



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПОЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ
УКРАЇНИ



МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

„РУДОТЕРМІЧНІ ПЕЧІ”

Укладач

Г.О. Козлов

РЕКОМЕНДОВАНО
ПЦК металургійних дисциплін
НТ НМетАУ

НІКОПОЛЬ, НТ НМетАУ
2005

ЗМІСТ

Розрахунок електричних та геометричних параметрів руднотермічних електропечей безперервної дії	4
1. Зміст та методика розрахунку	5
2. Розрахунок електричних характеристик печі	5
3. Розрахунок геометричних параметрів печі	8
3.1. Для феросплавних печей з круглою ванною	6
3.2. Для феросплавних печей з прямокутною ванною	9
Зразковий розрахунок	11
4. Розрахунок електричних параметрів для будування електричних характеристик руднотермічної печі з круглою ванною	13
5 Теплообмін у рудовідновлювальних печах	17
5.1 Розрахунок конвективного теплообміну	17
5.2 Розрахунок передачі тепла теплопровідністю	21
5.3 Передача теплоти випромінюванням	26
Література	28

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РУДНОТЕРМІЧНИХ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

1. Зміст та методика розрахунку

Розрахунок заводи включає знаходження енергетичних характеристик та геометричних розмірів печі. Для процесу, що знов проектується, з прийманням раніше незнайомих матеріалів необхідно обов'язкове складання матеріального та теплового балансів. При проектуванні нової печі під усталений, традиційний процес ці показники беруть за виробничими даними. У розрахунок електричних параметрів пічної установки входить багато незнайомих. Завжди, виходячи з практичних даних, задаються продуктивністю печі і питомою витратою електроенергії (кВт·год / т сплаву), знаходять потужність пічної установки, а потім усі інші електричні параметри. Наряду з потужністю при отриманні феросплавів велике значення має електричний: опір шихтових матеріалів, які залежать від їх хімічного і гранулометричного складу, виду та марки сплаву, що виплавляється. Ці два головних параметри (потужність печі і електричний опір шихти) забезпечення концентрацією тепла у заданому об'ємі і температурних умовах, необхідні для реалізації реакцій відновлювального процесу. Величина електричного опору шихтових матеріалів також використовується в якості вихідної для розрахунку і задається видом і маркою сплаву, що виплавляється, але в основу маркування феросплавних печей покладена їх потужність.

За останнє десятиріччя в СНД під керівництвом І.Т. Жердева, Т. А. Сисояна, А. С. Микулинського, Б. Б. Данциса та ін. виконаний ряд досліджень, що дозволили розробити напівемпіричний метод розрахунку, при якому за основу приймають якусь еталонну піч і розраховують електричне поле в цій та печах, що проектуються, подібними. При цьому вводиться критерій електричної подібності (ЕП)

$$EP = \frac{U_k \times d_{ел}}{\rho \times j} \quad (1.1)$$

де - U_k - корисне фазове напруження, В;
 $d_{ел}$ - діаметр електрода, мм
 ρ - питомий електроопір шихти, Ом·мм;
 j - струм на фазі, А

Цей критерій пов'язує визначений геометричний розмір - діаметр електрода з електричними параметрами U_k , j і характеристики даного процесу - усередненим питомим опором шару шихтових матеріалів ρ , яке знаходиться видом і маркою сплаву, що виплавляється. Якщо прийняти, що в проєктованій та еталонній печах використовується однакова за хімічним і гранулометричним складом шихта, то можливо допустити рівняння значень

для обох печей, тобто для однакових процесів можна користуватися спрощеним критерієм електричної подібності (ЕП)

$$EP = \frac{U_k \times d_{ел}}{j} \quad (1.2)$$

За цим критерієм і за знайденим електричним параметром можна знайти діаметр електроду в проєктованій печі. А за діаметром електроду, мати параметр геометричної схожості, розрахувати основні розміри печі. Таким чином, прийнята схема розрахунку дозволяє зв'язати електричні характеристики та геометричні параметри печі, що являється одним із важливіших обставин для рудовідновлюваних печей.

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧІ

Розрахунок виконується у такій послідовності:

2.1. Знаходиться установлена потужність трансформатора за формулою

$$W = \frac{G \cdot A}{24 \cdot k \cdot \cos \varphi} \quad (2.1)$$

де G - задана продуктивність печі, т/доб;

24 - кількість годин в добі, г;

k - коефіцієнт, враховуючий простій печі (капітальний, середній, планово-попереджувачий ремонт) і коливання електричного режиму. Береться в межах $0,93 \div 0,95$;

A - питома витрата електроенергії, кВт·год / т (див. табл. 2.1)

Для попереднього розрахунку потужності трансформатора значення $\cos \varphi$ береться в межах $0,82 \div 0,85$. Потім з табл.2.1. в залежності від марки сплаву, що виплавляється, вибирається значення величини $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$. При цьому в залежності від величини W , отриманої з (1.3) в межах від 10 до 75 МВ. А, для більш великої потужності трансформатора береться більш мале значення величини $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$. Після цього, знов-таки, виходячи з попереднього значення W , обирається величина $\eta_{ел}$, яка завжди розташовується в межах $0,84 \div 0,90$ (чим більше W , тим менше $\eta_{ел}$). Вибравши розмір величини добутку $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$ і значення $\eta_{ел}$, визначаємо $\cos \varphi$ установки із співвідношення:

$$\cos \varphi = \frac{\cos \varphi \cdot \eta_{ел}}{\eta_{ел}} \quad (2.2)$$

а потім по отриманому значенню $\cos \varphi$ - остаточно шукану (номінальну) потужність трансформатора за формулою (2.3).

