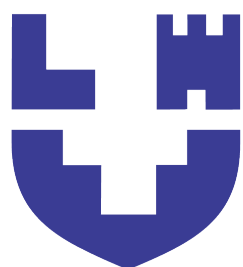


Міністерство освіти та науки України



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

УСТАТКУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг»
спеціальності G8 Матеріалознавство
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
денної та заочної форм навчання

Луцьк
2025

УДК 621.783.2(07)

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до друку вченою радою факультету митної справи, матеріалів та технологій ЛНТУ, протокол №__ від «__» _____ 2025 року.
Голова вченої ради ЛНТУ _____ В. В. Ткачук

Укладачі: _____ Мисковець С.В., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ
_____ Гусачук Д.А., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Рецензент: _____ Зайчук Н.П., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Імбірович Н.Ю., д.т.н.,
завідувачка кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Устаткування процесів теплової обробки [текст] : Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм
У79 «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 40 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Устаткування процесів теплової обробки з метою визначення завдань щодо практичних занять та надання методичної допомоги студентам у процесі виконання. Приведені основи теоретичного матеріалу з курсу і загальні вказівки оформлення робіт.

© Мисковець С.В., Гусачук Д.А., 2025

Загальні вказівки

Практична частина дисципліни "Устаткування процесів теплової обробки" складається з шести практичних занять.

Основна увага приділяється розрахункам горіння палива, нагріву металу, рекуператорів; вивченню й вибору пристроїв для спалювання газоподібного та рідкого палива; складанню теплового балансу печі.

При підготовці до виконання кожного заняття студент повинен:

- вивчити відповідні теоретичні розділи літератури, вказаної в учбовому плані;
- ознайомитись з описом практичного заняття;
- скласти таблиці для запису результатів;
- засвоїти правила техніки безпеки при роботі з приладами і обладнанням.

Готовність студента до виконання практичного заняття перевіряє викладач. Якщо студент не знає змісту і методики проведення практичного заняття, то він не допускається до його виконання.

По кожному заняттю студент складає індивідуальний звіт, який повинний містити принципові схеми і результати досліджень, розрахунків у вигляді таблиць, графіків, виконаних олівцем з застосуванням креслярських інструментів. Звіт оформляється на стандартних листах паперу. В кінці звіту наводяться висновки, сформульовані студентом самостійно. Звіти повинні бути підшиті під однією обкладинкою і пред'явлені викладачу. Вони слугують основою для здачі заліку по практикуму.

Студент повинен мати міцні знання по відповідних розділах дисципліни, вміти використовувати методи експериментального дослідження і розрахунку. В протилежному випадку робота вважається не зарахованою. До повторного заліку студент допускається не раніше, як через 7-10 днів.

Практичне заняття № 1**Розрахунок горіння палива**

Мета заняття: набути навиків у розрахунку горіння палива

Теоретичні відомості

При розрахунку горіння палива визначається:

- 1) теплотворність палива;
- 2) кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива;
- 3) кількість і склад утворених при цьому продуктів горіння (димових газів);
- 4) температура горіння палива.

Теплотворність палива.

Теплотворність для рідкого і твердого палива визначається за формулою:

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p - (O^p - S^p) - 250W^p \text{ кДж/кг}, \quad (1.1)$$

для газоподібного за формулою:

$$Q_n^p = 127CO + 108H_2 + 234H_2S + 357CH_4 + \sum Q \frac{C_m H_n}{100} \text{ кДж/м}^3, \quad (1.2)$$

В формулах (1.1) і (1.2) C^p, H^p, CO, H_2 і т.д. – процентний вміст відповідних компонентів в паливі. Член $\sum Q \frac{C_m H_n}{100}$ у формулі (1.2) виражає суму добутків теплоти згорання компонентів газу (ацетилен, етилен, етан та ін.) на їх процентний вміст в газі.

Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива.

Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива для твердого палива і мазуту:

$$L_o = \alpha_n L_m, \quad (1.3)$$

для газоподібного палива:

$$L_{\partial} = \alpha_n L_0, \quad (1.4)$$

де α_n – коефіцієнт витрат повітря

L_m – теоретична кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці твердого і рідкого палива:

$$L_m = \left[0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p \right] \times \\ \times (1 + 0,00124d_n) \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.5)$$

L_0 – теоретична кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці газоподібного палива.

$$L_0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \right. \\ \left. + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] (1 + 0,00124d_n) \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.5)$$

Де C^p, H^p, O^p, CO, H_2 і т.д. – вміст відповідних компонентів у паливі, %;

d_n – волого вміст сухого повітря, г/м³.

Звичайно в розрахунках d_n приймається рівним 10 г/м³.

Кількість і склад продуктів повного спалювання палива.

Для твердого і рідкого палива:

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.7)$$

$$V_{H_2O} = 0,112H^p + 0,0124W^p + 0,00124L_{\partial}d_n \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.8)$$

$$V_{SO_2} = 0,007S^p \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.9)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha_n - 1)L_m \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.10)$$

$$V_{N_2} = 0,008N^p + 0,79L_{\partial} \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (1.11)$$

Для газоподібного палива:

$$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m C_m H_n) 0,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.12)$$

$$V_{H_2O} = (H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O + 0,124 L_\delta d_n) 0,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.13)$$

$$V_{SO_2} = 0,01 H_2S \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.14)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha_n - 1) L_0 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.15)$$

$$V_{N_2} = (N_2 + 79 L_\delta) 0,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.16)$$

Сумарний об'єм продуктів горіння:

$$V_\delta = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (1.17)$$

Відсотковий склад продуктів горіння:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_\delta} 100\% \text{ і т.д.} \quad (1.18)$$

Температура горіння палива.

Калориметрична температура горіння визначається за формулою:

$$t_k = \frac{Q_n^p + Q_\phi - Q_n}{V_\delta C_0^{t_k}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.19)$$

де Q_ϕ – фізичне тепло, яке вноситься підігрітим повітрям і газом, кДж/м³ або кДж/кг палива;

Q_n – втрати тепла від неповного спалювання палива, кДж/м³ або кДж/кг палива;

$C_0^{t_k}$ – середня теплоємність продуктів горіння в інтервалі температур $0 - t_k$, кДж/м³·град.

В свою чергу, величина

$$Q_\phi = L_\delta i_n + i_z \text{ кДж} / \text{м}^3 \quad (1.20)$$

де i_n і i_2 – тепловміст відповідно повітря і газоподібного палива кДж/м³.

Величина t_k визначається по формулі (1.19) методом послідовного наближення в зв'язку з необхідністю визначення теплоємності по величині t_k .

Приблизно значення дійсної температури горіння t_d можна визначити по пірометричному коефіцієнту η_{nir} , який являє собою відношення дійсної температури горіння до калориметричної:

$$\eta_{nir} = \frac{t_d}{t_k} \quad (1.21)$$

Величина пірометричного коефіцієнта залежить від конструкції і розмірів печей, типу пристроїв для спалювання палива та інших факторів і в середньому складає 0,65...0,75.

Порядок виконання роботи

За даними таблиць 1.1 і 1.2 розрахувати:

- 1) теплотворність палива;
- 2) кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива;
- 3) кількість і склад утворених при цьому продуктів горіння (димових газів);
- 4) температуру горіння палива.

Таблиця 1.1 – Склад мазуту

№ вар.	С ^p	Н ^p	О ^p	Н ^p	С ^p	W ^p	A ^p	η _{нп}
1	85	11	0,3	0,4	1,2	2	0,1	0,75
2	84,5	11,5	0,4	0,5	1,0	2	0,1	0,74
3	84,6	11,4	0,5	0,6	0,8	2	0,1	0,73
4	84	12	0,6	0,7	0,6	2	0,1	0,72
5	83	13	0,7	0,6	0,6	2	0,1	0,71
6	82	14	0,5	0,4	1,0	1,9	0,2	0,7
7	81	15	0,4	0,5	1,0	2	0,1	0,71
8	80	16	0,3	0,6	1,0	1,9	0,2	0,72
9	80,5	15,5	0,4	0,7	0,8	2	0,1	0,73
10	81	15	0,5	0,6	0,8	1,9	0,2	0,74
11	81,5	14,5	0,6	0,5	0,8	2	0,1	0,75
12	82	14	0,7	0,4	0,8	1,9	0,2	0,74
13	82,5	13,5	0,6	0,5	0,8	2	0,1	0,73
14	83	13	0,5	0,6	0,8	1,9	0,2	0,72
15	83,5	12,5	0,4	0,7	0,8	2	0,1	0,71
16	84	12	0,3	0,6	1,0	1,9	0,2	0,7
17	84,5	11,5	0,4	0,5	1,0	2	0,1	0,7
18	85	11	0,5	0,4	1,0	1,9	0,2	0,71
19	85,5	10,5	0,6	0,5	0,8	2	0,1	0,72
20	86	10	0,7	0,6	0,6	1,9	0,2	0,73

