot 1/0,07^2=0,571;$

$$\alpha=3,6\cdot\lambda_м/(c\cdot\rho)= 3,6\cdot 1,56/(0,84\cdot 2400)=0,0028.$$

3. Безрозмірна температура $\theta^ц=0,52$; $\theta^п=0,13.$

4. Температура центра виробу в кінці стадії:

$$t^ц_{1-1}= t_{1-1}- \theta^ц(t_{1-1}-t_1)= 30,835-0,52\ (30,835-20)=25,2\ ºC.$$

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

$$t^п_{1-1}= t_{1-1}- \theta^п(t_{1-1}-t_1)= 30,835-0,13\ (30,835-20)=29,43\ ºC.$$

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

$$t_{б1-1}=0,67\cdot t^ц+0,33\cdot t^п= 0,67\cdot 25,2+0,33\cdot 29,43=26,6ºC.$$

Друга стадія

1. Критерій Біо: $Bi_{1-1}=\frac{\alpha \cdot R}{\lambda_м}=90\cdot 0,07\ /1,56=4,04.$

2. Критерій Фур'є: $F_0=\alpha\cdot\tau/R^2=0,0028\cdot 1/0,07^2=0,57:$

$$\alpha=3,6\cdot\lambda_м/(c\cdot\rho)= 3,6\cdot 1,56/(0,84\cdot 2400)=0,0028.$$

3. Безрозмірна температура $\theta^ц=0,53$; $\theta^п=0,18.$

4. Температура центра виробу в кінці стадії:

$$t^ц_{1-2}= t_{1-2}- \theta^ц(t_{1-2}-t_{1-1})= 52,505\ -0,53\ (52,505\ -25,2)=38,03\ ºC.$$

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

$$t^п_{1-2}= t_{1-2}- \theta^п(t_{1-2}-t_{1-1})= 52,505\ –0,18\ (52,505\ –29,43)=48,35\ ºC.$$

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

$$t_{б1-2}=0,67\cdot t^ц+0,33\cdot t^п= 0,67\cdot 38,03\ +0,33\cdot 48,35=41,44ºC.$$

Третя стадія

1. Критерій Біо: $Bi_{1-1}=\frac{\alpha \cdot R}{\lambda_м}=110\cdot 0{,}07/1{,}56=4{,}94$.
2. Критерій Фур'є: $F_0=\alpha\cdot\tau/R^2=0{,}0028\cdot 1/0{,}07^2=0{,}57$;

$\alpha=3{,}6\cdot\lambda_м/(c\cdot\rho)= 3{,}6\cdot 1{,}56/(0{,}84\cdot 2400)=0{,}0028$.

3. Безрозмірна температура $\theta^ц=0{,}55$; $\theta^п=0{,}17$.
4. Температура центра виробу в кінці стадії:

$t^ц_{1\text{-}3}= t_{1\text{-}3}- \theta^ц(t_{1\text{-}3}-t_{1\text{-}2})= 74{,}175 -0{,}55\ (74{,}175 -38{,}03)=54{,}3$ ºС.

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

$t^п_{1\text{-}3}= t_{1\text{-}3}- \theta^п(t_{1\text{-}3}-t_{1\text{-}2})= 74{,}175 -0{,}17(74{,}175 -48{,}35)=69{,}78$ ºС.

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

$t_{б1\text{-}3}=0{,}67\cdot t^ц+0{,}33\cdot t^п= 0{,}67\cdot 54{,}3 +0{,}33\cdot 69{,}78 =58{,}8$ ºС.

2. Період ізотермічного витримування

1. Критерій Біо: $Bi_{1-1}=\frac{\alpha \cdot R}{\lambda_м}=120\cdot 0{,}07/1{,}56=5{,}38$.
2. Критерій Фур'є: $F_0=\alpha\cdot\tau/R^2=0{,}0028\cdot 4/0{,}07^2=2{,}28$;

$\alpha=3{,}6\cdot\lambda_м/(c\cdot\rho)= 3{,}6\cdot 1{,}56/(0{,}84\cdot 2400)=0{,}0028$.