Таблиця 2.1 - Значення необхідні для розрахунку величин в залежності від марки сплаву, що виплавляється

Марка сплаву	$\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$	А кВт·год / т	с		ЕП	$j_{доп}$ А / см ²
			n = 0,25	n = 0,33		
ФС18	0,70÷0,68	2000÷2200	-	3,00	1,42÷1,99	7,0
ФС25	0,71÷0,69	2700÷2800	-	3,05	1,43÷1,99	7,0
ФС45	0,72÷0,70	4700÷4900	-	3,20	1,50÷2,00	7,0
ФС65	0,73÷0,71	7400÷7700	-	3,35	1,57÷2,02	7,0
ФС75	0,74÷0,72	8800÷9200	-	3,40	1,60÷2,03	7,0
ФС90	0,76÷0,74	12500÷13500	-	3,50	1,65÷2,04	8,4
Карбід кальцію	0,72÷0,70	2500÷3000	-	3,50	1,44÷1,50	6,8
СК30	0,68÷0,66	12000÷13000	7,7	-	1,34÷1,41	12,0
ФМн78	0,68÷0,65	3800÷4100	8,3	-	1,54÷1,49	7,6
ФХ400-ФХ800	0,75÷0,73	3450÷3600	8,6		1,44÷1,50	7,6
СМн17Р	0,69÷0,67	4100÷4700	6,7	-	1,34÷1,41	7,7
ФСХ40	0,72÷0,70	6200÷6500	7,4	-	1,53÷1,72	7,0

Примітка. Величини, що мають розбіг, слід обирати від меншої потужності к більшої у тому порядку, як вони приведені у таблиці.

2.2. Визначається корисна потужність, яка виділяється у ванні печі

$$P_{кор} = W \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{ел}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

де W - отримана залишкове номінальна потужність трансформатора;
 $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$ - величина, яка обрана з табл. 2.1.

2.3. Розраховується робоча корисна фазова напруга печі

$$U_{кор} = c \cdot P_{кор}^n, \text{ В} \quad (2.4)$$

де c і n - коефіцієнти, які залежать від виду процесу (шлаковий або

безшлаковий – n) та від марки сплаву (електричних характеристик шихти та електричного режиму – c). Від процесу визначає характер розподілу потужності. При безшлаковому (малошлаковому) процесі потужність переважно розподіляється по поверхні розплаву і $n=0,33$. При шлаковому процесі превалює об'ємне розподілення потужності та $n=0,25$. Значення коефіцієнту C для шлакового і безшлакових процесів приведено у табл. 2.1 в залежності від марки сплаву, що виплавляється.

2.4. Вторинне лінійне напруження пічного трансформатора визначається за формулою:

$$U_{\text{л}} = \frac{U_{\text{кор}} \cdot \sqrt{3}}{\cos \varphi \cdot \eta_{\text{ел}}} \quad (2.5)$$

За значенням $U_{\text{л}}$ розраховуються ступені вторинної напруги трансформатора, при цьому береться інтервал $(0,75 \div 1,2) U_{\text{л}}$ з перепадом між ступенями напруги $(4 \div 6) \text{ В}$.

2.5. Число ступеня напруги визначається з співвідношення

$$n = \frac{1.2 \cdot U_{\text{л}} - 0.75 \cdot U_{\text{л}}}{4 \div 6} + 1 \quad (2.6)$$

Складається таблиця ступенів напруження, вважаючи першим ступенем $n_1 = 0,75 U_{\text{л}}$, другим ступенем $n_2 = 0,75 U_{\text{л}} + 4 \div 6$ і т. д., до кінцевого ступеня $n_k = 1,2 U_{\text{л}}$

2.6. Сила струму в електроді визначається за формулою

$$I = \frac{P_{\text{кор}}}{3 \cdot U_{\text{кор}}}, \text{ кА} \quad (2.7)$$

2.7. З формули (1.2) за знайденою величиною сили струму в електроді визначається його діаметр

$$d_{\text{ел}} = \frac{E \Pi_1 \cdot I}{U_{\text{кор}}}, \text{ мм} \quad (2.8)$$

та округлюється до ближчого великого розміру, кратного 50. Значення критерію $E \Pi_1$, приведені в табл. 1.1. Після цього необхідно вибрати тип кожуху електрода (круглий, овальний), зміст електродної маси.

2.8. Перевірка правильності визначення діаметру робиться за допустимою густиною струму (j , А/см^2). Для цього визначається фактичне

значення j за формулою

$$j_{розр} = \frac{4 \cdot I}{\pi \cdot d_{ел}^2}, \text{ А / см}^2 \quad (2.9)$$

Ця фактична величина густини струму повинна бути меншою допустимої величини $j_{доп}$, значення якої приведено в табл. 2.2.

Якщо $j_{розр}$ перевищує $j_{доп}$, розрахунок необхідно повторювати, прийняв нове більш велике значення величини $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$.

2.9. Виконується перевірочний розрахунок $\eta_{ел}$.

$$\eta_{ел} = \frac{R_{\epsilon}}{R_{\epsilon} + r}, \quad (2.10)$$

де r - активний опір короткої мережі (приймається з таблиці 2.2);

$$R_{\epsilon} = \frac{U_{кор}}{I}, \quad (2.11)$$

2.10. Проводиться перевірочний розрахунок $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R_{\epsilon}} \right)^2}, \quad (2.12)$$

де x - реактивний опір ванни печі (приймається з таблиці 2.2).

Таблиця 2.2 - Значення r і x для печей різноманітної потужності

$W, \text{ мВА}$	$14 \div 17$	$21 \div 24$	$33 \div 63$
$r, \text{ Ом } 10^{-3}$	$0,20$	$0,17$	$0,14$
$x, \text{ Ом } 10^{-3}$	$1,02 \div 0,96$	$0,94 \div 0,90$	$0,88 \div 0,83$

2.11. Перевірочний розрахунок розміру величини $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$. Якщо величина не більш ніж на 50% відрізняється від прийнятого для розрахунку, то електричний розрахунок закінчено. Якщо відхилення більш 5%, то розрахунок необхідно повторити, прийняв в якості початкового середнє значення величини $\cos \varphi \cdot \eta_{ел}$ між раніш прийнятим і отриманим у результаті розрахунку. При повторенні розрахунку необхідно закріпити $\eta_{ел}$,

а із знов прийнятої величини $\cos\varphi \cdot \eta_{ел}$ визначити $\cos\varphi$. Повторити розрахунок в тій же послідовності.

3. РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕЧІ

3.1. Для феросплавних печей з круглою ванною

Визначення геометричних параметрів печі створюється після закінчення розрахунку електричних характеристик. Діаметр електроду є параметром, що пов'язує, між собою електричні характеристики та геометричні параметри. До геометричних параметрів (рис.3.1). відносяться

- D - діаметр шахти, мм;
- $d_{ел}$ - діаметр електроду, мм;
- L - глибина шахти, мм;
- L_1 - відстань від поверхні колошника до подини, мм;
- h - відстань від поверхні колошника до верхнього краю кожуха, мм;
- H - глибина занурювання електроду в шихту, мм;
- l - відстань від працюючого кінця електроду до подими, мм;
- f - відстань між електродом та футерівкою стін печі, мм;
- B - відстань між електродами, мм;
- D_o - діаметр розпадання електродів, мм;

Для шлакового процесу величина l розподіляється на два компоненти:

- l_1 - глибина розплаву, мм; при цьому глибиною металу зневажають;
- l_2 - відстань від поверхні розплаву до працюючого кінця електроду, мм.

З практики відомо, що при всьому різноманітті технологічних процесів та конструкцій печей величини l та h змінюються в порівняно невеликих межах: $h = 100 \div 200$ мм;

$$l = 600 \div 900 \text{ мм.}$$

Розрахунок геометричних параметрів ведеться з відповідністю до принципів геометричної подібності. При цьому приймається що в круглій трьохелектродній печі електроди розміщені по вершинам рівностороннього трикутника. У таблиці 3.1 приведені значення критеріїв геометричної подібності для головних геометричних параметрів рудовідновлювальних печей.

Будь-який геометричний (Π) параметр знаходиться із співвідношення

$$\Pi = \Pi' \cdot d_{ел} \quad (3.1)$$

наприклад, відстань між електродами

$$B = B' \cdot d_{ел} \quad (3.2)$$

Для перевірки правильності вибору товщини кутових обстановочних блоків та співвідношення між головними геометричними параметрами за

розрахунком нових розмірів на міліметровці виконується ескіз рудовідновлюваної печі. При цьому слід замітити, що мінімальна товщина вугільної обстановки повинна складати не менше 250 мм.

Таблиця 3.1 - Значення критеріїв геометричної подібності

Параметри	позначення	Технологічний процес	
		безшлаковий	шлаковий
Відстань між електродами	<i>B</i>	2,15 ÷ 2,85	2,24 ÷ 3,02
Діаметр ванни на рівні колошника	<i>D</i>	5,40 ÷ 5,80	5,80 ÷ 6,00
Діаметр ванни на рівні вугільних обстановочних блоків	<i>Дб</i>	5,10 ÷ 5,20	5,60 ÷ 5,80
Відстань від поверхні колошника до подини	<i>L</i>	1,8 ÷ 2,0	2,0 ÷ 2,5
Висота вугільної обстановки	<i>Нб</i>	0,65 ÷ 0,70	0,95 ÷ 1,10
Глибина занурювання електродів у шихту	<i>Н</i>	1,10 ÷ 1,20	0,85 ÷ 1,25
Відстань між електродами і футерівкою*	<i>Δ</i>	0,80 ÷ 0,90	1,10 ÷ 1,20
Відрізок між електродами*	<i>ρ</i>	2,00 ÷ 2,15	2,10 ÷ 2,635

* - для печей з прямокутною ванною

3.2. ДЛЯ ФЕРОСПЛАВНИХ ПЕЧЕЙ З ПРЯМОКУТНОЮ ВАННОЮ

Для феросплавних печей з прямокутною ванною (див. мал. 3.2) приймають електроди, що самоспікаються, прямокутного перетинання з співвідношенням сторін

$$n = a / b \approx 3,5 \div 4,5 \quad (3.3)$$

Для таких електродів в якості визначаючого лінійного розміру l_0 приймають:

$$\text{при } n < 4 \quad l_0 = D_l = \frac{2(a+b)}{\pi}; \quad (3.4)$$

$$\text{при } n = 4 \quad l_0 = D_s = \sqrt{\frac{4a \cdot b}{\pi}}; \quad (3.5)$$