Таблица 1.2. – Склад природного газу

<i>№ вар.</i>	CH₄	C₂H₆	C₃H₈	C₄H₁₀	CO₂	O₂	N₂
1	89	4	0,9	0,4	0,3	0,2	5,2
2	88	5	0,8	0,5	0,2	0,3	5,2
3	87	6	0,7	0,6	0,3	0,2	5,2
4	86	7	0,6	0,7	0,2	0,3	5,2
5	85	8	0,5	0,8	0,3	0,2	5,2
6	84	9	0,6	0,7	0,4	0,3	5
7	83	10	0,7	0,6	0,3	0,4	5
8	82	11	0,8	0,5	0,2	0,5	5
9	81	12	0,9	0,4	0,3	0,3	5,1
10	80	13	0,8	0,5	0,2	0,4	5,1
11	81	12	0,7	0,6	0,4	0,2	5,1
12	82	11	0,6	0,7	0,3	0,2	5,2
13	83	10	0,5	0,8	0,2	0,3	5,2
14	84	9	0,6	0,7	0,4	0,3	5
15	85	8	0,7	0,6	0,3	0,4	5
16	86	7	0,8	0,5	0,2	0,5	5
17	87	6	0,9	0,4	0,3	0,3	5,1
18	88	5	0,8	0,5	0,3	0,2	5,2
19	89	4	0,7	0,6	0,4	0,2	5,1
20	90	3	0,6	0,7	0,3	0,2	5,2

Практичне заняття №2
Тривалість нагріву металу

Мета заняття: набути навиків у розрахунку тривалості нагріву металу

Теоретичні відомості

Тривалість нагріву для тонких тіл визначається за формулою:

$$\tau = \frac{S \rho C_p}{k_1 \alpha} \ln \frac{t_{печ} - t_n}{t_{печ} - t_k} \text{ с}, \quad (2.1)$$

де S – розрахункова товщина тіла, що нагрівається, м (при двохсторонньому симетричному нагріві S – половина товщини, при односторонньому нагріві S – повна товщина);

k_1 – коефіцієнт форми, який для плити рівний 1, для циліндра – 2, для кулі – 3;

ρ – щільність, кг/м³;

C_p – середня теплоємність, Дж/кг·град;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·град;

$t_{печ}$ – температура печі, °С;

t_n – початкова температура тіла, °С;

t_k – кінцева температура тіла, °С.

Середня теплоємність в інтервалі температур:

$$C_{p t_n}^{t_k} = \frac{i_0^{t_k} - i_0^{t_n}}{t_k - t_n}, \quad (2.2)$$

де i^t – тепловміст при температурі t , кДж/кг.

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha^* = \sigma_{печ} \frac{\left(\frac{T_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4}{t_{печ} - t_n}, \quad (2.3)$$

де $t_{печ} (T_{печ})$ – температура печі, °С(°К);

$t_n (T_n)$ – температура поверхні, °C(°K).

$\sigma_{neч} = \varepsilon\sigma_0$ – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м²·°K⁴.

де $\sigma_0 = 5,76$ Вт/м²·°K⁴;

ε – степiнь чорноти.

У формулу (2.1) підставляється середнє значення коефіцієнту тепловіддачі в інтервалі температур:

$$\alpha = \frac{\alpha_n + \alpha_k}{2}. \quad (2.4)$$

При розрахунку часу нагріву нагрів розбивається на три інтервали:

I – 20 - 600 °C, II – 600 - 800 °C, III – 800 - кінцева температура нагріву.

Тривалість нагріву для масивних тіл визначається за формулою:

$$\tau = \frac{S\rho C_p m}{k_1 \alpha} \ln \frac{t_{neч} - t_{cep}^n}{t_{neч} - t_{cep}^k} c, \quad (2.5)$$

де

$$m = 1 + \frac{\alpha S}{(k_1 + 2)\lambda}. \quad (2.6)$$

де λ – теплопровiднiсть сталi Вт/м·град.

Теплопровiднiсть для вуглецевої сталi визначається за формулою:

$$\lambda_0 = 1,163(60 - 8,7C - 14,4Mn - 29,0Si) \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Таблиця 2.1

$\lambda_{200} = 0,95\lambda_0$	$\lambda_{600} = 0,75\lambda_0$	$\lambda_{1000} = 0,68\lambda_0$
$\lambda_{400} = 0,85\lambda_0$	$\lambda_{800} = 0,68\lambda_0$	$\lambda_{200} = 0,95\lambda_0$

Фактор m залежить від масивності тіла і його форми.

Середня температура тіла по перерізу визначається за формулою:

$$t_{сер} = t_u + \frac{\Delta t}{k_3}, \quad (2.7)$$

Температура центру тіла:

$$t_u = t_n - \Delta t. \quad (2.8)$$

Перепад температур між поверхнею і центром:

$$\Delta t = \frac{q_k S}{k_2 \lambda}. \quad (2.9)$$

де q_k – тепловий потік в кінці інтервалу, Вт/м².

$$q_k = \sigma_{печ} \left[\left(\frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right], \quad (2.10)$$

Таблиця 2.2 – Значення фактора m

	k_1	K_2	K_3
$m \approx 1 + \frac{\alpha S}{3\lambda}$	1	2	3
$m \approx 1 + \frac{\alpha S}{4\lambda}$	2	2	2
$m \approx 1 + \frac{\alpha S}{5\lambda}$	3	2	1,67

Порядок виконання роботи

За наведеними теоретичними відомостями провести розрахунок часу нагріву для тонких і масивних тіл.

Практичне заняття № 3

Вивчення й вибір пристроїв для спалювання газоподібного палива

Мета заняття: Вивчити конструкцію горілки і набути практичні навички вибору потрібного типорозміру горілок.

Теоретичні відомості

Основним призначенням пристроїв для спалювання газоподібного палива, що називають горілками, є організація процесу горіння так, щоб забезпечити заданий економічний режим роботи печі. Для досягнення цієї мети горілки повинні забезпечити:

- підвід і змішування між собою необхідних кількостей палива і повітря;
- повноту спалювання палива в межах робочого простору печі;
- спалювання палива із створенням такого полум'я, яке може забезпечити потрібний по технологічних умовах рівень теплопередачі.

Конструкції горілок прийнято розділяти по двох основних признаках: по способу змішування газу з повітрям і тиску повітря.

За першою ознакою горілки поділяють на три великі групи:

- 1) з повним попереднім змішуванням газу і повітря у спеціальному змішувачі;
- 2) з частковим попереднім змішуванням газу і повітря;
- 3) горілки без попереднього змішування чи з зовнішнім змішуванням.

За другою ознакою: горілки низького і високого тиску.

Ціллю вибору горілки є визначення її типорозміру, тиску газу і повітря перед горілкою по заданій пропускній здатності горілки по газу. У випадку, коли тиск газу і повітря задані, частіше визначають діаметр газового сопла і перевіряють швидкості витікання газу і повітря на виході з горілки. Визначивши типорозмір горілки за відомими даними можна визначити конструкційні розміри горілки.

Послідовність вибору горілки:

1. За заданими параметрами визначити пропускну здатність горілки по повітрю V_{BG}

$$V_{BG} = kV_G V_B, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.1)$$

де V_G - витрати газу, $\text{м}^3/\text{с}$;

V_B - витрати повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$, ($1,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$);

k – коефіцієнт витрат повітря;

2. Визначити розрахункову кількість повітря, що витрачається горілкою $V_B^{розр.}$:

$$V_B^{розр.} = V_{BG} \sqrt{\frac{T_B}{293}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.2)$$

де T_B - температура підігрітого повітря, $^{\circ}\text{K}$.

3. З графіків на рисунку 3.1 по заданому тиску повітря і розрахунковій витраті вибирають типорозмір горілки.

4. Визначити розрахункову кількість газу $V_G^{розр.}$, що затрачається горілкою:

$$V_G^{розр.} = V_{BG} \sqrt{\frac{T_G l_{20}}{293}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.3)$$

де: T_G – температура газу, $^{\circ}\text{K}$

l_{20} – густина спалюваного газу.

5. Визначити діаметр горілки за графіком на рисунку 3.2.

6. Визначити швидкості витікання газу і повітря за графіком на рисунку 3.3, по заданих тисках повітря і газу, густині газу.

Порядок проведення роботи

Познайомитись з роботою горілки. Розібрати горілку і зробити ескізи деталі, вказати їх призначення.