3. Безрозмірна температура $\theta^ц=0{,}1$; $\theta^п=0{,}05$.
4. Температура центра виробу в кінці стадії:

$t^ц_2= t_2- \theta^ц(t_2-t^ц_{1\text{-}3})= 85 -0{,}1\ (85 -54{,}3)=81{,}93$ ºС.

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

$t^п_2= t_2- \theta^п(t_2-t^п_{1\text{-}3})= 85 -0{,}05(85 -69{,}78)=84{,}24$ ºС.

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

$t_{б2}=0{,}67\cdot t^ц+0{,}33\cdot t^п= 0{,}67\cdot 81{,}93 +0{,}33\cdot 84{,}24 =82{,}69$ ºС.

На базі графіка ТВО (рис. 1) будуємо графіки зміни температурних параметрів у виробі в центрі та на його поверхні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.

2. Кокшарев В.А. Тепловые установки / В.А. Кокшарев, А.А. Кучеренко. – К.: Вища шк., 1990. – 335 с.

3. Кучеренко А.А. Тепловые установки сборного железобетона. – К.: Вища шк., 1977. – 280 с.

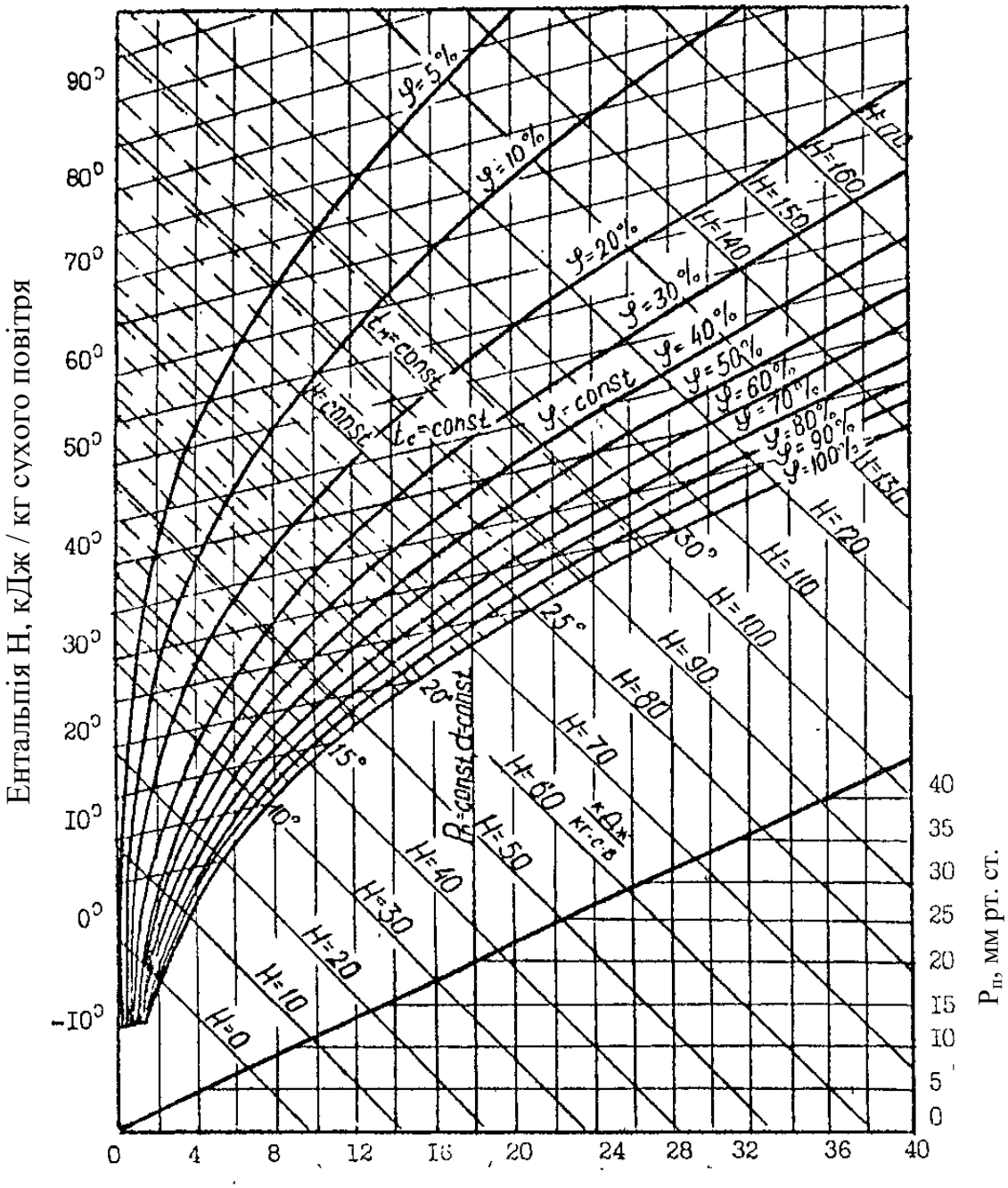
4. Вознесенский А.А. Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1964.