$$\text{при } n > 4 \quad l_0 = \sqrt{D_l \cdot D_s} \quad (3.6)$$

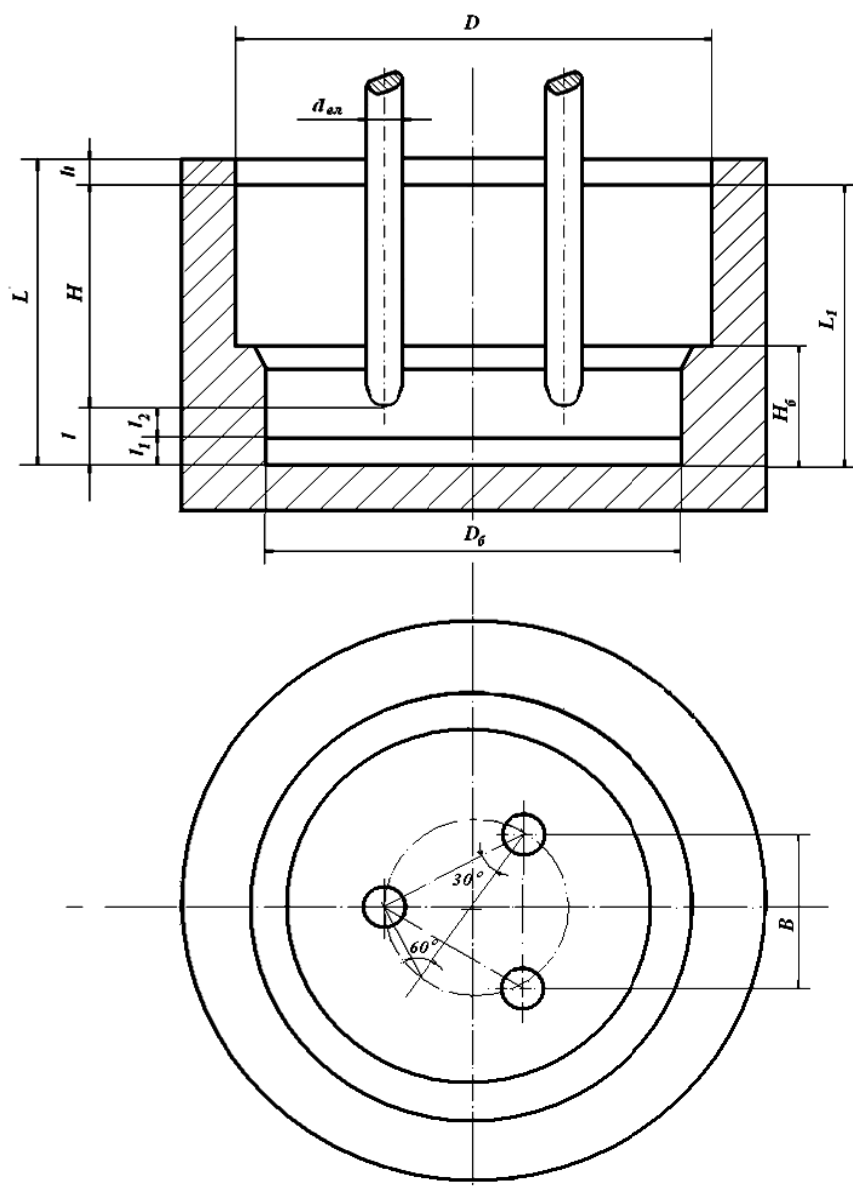


Рисунок 3.1 - Робочий ескіз печі з круглою ванною

ЗРАЗКОВИЙ РОЗРАХУНОК

Визначаємо геометричні розміри прямокутної ванни шестиелектродної руднотермічної печі потужністю 63 МВ·А для виробництва вуглецевого феромарганцю.

За даними ВНДІЕТО печі типу РПЗ 63 мають самоспикливі електроди перетином 3000x750 мм, співвідношення сторін перетину такого електроду $n = 4$, на підставі якого знаходимо визначаючий лінійний розмір геометричної подібності:

$$l_o = D_s = 2.25 \cdot 750 = 1687,5 = 1700 \text{ мм}$$

Відстань між осями електродів буде дорівнювати:

$$p = 2.1 \cdot 1700 = 3570 \text{ мм}, \\ \text{беремо } p = 3600 \text{ мм}$$

Враховуючи можливі збільшення лінійних розмірів ванни закритої руднотермічної печі на $0.25 D_s$, довжина робочого простору ванни буде:

$$l_b = 5 \cdot 3600 + 2 \cdot (1.2 + 0.25) \cdot 1700 = 7930 \text{ мм}, \\ \text{беремо } l_b = 8000 \text{ мм}$$

Глибина ванни

$$h_e = 2.65 \cdot 1700 = 4500 \text{ мм}$$

Заглиблення електроду в шихту

$$h_{en} = 1.1 \cdot 1700 = 1870 \text{ мм}$$

Висота кутової футерівки стін $V_{\phi} = 1050$ мм, визначаємо внутрішні розміри кожуху :

$$l_{\kappa} = 23000 + 2 \cdot 1050 = 25100 \text{ мм} \\ b_{\kappa} = 8000 + 2 \cdot 1050 = 10150 \text{ мм}$$

Отримані геометричні розміри відповідають розмірам ванни печі РПЗ 63.
На підставі отриманих даних будуємо ескіз печі див. рис. 3.2