Виконати ескіз загального вигляду горілки в розрізі і вказати стрілками рух газу і повітря в горілках. Для одного з варіантів, наведених

в таблиці 3.1, вибрати потрібну горілку, користуючись методикою, викладеною в теоретичних відомостях.

Зміст звіту

Привести ескізи деталей горілки, загального вигляду з розрізом, результатами вибору горілки.

Таблиця 3.1 – Дані для вибору горілки

№ варіанту	Параметри					
	Витрати газу, м ³ /с	Тиск газу перед горілкою P_2 , кПа	Тиск повітря P_n , кПа	Температура газу t_2 , °С	Температура повітря t_n , °С	Густина газу ρ_2 , кг/м ³
1	0,2	3,0	1,8	20	400	1,4
2	0,3	4,0	1,8	100	500	0,8
3	0,4	5,0	2,4	20	600	1,2
4	0,05	2,0	1,5	100	300	0,9
5	0,6	3,0	3,0	20	700	1,0
6	0,5	4,0	2,0	100	600	0,8
7	0,4	5,0	2,2	20	500	1,2
8	0,05	6,0	2,4	100	400	0,8
9	0,1	5,0	2,6	20	300	1,4
10	0,2	6,0	2,8	100	300	0,9
11	0,3	5,0	3,0	20	400	1,0
12	0,5	4,3	2,9	100	500	0,9
13	0,4	2,2	2,7	20	600	1,2
14	0,6	5,4	2,5	100	700	0,8
15	0,2	2,6	2,3	20	600	1,4
16	0,4	2,5	2,1	100	500	0,9
17	0,3	6,0	1,9	20	400	1,2
18	0,1	3,0	2,0	100	300	0,8
19	0,2	4,0	2,5	20	500	1,4
20	0,3	5,0	3,0	100	400	1,0

Коефіцієнт витрат повітря $k = 1,1$

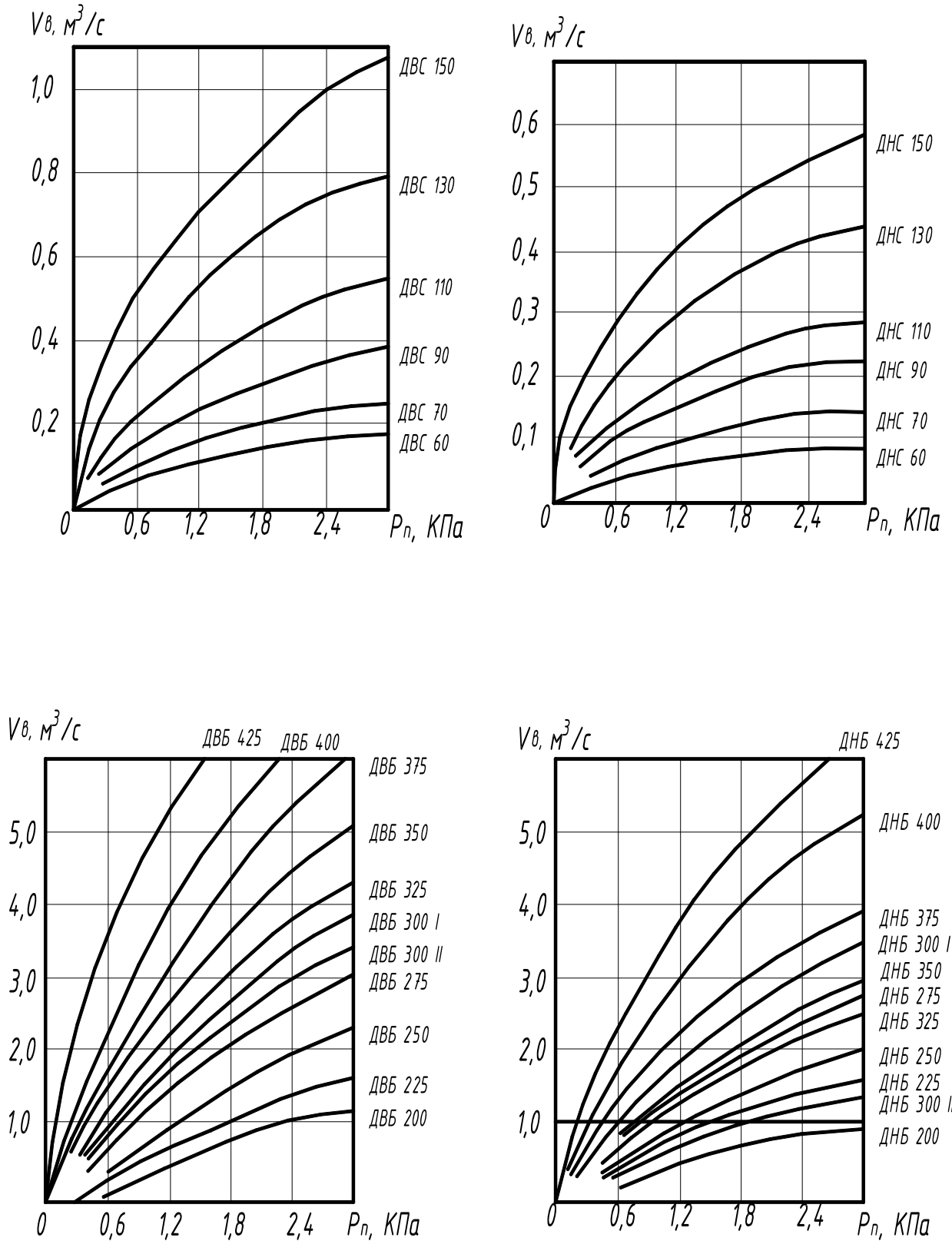


Рисунок 3.1 – Типорозміри горілок

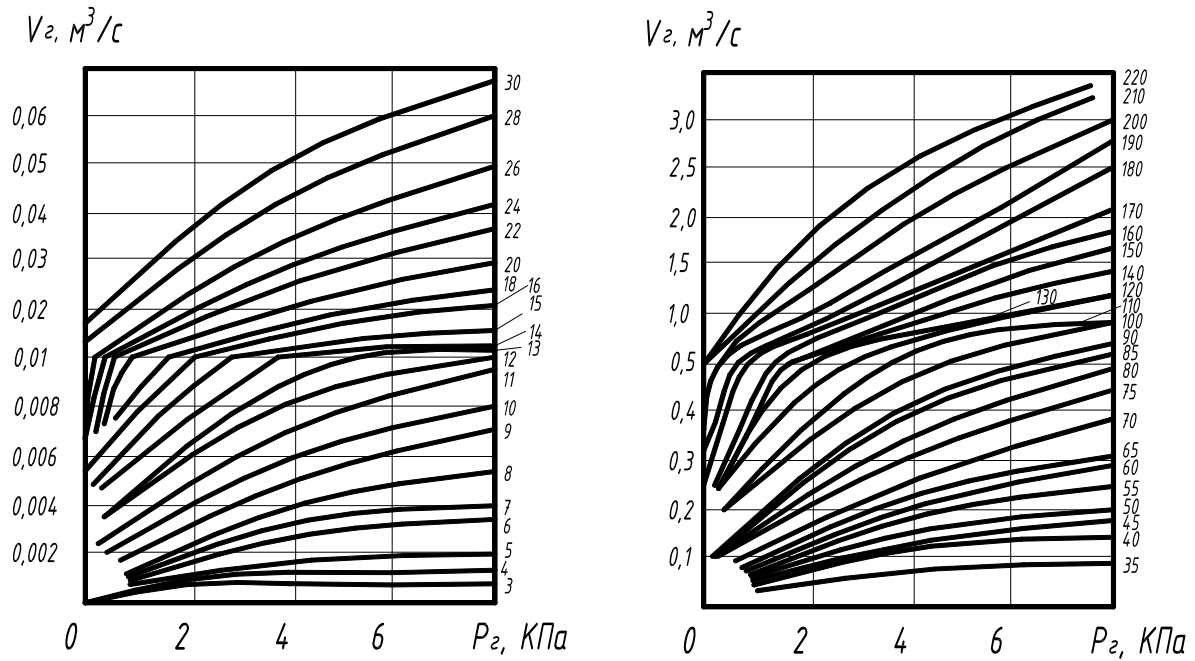


Рисунок 3.2 – Номограма для визначення розміру газового сопла.