Додатки

Додаток 1
Таблиця 1

Розрахункові залежності для газових сумішей

Заданий склад суміші	Визначуваний склад суміші	Середня молярна маса суміші, μ_c, кг/кмоль	Питома газова стала суміші, R_c, Дж/(кг·К)
Масовий g_i	$r_i = \dfrac{\dfrac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^{n} \dfrac{g_i}{\mu_i}}$	$\dfrac{8314}{R_c}$ $\dfrac{1}{\sum_{i=1}^{n} \dfrac{g_i}{\mu_i}}$	$\dfrac{8314}{\mu_c}$ $\sum_{i=1}^{n} g_i R_i$
Об'ємний r_i	**Масовий** $g_i = \dfrac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i}$	$\dfrac{8314}{R_c}$ $\sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i$	$\dfrac{8314}{\mu_c}$ $\dfrac{1}{\sum_{i=1}^{n} \dfrac{r_i}{R_i}}$



Hd – діаграма вологого повітря

Додаток 3

Таблиця 3.1

Середня масова теплоємність газів при сталому тиску

c_p, кДж/(кг·К)

t, °C	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	H_2	SO_2	Повітря
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	14,195	0,607	1,0036
100	0,9232	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	14,353	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	14,421	0,662	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	14,446	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	14,477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	14,509	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	14,542	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	14,587	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	14,641	0,762	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	14,706	0,775	1,0815
1000	1,0350	1,1078	1,1304	1,1225	2,1430	14,776	0,783	1,0907

Таблиця 3.2

Середня об'ємна теплоємність газів при сталому об'ємі

c'_v, кДж/($м^3$·К)

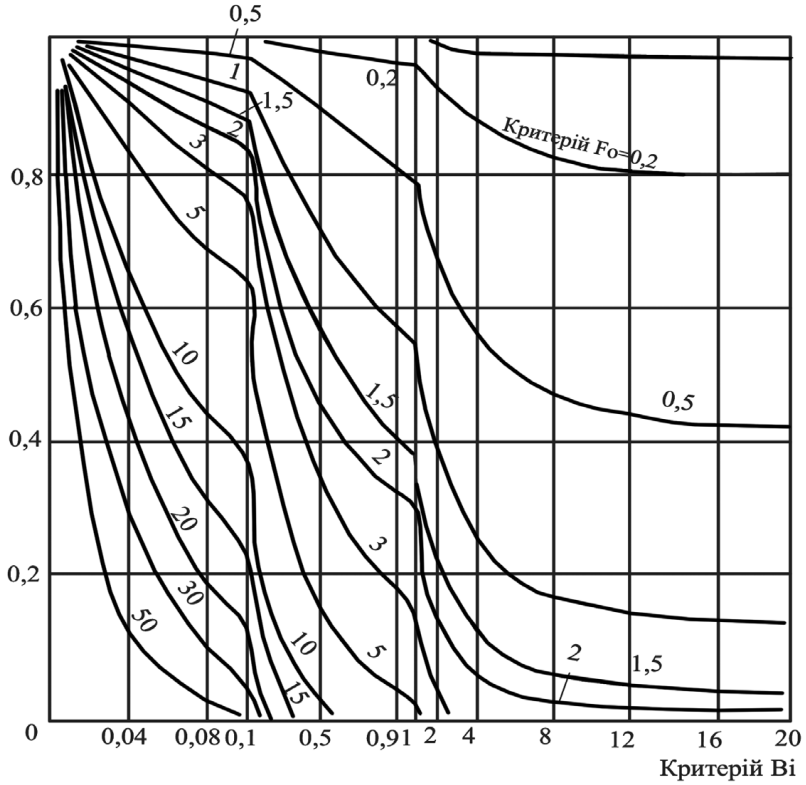
t, °C	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	H_2	SO_2	Повітря
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	0,9056	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	0,9198	1,440	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	0,9261	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	0,9282	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	0,9311	1,645	0,9579
500	1,0270	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	0,9341	1,700	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	0,9370	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	0,9412	1,779	0,9998
800	1,0789	0,9960	1,0153	1,7601	1,2971	0,9458	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	0,9516	1,842	1,0262
1000	1,1056	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	0,9579	1,867	1,0387