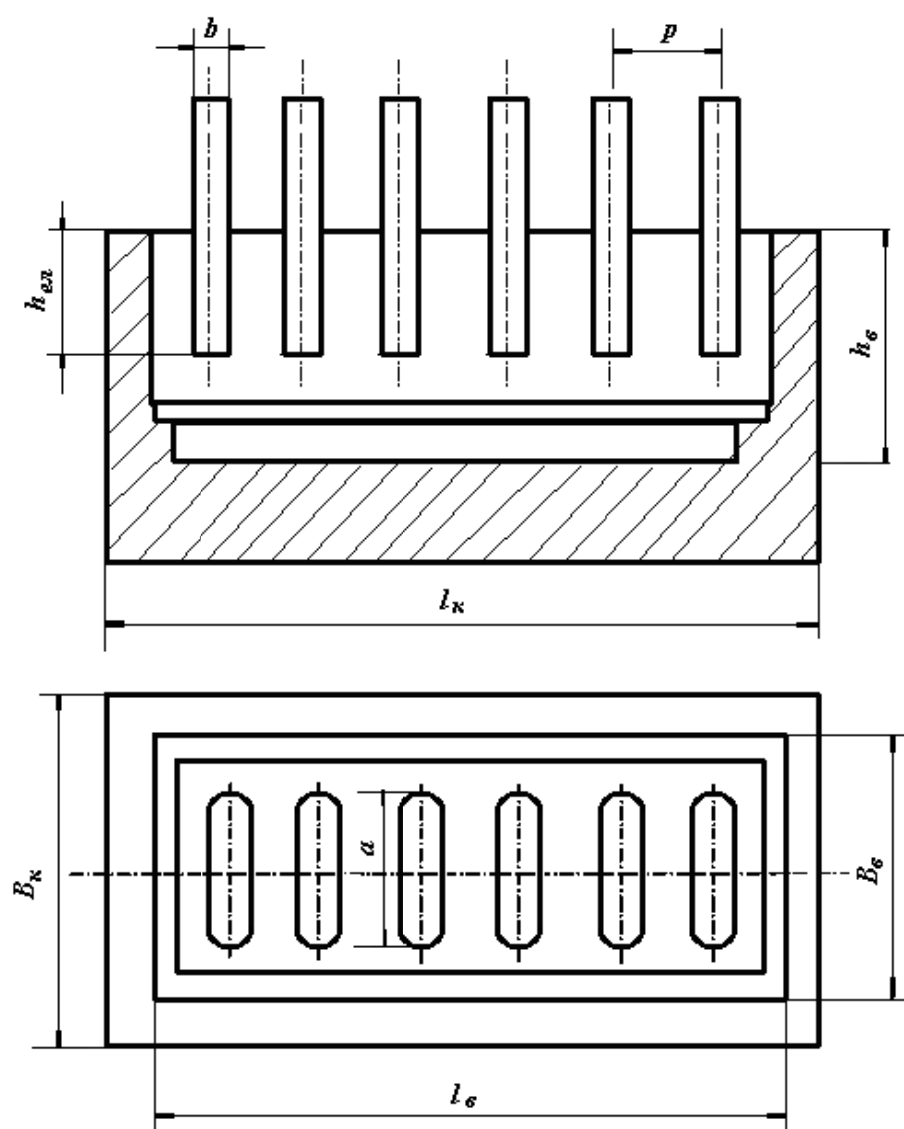


Рисунок 3.2 - Робочий ескіз печі з прямокутною ванною

4. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ БУДУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ З КРУГЛОЮ ВАННОЮ

Електричні характеристики рудовідновлювальних печей, подібні характеристикам дугових сталеплавильних печей, які повинні бути розраховані кількісно для всіх ступенів напруження пічного трансформатора, на практиці поширення не отримали.

Звісно, що рудовідновлювальні печі при нормальній роботі тривалий час використовують струм, близький до номінального значення струму трансформатора для вибраної ступені робочого напруження. З цієї причини немає необхідності розраховувати криві, що характеризують електричні режими пічної установки у широкому діапазоні зміни струму навантажування при незмінному напруженні трансформатора, цікавість представляють тільки ті невеликі відрізки кривих, які відповідають значенням струму, близьким до номінальних для кожної ступені напруження трансформатора. Таким чином, трудомісткий розрахунок електричних характеристик рудовідновлювальних пічних установок не справдовується ступенем використання розрахункового матеріалу.

І. Т. Жердьовим та А. Л. Корнєвичем запропонував і інший вигляд електричних характеристик рудовідновлювальних печей, більш зручні для практичного використання.

Незалежною змінною для цих характеристик обрано активний опір електричного кола пічної установки використовується до перетвореної схеми заміщення - зірка без силового проводу.

Характеристики розраховуються на основі врахування паспортних даних пічного трансформатора, при звичайному допущенні постійності індуктивних опорів короткої мережі (X_K) та ванни печі (X_B), а також постійності опору короткої мережі (R_K). Таким чином, мінливим регульованим опорам в електричному ланцюзі пічної установки залишається тільки активний опір ванни печі (R_B). При будіванні характеристик по осі горизонталей в обраному масштабі відкладається повний активний опір пічної установки, дорівнює $R = R_K + R_B$.

Нижче приведено розрахунок усіх величин, що характеризують режим електричного кола, для першого ступеня робочого напруження пічного трансформатора із заданою потужністю S_H , кВА.

Початковими даними для розрахунку є паспорт електричного трансформатора та результати розрахунку короткої мережі електропічної установки.

$$(U_{2Л}; I_{2Л}; X = X_K + X_B; R_K)$$

де $U_{2Л}$ - лінійне напруження, кВТ;

$I_{2Л}$ - лінійний струм, кА;

X_K - індуктивний опір короткої мережі, Ом;

R_K - активний опір короткої мережі, Ом;

X_B - індуктивний опір ванни печі.

Значення опорів ділянок електропічного контуру феросплавних трьохелектродних печей наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Значення опорів ділянок електропічного контуру феросплавних трьохелектродних печей.

Тип печі	Реактивний опір, мОм			Активний опір, мОм	
	Трансформатор	Коротка мережа (X_K)	Ванна та електроди	Коротка мережа (X_K)	електрод
PK3 12,5	$\frac{0,19}{0,19}$	$\frac{0,450}{0,450}$	$\frac{0,470}{0,520}$	$\frac{0,035}{0,035}$	$\frac{0,076}{0,058}$
PK3 24	$\frac{0,15}{0,15}$	$\frac{0,350}{0,350}$	$\frac{0,580}{0,580}$	$\frac{0,035}{0,035}$	$\frac{0,039}{0,039}$
PK3 33	$\frac{0,13}{0,13}$	$\frac{0,350}{0,350}$	$\frac{0,580}{0,640}$	$\frac{0,035}{0,035}$	$\frac{0,039}{0,030}$
PK3 50	$\frac{0,12}{0,12}$	$\frac{0,350}{0,350}$	$\frac{0,660}{0,740}$	$\frac{0,035}{0,035}$	$\frac{0,026}{0,021}$
PK3 63	$\frac{0,11}{0,11}$	$\frac{0,350}{0,350}$	$\frac{0,700}{0,740}$	$\frac{0,035}{0,035}$	$\frac{0,024}{0,021}$
PK3 80	0,09	0,350	0,740	0,035	0,021

Примітка: У чисельнику наведені дані для печей, призначених для плавки, з відносно малими струмами і у знаменнику – для печей з відносно великими струмами.