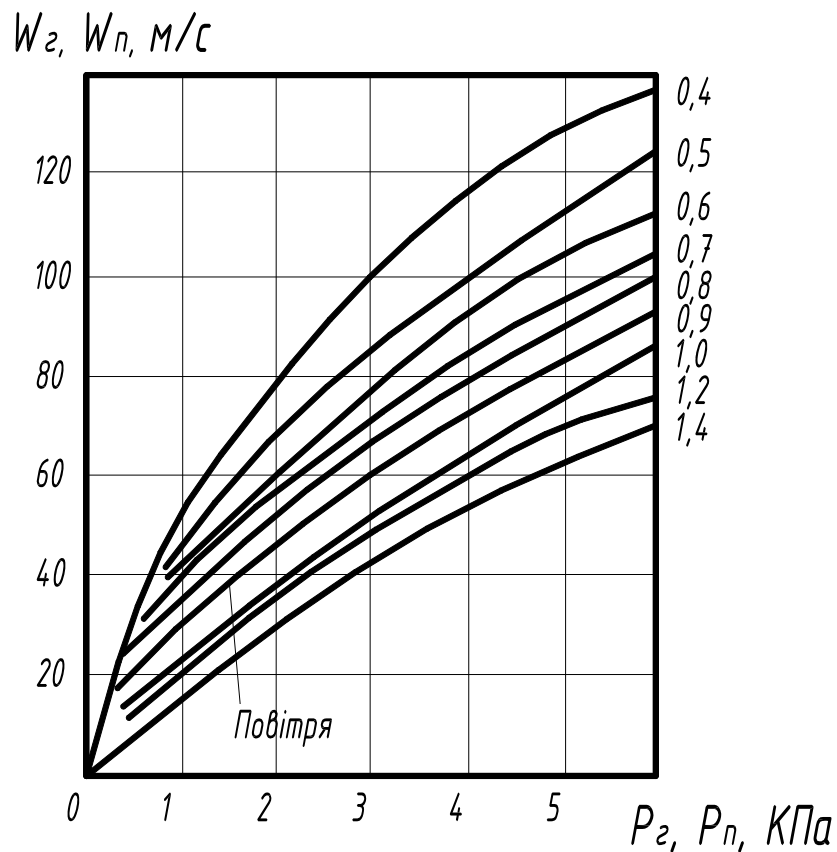


Рисунок 3.3 – Номограма для визначення швидкості витікання повітря і газу

Практичне заняття №4**Тепловий баланс печі**

Мета заняття: набути навиків у розрахунку теплового балансу печі

Теоретичні відомості

Під час роботи печі відбувається безупинна передача теплоти від більш гарячих тіл до більш холодного.

Розглянемо, як витрачається теплота, що виділяється при спалюванні природного газу в штовхальної печі для загартування. Складемо тепловий баланс печі, що враховує всі джерела приходу і витрати теплоти піччю. Прийmemo всю теплоту, що виділилася в печі при спалюванні природного газу, за 100 %. Це буде прибуткова стаття теплового балансу печі. Видаткова частина балансу буде складатися з декількох статей, що представляють собою витрати теплоти на нагрівання металу, втрати через стінки, втрати з продуктами горіння, що відходять, і т.д.

Нагрівання металу. Теплота, витрачена на нагрівання металу, тобто деталей, що піддаються термічній обробці, – це єдина корисна складова балансу. Кількість теплоти на нагрівання металу визначається по формулі

$$Q_{мет} = C_{мет} (t_{мет}^к - t_{мет}^н) П, \quad (4.1)$$

де: $C_{мет}$ – теплоємність металу, кдж/(кг·°С);

$t_{мет}^к, t_{мет}^н$ – кінцева і початкова температура металу, °С;

$П$ – продуктивність печі, кг/ч.

Для штовхальної печі для загартування, $П= 600$ кг/год,
 $t_{мет}^к=860^{\circ}\text{С}$; $t_{мет}^н=20^{\circ}\text{С}$, $C_{мет}=0,69$ кдж/(кг·°С).

Нагрівання тари. Теплота, витрачена на нагрівання тари, – небажана складова балансу. Чим важча тара, тим менше ккд печі. Тара – піддони і пристосування для розміщення деталей на піддоні. Кількість теплоти на нагрівання тари за 1 год. визначається по формулі:

$$Q_m = C_m (t_m^к - t_m^н) G_m, \quad (4.2)$$

де C_m – теплоємність матеріалу тари, кдж/(кг·°С);

$t_m^к, t_m^н$ – кінцева і початкова температури тари, °С;

G_m – маса тари, що нагрівається за 1 год., кг.

Для розглянутої штовхальної печі для загартування $G_T = 300$ кг,
 $t_m^к = 860^{\circ}\text{С}$, $t_m^н = 30^{\circ}\text{С}$, $C_m = 0,58$ кдж/(кг·°С).

Втрати теплоти, витраченої на нагрівання тари, можуть бути зменшені, якщо застосовувати більш легкі піддони і пристосування,

а також збільшити число деталей, що укладаються на піддон.

Нагрівання захисного газу. Захисний газ, навіть якщо він містить пальні складові, потрапляючи в піч, нагрівається. Чим більша витрата захисного газу, тим більше теплоти витрачається на його нагрів.

Кількість теплоти визначають по формулі:

$$Q_{3.2} = C_{3.2} (t_{3.2}^k - t_{3.2}^n) V_{3.2}, \quad (4.3)$$

де $C_{3.2}$ – теплоємність захисного газу, кДж/(м³·°C);

t_m^k, t_m^n – кінцева і початкова температури захисного газу, °C;

$V_{3.2}$ – витрата захисного газу в печі за 1 год., м³.

Втрати теплоти на нагрівання захисного газу можуть бути знижені за рахунок кращої герметизації печі і відповідного зменшення витрати захисного газу. У деяких випадках можлива подача в піч попередньо підігрітого захисного газу.

Втрати теплоти з димовими газами. Продукти, що утворюються при спалюванні палива, виходячи з печі, несуть із собою велику кількість теплоти, яка визначається по формулі:

$$Q_{n.2} = C_{n.2} t_{n.2} V_{n.2}, \quad (4.4)$$

де: $C_{n.2}$ – теплоємність продуктів горіння, кДж/(м³·°C);

$t_{n.2}$ – температура продуктів горіння, °C;

$V_{n.2}$ – об'єм продуктів горіння, м³/год.

Обсяг продуктів горіння залежить від обсягу газоподібного палива, що спалюється.

Втрати теплоти з продуктами горіння, можна зменшити, якщо частина теплоти, що міститься в продуктах горіння, використовувати для попереднього підігріву металу, що нагрівається в печі, чи для підігріву повітря, подаваного в горілки.

Втрати теплоти через стіни, склепіння і під печі. Зовнішня поверхня печі має більш високу температуру, чим навколишнє середовище, тому відбувається безупинна віддача теплоти печі навколишньому повітрю за рахунок конвекції і навколишньому простору за рахунок випромінювання.

Кількість теплоти, що втрачається поверхнею печі, можна визначити по формулі:

$$Q_{nos} = k(t_1 - t_4) F, \quad (4.5)$$

При різній температурі окремих ділянок поверхні печі загальні втрати теплоти визначаються підсумовуванням втрат теплоти на всіх ділянках. Прийmemo, що температура зовнішньої поверхні печі дорівнює 80 °C и загальна поверхня печі з урахуванням поверхні тамбурів і металоконструкцій складає 150 м², коефіцієнт теплопередачі 3,7 Вт/(м·°C).

Для зниження втрат теплоти застосовують вогнетривкі матеріали з кращими теплоізоляційними властивостями, збільшують товщину кладки печі і зменшують поверхню печі за рахунок видалення ребер, косинок і інших виступаючих елементів каркаса печі. Варто враховувати, що каркас печі, пофарбований алюмінієвою фарбою, менше випромінює теплоти в навколишнє простір, чим каркас, пофарбований звичайною фарбою.