Таблиця 3.3

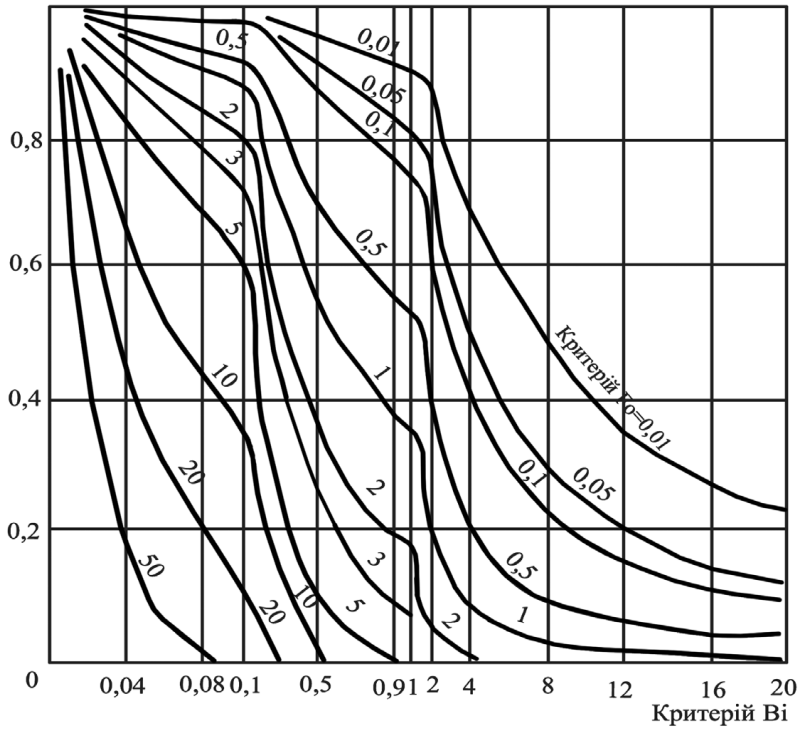
Молекулярні маси газів, μ, кг/моль

O_2-32,00	N_2-28,026	CO-28,01	He-4,003	Ne-20,17
H_2-2,016	SO_2-64,06	CH_4-16,032	Ar-39,994	Повітря-28,96
H_2O-18,016	CO_2-44,01	NH_3-17,032		

а)



б)



Графіки для визначення температури центру (а) та на поверхні (б) виробу

Для нотаток

Навчально-методичне видання

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для студентів спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Технологія будівельних конструкцій,
виробів і матеріалів»

Укладач **АЗУТОВ** Володимир Павлович

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

Підписано до друку 08.05.2023. Формат $60x84_{1/16}$
Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Електронний документ. Вид. № 43/ІІІ-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.