4.1. За номінальним значенням $U_{2Л}$ та $I_{2Л}$ розраховується фазний опір пічної установки

$$z = \frac{U_{2Л}}{I_{2Л} \cdot \sqrt{3}}, \text{ Ом} \quad (4.1)$$

4.2. Активний опір пічної установки

$$R = \sqrt{z^2 - x^2}, \text{ Ом} \quad (4.2)$$

4.3. Активний опір ванни печі

$$R_B = R - R_K, Ом \quad (4.3)$$

4.4. Повний опір ванни печі

$$Z_B = \sqrt{x^2 + R_B^2}, Ом \quad (4.4)$$

4.5. Напруга, підведена до ванни печі,

$$U_B = \sqrt{3} \cdot I_{2л}^2 \cdot z_B, В \quad (4.5)$$

4. 6. Активна потужність, яка споживається з мережі ;

$$P_C = 3I_{2л}^2 \cdot Z_B, МВт \quad (4.6)$$

4.7. Корисна активна потужність,

$$P_B = 3I_{2л}^2 \cdot R_B, МВт \quad (4.7)$$

4.8. Потужність втрат

$$P_{EB} = 3I_{2л}^2 \cdot R_K, МВт \quad (4.8)$$

4.9. Удавана потужність

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{2л} \cdot I_{2л}, мВА \quad (4.9)$$

4.10. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (4.10)$$

4.11. Електричний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{ел} = \frac{R_B}{R_K + R_B} \quad (4.11)$$

Аналогічним чином розрахунки проводяться для всіх ступенів напруги пічного трансформатора. Результати розрахунків зводяться в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Електричні характеристики пічної установки

№ п/п	$U_{2л}$ <i>В</i>	$I_{2л}$ <i>А</i>	z <i>Ом</i>	R <i>Ом</i>	R_{ϵ} <i>Ом</i>	z_{ϵ} <i>Ом</i>	P_o <i>кВт</i>	P_{ϵ} <i>кВт</i>	$P_{еп}$ <i>кВт</i>	S <i>кВа</i>	$\cos \varphi$	$\eta_{ел}$	U_{ϵ} <i>А</i>
1													
2													
...													

Результати розрахунків більш зручно використовувати в випадку, коли вони представлені у вигляді електричних характеристик, побудованих у функції активного опору пічної установки.

Приклад таких характеристик, розрахованих для руднотермічної печі з трансформатором 16,5 МВА, показано на рис. 4.1.

Характеристики доводять доцільність збільшення активного опору ванни печі, так як при цьому збільшується за рахунок збільшення коефіцієнтів потужності та корисної дії.

Слід відмітити, що прийняти для розрахунку постійні значення опорів короткої мережі та ванни (x_k, R_k і x_e) в дійсності змінюються в залежності від величини струму навантаження, від розподілу густини струму у ванні та від інших факторів, але відсутність надійних та точних методів розрахунку цих опорів дозволяє уточнити характеристики тільки після дослідженої перевірки на діючій печі.

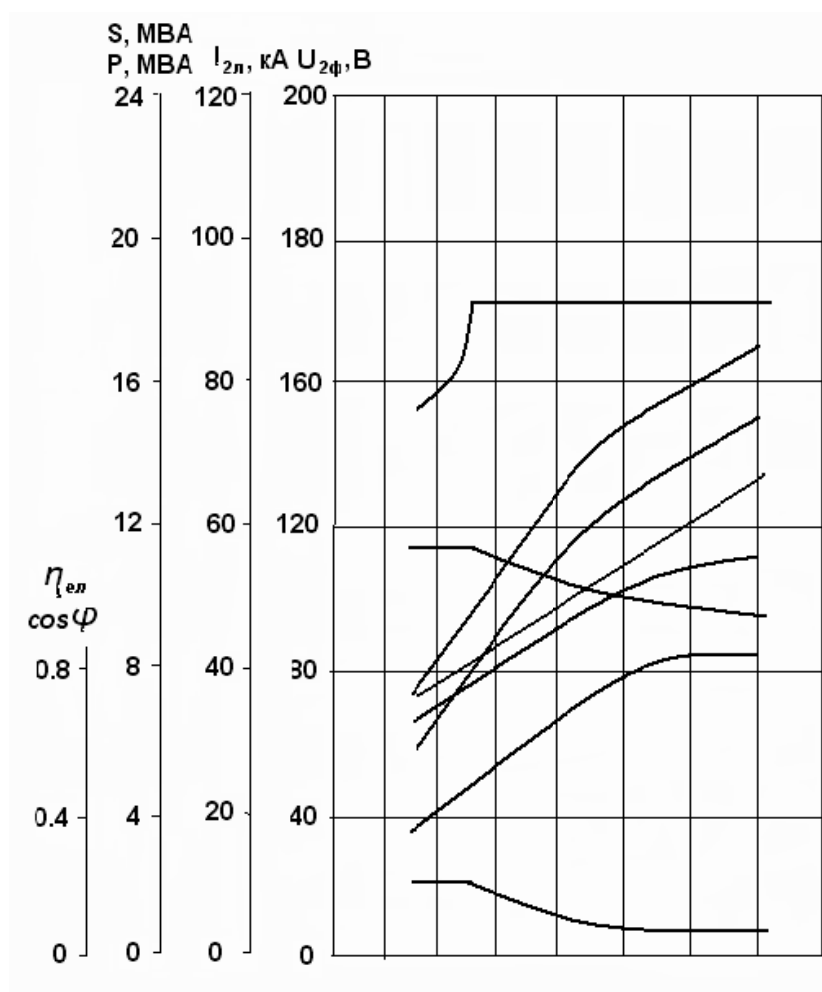


Рисунок 4.1 - Електричних характеристик руднотермічної печі

5 ТЕПЛООБМІН У РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧАХ

Фізичне явище перенесення теплоти під Дією градієнта температури характеризуються як стаціонарний або нестаціонарний процес. Стаціонарним процесам притаманна постійність в часі всіх параметрів процесу. В цьому випадку температура залежить лише від координати точки тепла і не залежить від часу $\partial T / \partial t = 0$, і послідовно, при постійності параметрів в часу постійними будуть і їх градієнти. Нестаціонарний процес характеризується тим, що параметри процесу залежать не тільки від координат, але і від часу:

$$T = f(x, y, \tau).$$

В руднотермічних плавильних агрегатах відбувається нагрівання речовини до заданої температури (нестаціонарний процес), супроводжений теплообміном з навколишнім простором. В інженерній практиці теплотехнічних розрахунків плавильних установок процес теплообміну з навколишнім середовищем характеризується як стаціонарний процес, при якому забезпечується рівняння теплових потоків від нагрітого до заданої температури розплаву к внутрішній поверхні печі ($q_{вн}$), передавання теплоти через багат шарову стінку (q_{cm}): вдалину від її зовнішньої поверхні в навколишній простір ($q_{зов}$).