Втрати теплоти через вікна печі. У момент відкриття завантажувального і розвантажувального вікон печі з камери нагрівання за рахунок випромінювання втрачається теплота. Кількість теплоти можна визначити по формулі:

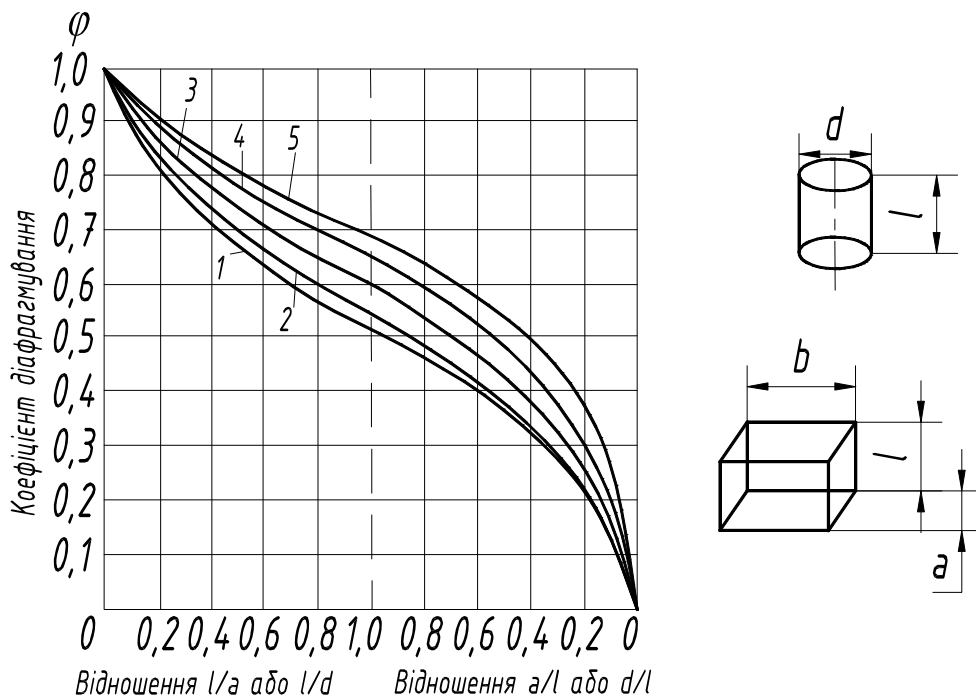
$$Q_{\text{вік}} = 5.7 F_{\text{вік}} \Phi \tau \left(\frac{T_n}{100} \right)^4, \quad (4.6)$$

де $F_{\text{вік}}$ – площа відкритого вікна, м²;

Φ – коефіцієнт діафрагмування, що залежить від конфігурації вікна і товщини стіни (рисунк 4.1);

τ – частка часу протягом години, коли вікно відкрите;

T_n – температура в печі, К.



Рисунк 4.1 – Коефіцієнт діафрагмування ϕ :

1 круги; 2 квадрати; $a/b=1$; 3 прямокутники, $a/b=0,5$;

4 прямокутники, $a/b=0,2$; 5 довгі смуги, $a/b \rightarrow 0$.

Зменшити втрати теплоти через вікна можна шляхом зменшення розмірів вікна і скорочення часу відкриття вікна.

Втрати теплоти з водою, для охолодження. Різні елементи печі можуть мати водяне охолодження (наприклад, вентилятори, газові введення, заслінки). Визначивши кількість води, що надходить для охолодження, і її температуру перед піччю й у зливальному колекторі, знаходимо втрати теплоти:

$$Q_{вод} = C_{вод} (t_{вод}^k - t_{вод}^n) V_{вод}, \quad (4.7)$$

де $C_{вод}$ – теплоємність води, кДж/(кг·°C);

$t_{вод}^k, t_{вод}^n$ – кінцева і початкова температури води, °C;

$V_{вод}$ – кількість води, кг/год

Втрати теплоти з водою можна зменшити екрануванням водоохолоджуваних елементів, нанесенням обмазок, що зменшують передачу теплоти.

Після визначення всіх статей складається рівняння теплового балансу:

$$1,18(Q_{мет} + Q_t + Q_{з.г.} + Q_{н.г.} B + Q_{нов.} + Q_{вік} + Q_{вод.}) = Q_n^p B + Q_{рек} B \quad (4.8)$$

де $Q_{рек}$ – кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, кДж;

B – витрати палива, м³.

Кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, визначається за формулою:

$$Q_{рек} = L_{\delta} i_0 \quad (4.9)$$

де L_{δ} – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці палива;

i_0 – тепловміст підігрітого повітря, кДж/м³.

З рівняння теплового балансу визначаються витрати палива B .

Приклад графічного зображення теплового балансу показаний на рисунку 4.2.

Порядок виконання роботи

За наведеними теоретичними відомостями провести розрахунок теплового балансу печі.

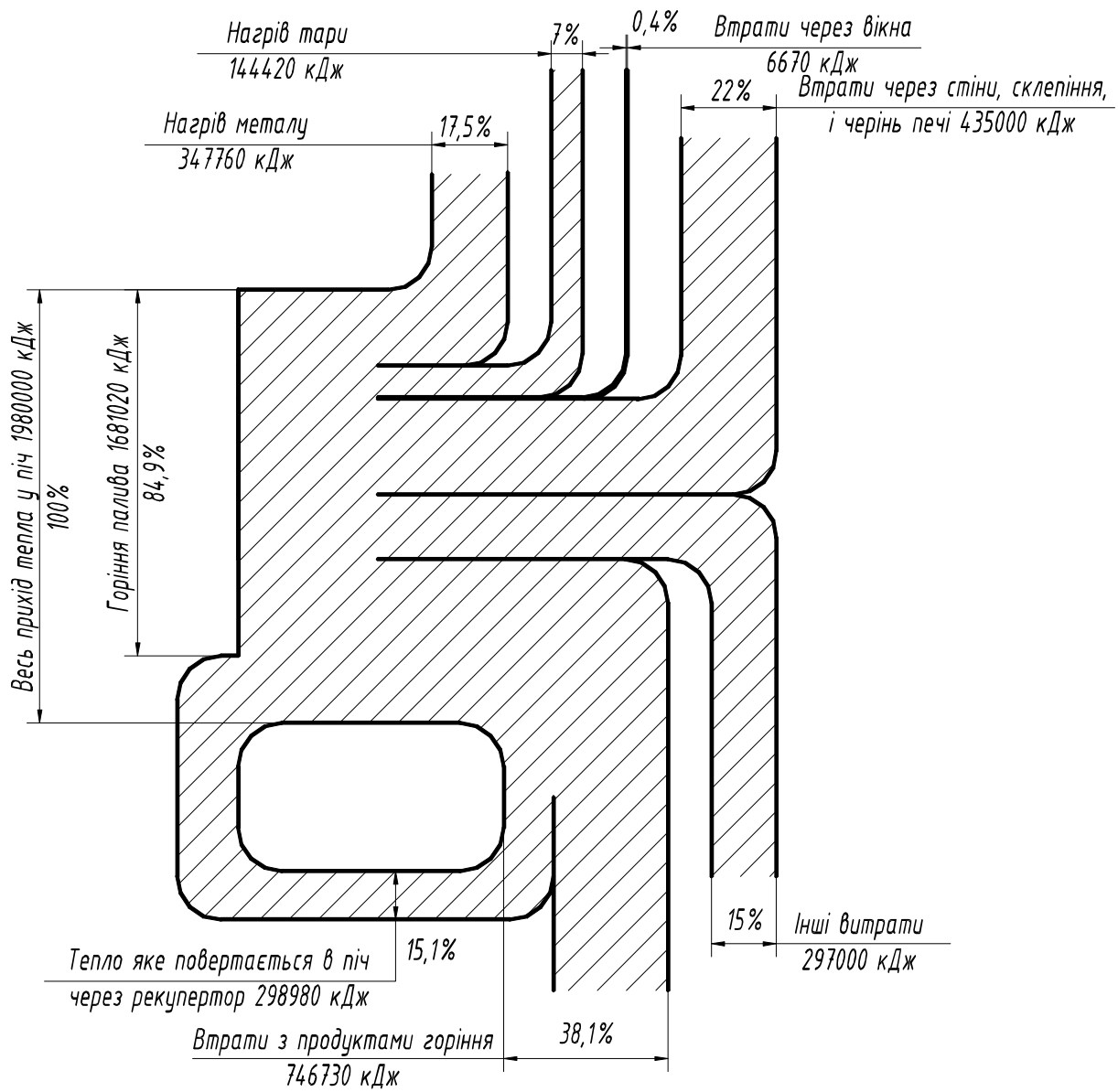


Рисунок 4.2 – Тепловий баланс печі

Практичне заняття № 5

Вивчення і вибір пристроїв для спалювання рідкого палива

Мета заняття: вивчити принциповий пристрій форсунки і отримати практичні навички вибору потрібного типорозміру форсунки.

Теоретичні відомості

Для спалювання рідкого палива використовують спеціальні пристрої – форсунки.

До форсунок пред'являють наступні вимоги:

- добре розпилювання і перемішування палива з повітрям;
- забезпечення стійкого горіння незатухаючого факела потрібної довжини;
- надійність в експлуатації, простота і надійність конструкції, зручність чистки, незабрудненість.

Всі форсунки розділяють на дві групи: низького і високого тиску.