Для зниження втрат теплоти із-за теплопровідності стінок, обмежуючих плавильний простір, їх виконують з вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів з металевим кожухом з зовнішньої сторони. Припустима температура для теплоізоляційних матеріалів нижче, чим для вогнетривких матеріалів, але їх мала теплопровідність дозволяє знизити теплові втрати. При проектуванні та експлуатації руднотермічних печей практична цікавість представляють питання вибору матеріалів і розмірів футерівки, а також особливості розподілу температур, і, відповідно, тепловий режим роботи футерівки.

Процес теплообміну між двома середовищами через тверду стінку або кордону розділу називається теплопередачею та реалізується по одному із наступних механізмів:

- теплопередача конвекцією;
- теплопередача теплопровідністю (теплообмін у нерухомому середовищі);
- теплопередача випромінюванням.

5.1 Розрахунок конвективного теплообміну

При конвективному теплообміні кількість тепла, що передається, (Q) знаходиться по закону Ньютона і залежить від руху середовища:

$$Q = \alpha \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{навк}}) \cdot F \cdot \tau \quad (5.1)$$

де $T_{\text{пов}}$, $T_{\text{навк}}$ - температури поверхні тіла та навколишнього середовища;
 F - поверхня теплообміну, м^2 ;
 t - тривалість процесу, с ;
 τ - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

При руху середовища, що забезпечує теплоперенесення, розрізняють примусовий і природний рух. Перше виникає під дією зовнішньої сили і представляє собою організований рух, характеризуємо критерієм Рейнольда. Природний рух середовища виникає із-за різниці густини фази, причиною якої є різниця температур, коли температура нижніх шарів більша за температуру верхніх. Відносно зміни густини знаходиться величиною $\beta_o \cdot \Delta T$, де β_o - температурний коефіцієнт об'ємного розширення. При нагріві на одиницю об'єму середовища діє піднімальна сила, яка дорівнює

$$g \cdot \beta_o \cdot \Delta T,$$

а на весь об'єм середовища:

$$g \cdot \beta_o \cdot \Delta T \cdot l^3,$$

де l - шуканий лінійний розмір середовища. Руху середовища перешкоджають сили інерції, що залежать від в'язкості середовища (ν). У теплотехнічних розрахунках природного руху середовища вводять критерій Грасгофа Gr , що виражає відношення піднімальної сили к силі інерції:

$$Gr = \left(\frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \right) \cdot \beta_o \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

При одночасному існуванні незалежного і примусового руху вклад їх порівнянний, якщо $Gr \approx Re^2$, при $Gr \leq 0,3 Re^2$, вклад повільного руху не перевищує 5% і їм можливо зігнорувати.

Для характеристики теплових процесів у рідинах і газах застосовують також критерій Прандтля (Pr), що визначає співвідношення між інтенсивністю молекулярного переносу кількості руху і переносу теплоти теплопровідністю

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5.3)$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості;
 λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м · К;
 C_p - питома теплоємність середовища;
 α - коефіцієнт температуропровідності,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}, \text{ м}^2 / \text{с}$$

Коефіцієнт температуропровідності характеризує швидкість вирівнювання температури в тілі. Величина цієї швидкості тим більше, чим більше коефіцієнт теплопровідності і менше теплоємності. Теплопровідність λ залежить від температури, але не залежить від градієнта температури і представляє собою щільність теплового потоку при зміні температури на одиницю довжини на один градус.

Для газів значення критерій Прандтля з змінням температури практично не змінюється і для двохатомних газів містять $\approx 0,72$, для трьох та багатоатомних газів значення Pr знаходяться в межах від 0,75 до 1,0.

Інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і потоком газу (рідини) у випадку примусової і природної конвекції характеризується критерієм Нуссельта (Nu):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (5.4)$$

Нижче приведені значення коефіцієнтів c і n (додаток Г).

Розрахунок процесу конвективного теплообміну з розрахунком приведених теплотехнічних залежностей виконується у наступній послідовності: ;

- знаходження характерної температури поверхні;
- знаходження по довідковим даним фізичних властивостей навколишнього середовища;
- знаходження значень критеріїв Прандтля і Грасгофа;
- знаходження значень коефіцієнтів c і n ;
- знаходження критерію Нуссельта;
- знаходження коефіцієнта теплопровідності;
- розрахунок теплових потоків і кількості тепла, що передається конвекцією.

Наприклад. Знайти втрати тепла конвекцією з одиниці поверхні подини, стін і водоохолоджуваного склепіння руднотермічної печі, розміри кожуху якої:

діаметр	- 10 м,
висота стін	- 5 м.
Температура: стінки кожуху	- 180°C,
подини	- 200°C,
стінки склепіння	- 80°C.
повітря	- +20°C.

1. Теплові втрати поверхні стін конвекцією.

1.1. Характерна температура поверхні стін

$$t' = \frac{t_{cm} + t_{нов}}{2} = \frac{180 + 20}{2} = 100^\circ C$$

1.2 При температурі $100^\circ C$ фізичні властивості повітря наступні:

$$\rho = 0,946 \text{ кг/м}^3; \quad \lambda \cdot 10^2 = 3,22 \text{ Вт/м}^2 \cdot K \quad Pr = 0,688$$

$$\alpha \cdot 10^4 = 0,337 \text{ м}^2/\text{с}; \quad \nu \cdot 10^6 = 23,13 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\beta_o = \frac{1}{t + 273} = \frac{1}{373} = \frac{1}{K}$$

1.3. Значення безрозмірного комплексу ($Gr \cdot Pr$)

$$\frac{g \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu} \cdot Pr = \frac{9.81 \cdot 160 \cdot 5^3}{373 \cdot (23.13 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.688 = 6.764 \cdot 10^{11}$$

1.4. Отриманому значенню комплексу ($Gr \cdot Pr$) співвідносять параметри $s = 0,135$ і $n = 1/3$.