В форсунках низького тиску розпилювачем служить вентиляторне повітря з порівняно невисоким тиском, а в форсунках високого тиску – компресорне повітря. В форсунках низького тиску все повітря, необхідне для горіння, поступає через форсунку. В форсунках високого тиску затрати компресорного повітря складають 7...12% всієї кількості повітря, необхідного для горіння. Повітря, що залишилося, називається вторинним, воно не проходить через форсунку, а поступає до неї по спеціальних керамічних каналах.

В форсунках низького тиску більш повне згорання палива – завдяки участі великої маси повітря в розпилюванні. В форсунках високого тиску подача основної маси повітря поза форсункою приводить до зниження якості змішування і є причиною підвищеної затрати повітря.

Ціллю вибору форсунки є визначення її типорозміру, тиску мазуту і повітря перед пристроєм по заданій пропускній здатності пристрою по мазуту. При виборі форсунок доцільно дотримуватись основного

положення при нагріві металу – не нагрівати метал факелом. Таку умову можна виконати в печах камерного типу, використавши форсунки низького тиску, що дають широке і коротку полум'я.

В теперішній час більшість форсунок типові, що дозволяє вибирати їх по виробничій здатності замість розрахунку.

Послідовність вибору форсунки низького тиску:

По заданій пропускну́й здатності форсунки по мазуту, тиску повітря і коефіцієнту витрат повітря вибрати типорозмір форсунки по графіку на рисунку 5.1.

Послідовність вибору форсунки високого тиску:

– для форсунок з подвійним розпиленням типу ФДБ по графіку на рисунку 5.2 вибрати типорозмір форсунки в залежності від мазуту і тиску повітря перед нею;

– по графіку на рисунку 5.3 вибрати типорозмір форсункової коробки по заданому тиску повітря перед лею і розрахунковій затраті повітря:

$$V_B^{розр.} = V_B \sqrt{\frac{T_B}{293}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5.1)$$

Порядок проведення роботи

Ознайомитись з форсункою. Визначити її різновид, зробити її ескізи з необхідними розрізами з яких можна було б визначити її принцип роботи. За одним з варіантів приведених в таблиці 5.1 і таблиці 5.2 вибрати відповідний типорозмір форсунок низького і високого тиску по методиці, викладеній в теоретичних відомостях.

Таблиця 5.1 – Дані для вибору форсунки низького тиску.

№ варіанту	Витрати мазуту V_m , кг/с	Коефіцієнт витрат повітря	Тиск повітря перед форсункою P_n , кПа
1	0.02	1.2	5.5
2	0.15	1.15	6.0
3	0.04	1.1	6.0
4	0.005	1.2	4.0
5	0.03	1.15	4.5
6	0.01	1.1	5.0
7	0.025	1.2	5.5
8	0.03	1.15	6.0
9	0.008	1.1	6.0
10	0.035	1.2	5.5
11	0.04	1.15	5.0
12	0.02	1.1	4.5
13	0.015	1.2	4.0
14	0.025	1.15	4.0
15	0.03	1.1	4.5
16	0.035	1.2	5.0
17	0.04	1.15	5.5
18	0.035	1.1	6.0
19	0.03	1.2	6.0
20	0.02	1.15	5.5

Таблиця 5.2 – Дані для вибору форсунки високого тиску.

№ варіанту	Витрати мазуту V_m , кг/с	Залишковий тиск мазуту перед форсункою P_m , кПа	Тиск повітря перед форсункою P_n , кПа	Температура повітря, °С
1	0,15	300	0,6	700
2	0,2	400	0,8	600
3	0,25	500	1,0	500
4	0,25	400	0,4	400
5	0,2	350	0,2	300
6	0,15	300	0,3	350
7	0,1	250	0,4	450
8	0,05	200	0,5	550
9	0,05	150	0,6	650
10	0,1	200	0,7	700
11	0,15	250	0,8	600
12	0,2	300	0,9	500
13	0,25	350	0,9	400
14	0,25	400	0,8	300
15	0,2	450	0,7	350
16	0,15	500	0,6	450
17	0,1	500	0,5	550
18	0,5	450	0,4	650
19	0,5	300	0,3	700
20	0,1	250	0,2	600

Примітка. Для спалювання 1 кг мазуту з коефіцієнтом витрат повітря $n=1,1$, необхідно $1,53 \text{ м}^3$

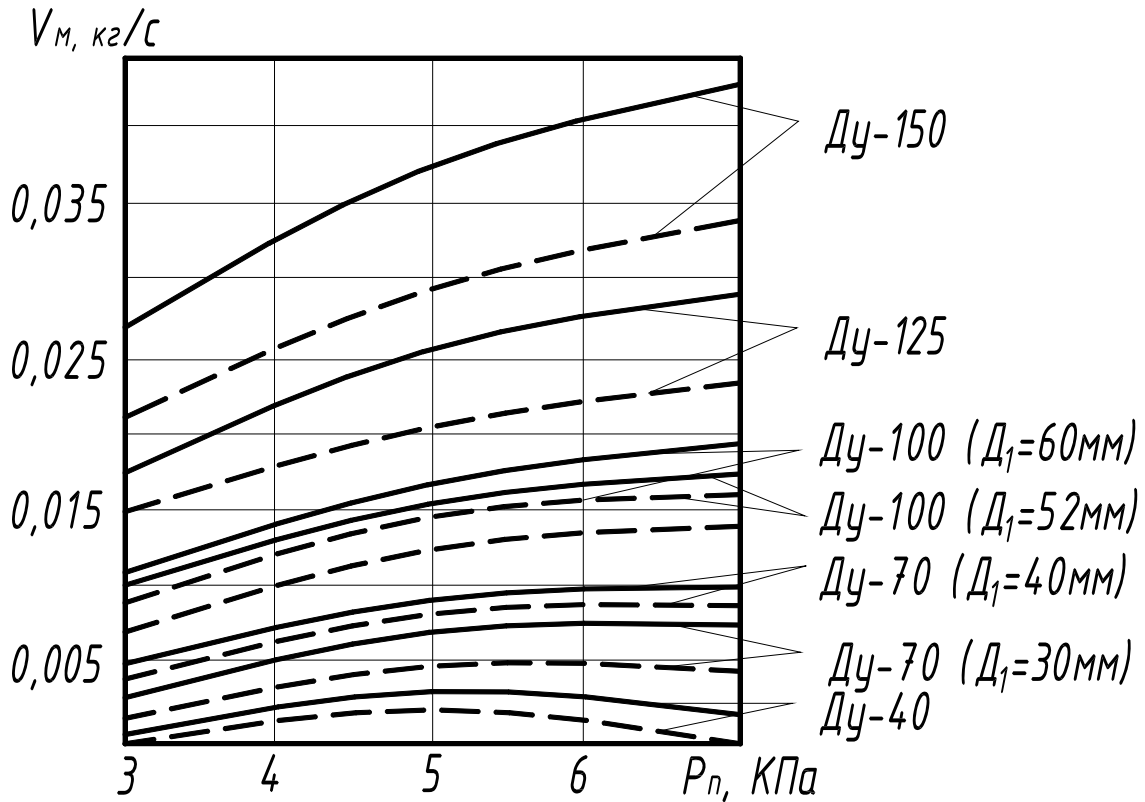


Рисунок 5.1 – Пропускна здатність по мазуту форсунок низького тиску.

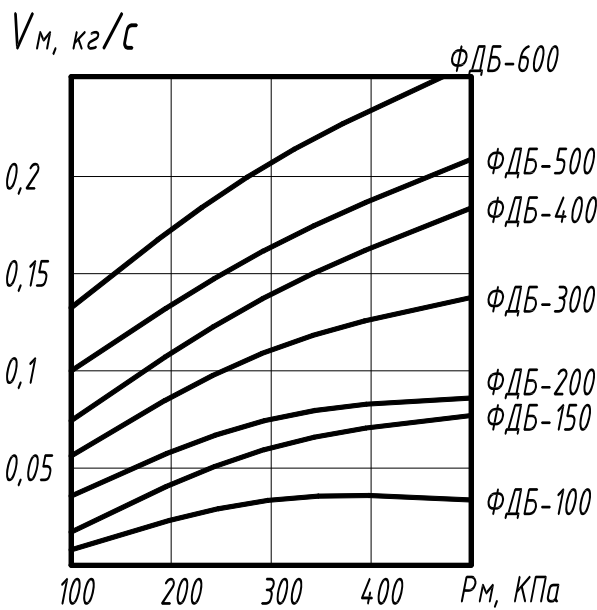


Рисунок 5.2 – Графік пропускної здатності форсунок ФДБ

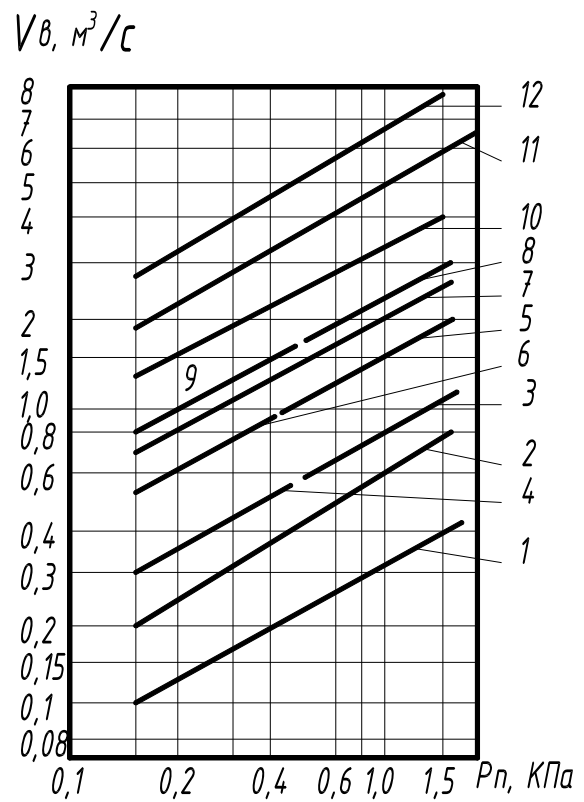


Рисунок 5.3 – Пропускна здатність форсункових коробок.

Практичне заняття №6**Розрахунок рекуператорів.**

Мета заняття: набути навиків у розрахунку рекуператорів.

Теоретичні відомості

При проектуванні рекуператорів метою розрахунків є визначення поверхні нагріву і деяких інших величин, які характеризують конструкцію.

Вихідними формулами для розрахунку рекуператора є: рівняння теплопередачі:

$$Q = kF \Delta t_c, \quad (6.1)$$

Рівняння теплового балансу

$$V_\partial (i'_\partial - i''_\partial) \xi = V_n (i'_n - i''_n), \quad (6.2)$$

де Q , $V_n (i'_n - i''_n)$ – кількість тепла, що передається через всю поверхню нагріву, Вт;

F – поверхня нагріву рекуператора, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²град;

t_c – середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям, °С;

V_∂ – витрати продуктів горіння, м³/с;

V_n – витрати повітря, м³/с;

i'_∂ і i''_∂ – початковий і кінцевий тепловміст диму МДж/м³;

k – коефіцієнт, який враховує втрати тепла через кладку рекуператора.

При проектуванні нового рекуператора звичайно задаються трьома температурами: початковою і кінцевою температурами повітря t'_n і t''_n , а також початковою температурою диму t_∂ . Для визначення кінцевої температури диму з рівняння (2) визначається його тепловміст:

$$i''_\partial = i'_\partial - \frac{V_n}{V_\partial \xi} (i''_n - i'_n) \text{ МДж / м}^3, \quad (6.3)$$

Якщо в рекуператорі є витікання повітря на димову сторону, то рівняння/й/ прийме наступний вигляд:

$$\left[V_\partial i'_\partial - (V_\partial + nV_n) i''_\partial \right] \xi = V_n i''_n, \quad (6.4)$$

де n – витікання повітря в долях кількості повітря, що нагрівається в рекуператорі.

З рівняння (4) отримуємо:

$$i_{\delta}'' = \frac{V_{\delta} i_{\delta}' \xi - V_n i_n''}{(V_{\delta} + n V_n) \xi} \text{ МДж} / \text{м}^3, \quad (6.5)$$

Поверхня нагріву рекуператора F вираховується з рівняння (1) в яке входять коефіцієнт теплопередачі k і середня різниця температур диму і повітря Δt_c . Для конвективних рекуператорів Δt_c змінюється вздовж поверхні нагріву по експоненціальному закону. Середнє значення різниці температур диму і повітря визначається як середньологарифмічна різниця. Для прямооточного руху диму і повітря середня різниця температур має вигляд:

$$\Delta t_c = \frac{(t_{\delta}' - t_n') - (t_{\delta}'' - t_n'')}{\ln \frac{t_{\delta}' - t_n'}{t_{\delta}'' - t_n''}}, \quad (6.6)$$

Для протиточного руху

$$\Delta t_c = \frac{(t_{\delta}' - t_n') - (t_{\delta}'' - t_n'')}{\ln \frac{t_{\delta}' - t_n''}{t_{\delta}'' - t_n'}}, \quad (6.7)$$

Коефіцієнт теплопередачі k визначається за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\delta}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{град}, \quad (6.8)$$

де α_{δ} – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$;

α_n – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря або газу, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$

S – товщина стінки, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$.

Коефіцієнт тепловіддачі на димовій стороні:

$$\alpha_{\delta} = \alpha_{\delta}^k + \alpha_{\delta}^{\text{випр}}, \quad (6.9)$$

де: α_{δ}^k – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$;

$\alpha_{\delta}^{\text{випр}}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$.

На повітряній стороні враховується тільки тепловіддача конвекцією.

В газових рекуператорах на газовій стороні також враховується випромінювання.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією вираховується за формулами, які відповідають конструкції рекуператора і характеру руху диму і повітря.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається по формулі:

$$\alpha_{\delta}^{випр} = \frac{\sigma \left[\left(\frac{T_{\delta}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\delta} - T_{ст}} \text{ Вт/м}^2\text{град} \quad (6.10)$$

де T_{δ} і $T_{ст}$ – відповідно температура диму і стінки, °К;

σ – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м².

Приведений коефіцієнт випромінювання:

$$\sigma = \frac{5,75}{\frac{1}{\varepsilon_{\delta}} + \frac{1}{\varepsilon_{ст}} - 1} \quad (6.11)$$

де: ε_{δ} – степінь чорноти диму;

$\varepsilon_{ст}$ – степінь чорноти стінки.

Степінь чорнота диму визначається в залежності від вмісту CO₂, і H₂O, товщини газового шару, форми каналу і температури.

Величину $\alpha_{\delta}^{випр}$ можна також визначити за графіком (рисунок 6.1).

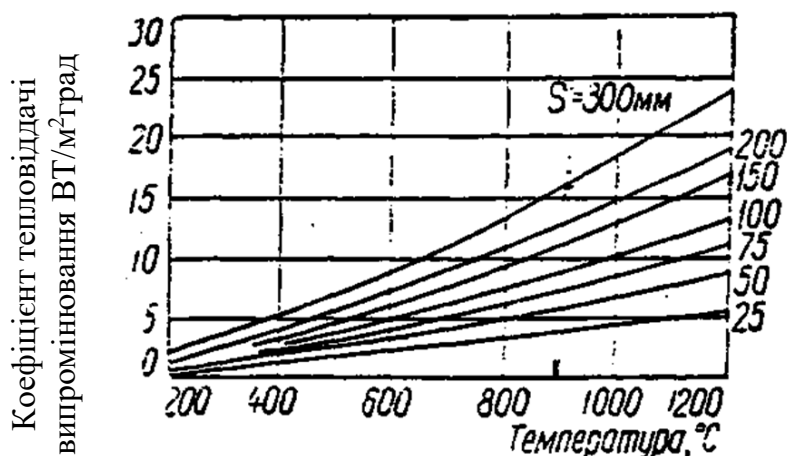


Рисунок 6.1 – Графік залежності коефіцієнта тепловипромінювання від температури газів і товщини газового шару.

Методика розрахунку рекуператорів

В основному методика розрахунку однакова для різних типів рекуператорів. Відмінність зводиться лише до застосування тих чи інших формул для розрахунку коефіцієнта теплопередачі, гідравлічних опорів та ін.

При розрахунку рекуператора звичайно відомі наступні параметри: витрати палива на піч B , $\text{м}^3/\text{с}$; витрати повітря на 1 м^3 палива L_{∂} , $\text{м}^3/\text{м}^3$; об'єм продуктів горіння на 1 м^3 палива V_{∂} , $\text{м}^3/\text{м}^3$; вміст в продуктах горіння CO_2 і H_2O ; температура повітря початкова і кінцева t'_n і t''_n , $^{\circ}\text{C}$; температура продуктів горіння, що виходять з печі $t_{\text{вих}}$, $^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок починають з визначення витрат повітря, що подається в рекуператор, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$V'_n = V_n + \Delta V_n, \quad (6.12)$$

$$V_n = BL_{\partial}, \quad (16.13)$$

$$\Delta V = nV_n, \quad (16.14)$$

Витікання повітря n можна приймати таким:

Рекуператори	Величина
Трубчаті металеві	0
Голкові	0,1...0,15
Керамічні, які працюють з нагнітанням повітря	0,25...0,40
Керамічні, які працюють з підтягуванням повітря	0,1-...0,2

Потім визначають витрати продуктів горіння перед рекуператором:

$$V'_{\partial} = mV_{\partial}(1 + \rho) \text{ м}^3 / \text{с} \quad (6.15)$$

де m – коефіцієнт, який враховує втрати продуктів горіння в печі і боровах до рекуператора;

ρ – підтягування повітря в долях від кількості продуктів горіння;

$$V_{\partial} = BV_{\partial} \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (6.16)$$

Коефіцієнт m можна приймати рівним 0,65–0,85. Менші значення відповідають розташуванню рекуператора за межами печі при наявності обвідного шиберу.

Коефіцієнт ρ складає в середньому 0,1–0,15.

Тепловміст диму перед рекуператором (з врахуванням підтягування повітря):

$$i'_o = \frac{\rho i_n + i_{вих}}{1 + \rho} \text{ МДж / м}^3, \quad (6.17)$$

$i_{вих}$ – тепловміст продуктів горіння при температурі $t_{вих}$, МДж/м³;

i_n – тепловміст оточуючого повітря, МДж/м³.

Температура диму перед рекуператором t'_o визначається по його тепловмісту i'_o . З рівняння теплового балансу рекуператора визначаються тепловміст і температура диму за рекуператором по формулі (6.3) або (6.5).

Розрахункові витрати повітря і продуктів горіння (для визначення поверхні нагріву і прохідних перерізів):

$$V_n^* = V_n' + \frac{\Delta V_n}{2} \text{ м}^3 / \text{год}, \quad (6.18)$$

$$V_o^* = V_o' + \frac{\Delta V_n}{2} \text{ м}^3 / \text{год}, \quad (6.19)$$

Середньологарифмічний температурний напір визначається за формулами (6.6) і (6.7). Далі розраховують коефіцієнт теплопередачі k . При розрахунку цього коефіцієнта звичайно задаються швидкістю руху повітря і диму. Рекомендовані значення цих швидкостей для рекуператорів різних типів приведені в таблиці 6.1.

Поверхня нагріву рекуператора визначається з формули (6.1). Після розрахунку поверхні нагріву виконується компоновання рекуператора.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані швидкості руху повітря і диму для рекуператорів.

Типи рекуператорів	Швидкості приведені до нормальних умов, м/с	
	повітря	диму
Голкові з односторонніми голками	3–8	1–4
Голкові з двосторонніми голками	3–8	0,5–2
Термоблоки	3–10	0,5–3
Трубчаті металеві	5–10	2–4
Радіаційні	20–30	–
Керамічні	0,5–1	1–3

Розрахунки коефіцієнта теплопередачі k специфічні для різних конструкцій рекуператорів. Нижче викладені вказівки по проведенню цих розрахунків для рекуператорів основних типів.

Голковий рекуператор – це збірна конструкція, яка складається з стандартних елементів – голкових труб, які відливаються з чавуну різних марок. Розрізняють два типи голкових труб: з двохсторонніми і односторонніми голками. В таблиці 6.2 приведені основні характеристики голкових труб різного типу.

Коефіцієнт теплопередачі для голкових рекуператорів підраховується за формулою (6.8). Тепловим опором стінки в цій формулі можна знехтувати.

Коефіцієнти тепловіддачі підраховуються за наступними формулами:

від диму до стінки

$$L_{\partial} = BW_{0\partial}^n \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{град}, \quad (6.2)$$

від стінки до повітря

$$L_{\partial} = B_1W_{0n}^{n_1} \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{град}, \quad (6.21)$$

В таблиці 6.3 приведені значення B , B_1 , n і n_1 для різних типів голкових рекуператорів.

Таблиця 6.2 – Характеристика голкових труб

Довжина труби, мм	Умовна поверхня для розрахунку теплопередачі без врахування голок, м ²	Вільний переріз				Маса одної труби		
		Для проходу повітря	для проходу диму			Тип 17,5	Тип 28	Односторонній голковий
			Тип 17,5	Тип 28	Односторонній голковий			
880	0,25	0,008	0,06	0,07	0,042	46	41	31
1135	0,33	0,008	0,08	0,092	0,055	57	52	39
1385	0,425	0,008	0,1	0,114	0,067	68	63	47
1640	0,50	0,008	0,12	0,136	0,080	80	76	55

Таблиця 6.3 – Значення коефіцієнтів B , B_1 , n і n_1

Тип рекуператора	Коефіцієнт			
	B_1	B	n_1	n
17,5	47,9	138	1,2	0,875
28	47,9	80	1,2	0,86
Без зовнішніх голок	47,9	19,7	1,2	0,835

Для рекуператорів, де використовуються пучки труб коефіцієнт теплопередачі розраховується за формулою (6.8).

На рис.2. приведені схеми і основні геометричні характеристики коридорного і шахматного пучків.

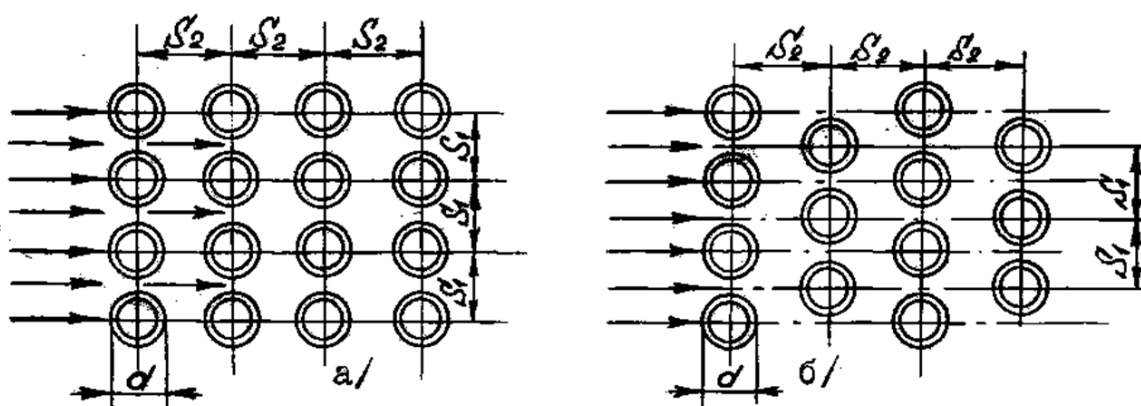


Рис.2 Схеми коридорного (а) і шахматного (б) пучків.

Коефіцієнти тепловіддачі підраховуються за наступними формулами:

для коридорних пучків:

для повітря:

$$\alpha_n^k = (7.54 + 0.0058t_n) \frac{W_0^{0.65}}{d^{0.35}} \text{ Вт / м}^2 \text{ град}, \quad (6.22)$$

для димових газів:

$$\alpha_\delta^k = (7.4 + 0.00924t_\delta) \frac{W_0^{0.65}}{d^{0.35}} \text{ Вт / м}^2 \text{ град}, \quad (6.23)$$

Для шахматних пучків:

для повітря:

$$\alpha_n^u = (7.71 + 0.0068t_n) \frac{W_0^{0.6}}{d^{0.4}} \text{ Вт / м}^2 \text{ град}, \quad (6.24)$$

для димових газів:

$$\alpha_\delta^u = (7.44 + 0.106t_\delta) \frac{W_0^{0.6}}{d^{0.4}} \text{ Вт / м}^2 \text{ град}, \quad (6.25)$$

Література

1. Мохорт, А. В. Термічна обробка металів [Текст] : навч. посібник / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак . – К. : Либідь, 2020. – 512 с.
2. Теорія термічної обробки [Електронний ресурс] : конспект лекцій / укладач: М. М. Бобіна. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
3. Устаткування процесів теплової обробки : Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 100 с.
4. Practical Heat Treating: Basic Principles – Jon L. Dossett (ASM International), 2020. – 404 p.
5. Practical Heat Treating: Processes and Practices Paperback – November 1, 2024. – 260 с.

Зміст

Загальні вказівки	3
Практичне заняття № 1 Розрахунок горіння палива.....	4
Практичне заняття №2 Тривалість нагріву металу	10
Практичне заняття № 3 Вивчення й вибір пристроїв для спалювання газоподібного палива.....	13
Практична робота №4 Тепловий баланс печі	18
Практичне заняття № 5 Вивчення і вибір пристроїв для спалювання рідкого палива	23
Практичне заняття №6 Розрахунок рекуператорів	28
Література.....	35

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток

Устаткування процесів теплової обробки : Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 40 с.

Комп'ютерний набір С.В. Мисковець
Редактор Д.А. Гусачук

Підп. до друку 20.10.2025 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman
Ум. друк. арк. 2,5. Обл.-вид. арк. 0,68