1.5. Визначаємо значення критерій Нуссельта

$$Nu = 0.135 \cdot (6.764 \cdot 10^{11})^{1/3} = 1174$$

1.6 Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі

$$\frac{Nu \cdot \lambda}{H} = \alpha = \frac{1174 \cdot 3.22 \cdot 10^{-2}}{5} = 7.56 \text{ Вт/м}^2 \cdot K$$

При розрахунку теплового стану подини, стін і склепіння печі слід урахувати, що якщо поверхня теплообміну кверху (склепіння), то розрахункове значення α потрібно збільшити на 30%, а якщо поверхня теплообміну – книзу (подібна печі), то значення α зменшується на 30%.

1.7. Щільність теплового потоку з стін печі складає

$$g_{cm} = 7.56 \cdot (180 - 20) = 1210 \text{ Вт/м}^2$$

Кількість тепла, що передається поверхнею стін печі за 1 годину, змістить

$$Q = g_{cm} \cdot F = g_{cm} \cdot \pi \cdot D \cdot H = 1200$$

5.2 Розрахунок передачі тепла теплопровідністю

У твердих тілах теплопровідність визначається ґратами які містять λ_r , пов'язаного з тепловими коливанням атомів і електронної містящої λ_1 - передача теплоти за розрахунок руху електронів. Останній вид теплопровідності переважає у тілах, маючих не займані електрони - метали і

напівпровідники. Для більшої кількості металів з змінням температури від 0 до 873 К теплопровідність зменшується приблизно на 15%. Теплопровідність пористих матеріалів значно менше теплопровідності суцільних тіл, так як пори являються теплоізоляторами. З збільшенням температури теплопровідність пористих тіл збільшується по причині збільшення частини теплоти, яка передається в порах випромінюванням.

По значенню теплопровідності всі матеріали можна розподілити на три групи:

- перша група: метали та напівпровідники, (теплопровідність у інтервалі $6 \div 0,6$ Вт/м·К);
- друга група: кераміка та вогнетривкі матеріали.
- третя група: теплоізоляційні матеріали (теплопровідність менш 0,6 Вт/м·К).

При проектуванні руднотермічних печей та виборі оптимального теплового режиму їх роботи приходиться вирішувати задачі теплообміну між середовищами, що складаються із матеріалів усіх трьох груп.

На мал. 8 представлено тіло, що складається із трьох матеріалів

Температура на кордоні будь-якої пари шарів приймається рівною оскільки при стаціонарному процесі щільність теплового потоку в усіх шарах однакова і відсутність накопичення або зниження теплоти на кордоні шарів. Температури шарів $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$.

Для кожного шару рівняння теплопровідності запишеться у вигляді:

$$g_1 = \frac{\lambda_1 \cdot dT}{dX} \quad (5.4)$$

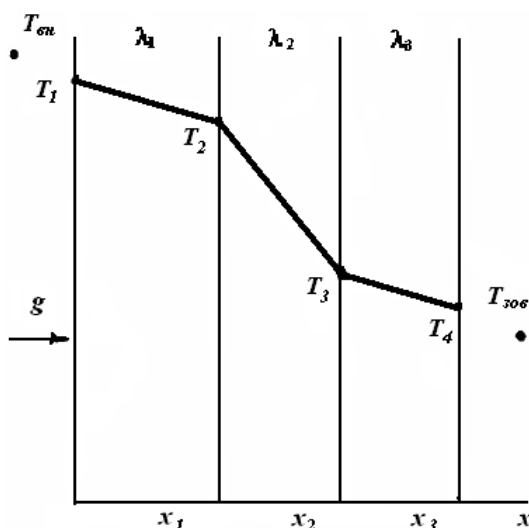


Рисунок 5.1 - Схема розподілення температур в плоскій трьохшаровій стінці

Інтегрування цього вираження дає залежність температури в межах i - шара.

$$T = T_1 - g_1 \int_0^x \frac{dX}{\lambda_1} \quad (5.5)$$

Якщо з збільшенням температури теплопровідність збільшиться, то температурна крива буде опуклою, якщо теплопровідність зменшиться, то температурна крива буде вигнутою.

Для розглянутого випадку, перепад температур в кожному шарі можна записати наступним образом:

$$T_1 - T_2 = \frac{g_1 \cdot X_1}{\lambda_1}; \quad T_2 - T_3 = \frac{g_2 \cdot X_2}{\lambda_2}; \quad T_3 - T_4 = \frac{g_3 \cdot X_3}{\lambda_3};$$

Оскільки $g_1 = g_2 = g_3 = \dots = g_n = const$, то підсумувавши праві та ліві частини приведених рівнянь, отримуємо

$$T_1 - T_4 = g \left[\left(\frac{x_1}{\lambda_1} \right) + \left(\frac{x_2}{\lambda_2} \right) + \left(\frac{x_3}{\lambda_3} \right) \right] \quad (5.6)$$

та, відповідно

$$g = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{x_1}{\lambda_1} \right) + \left(\frac{x_2}{\lambda_2} \right) + \left(\frac{x_3}{\lambda_3} \right)} = \frac{T_1 - T_4}{\sum R} \quad (5.7)$$

де $R = \frac{x}{\lambda}$ - тепловий опір шару, $m^2 \cdot \text{град}/\text{Вт}$.

В даному випадку n шарів щільність теплового потоку g визначається по формулі:

$$g = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\lambda_i} \right)} \quad (5.8)$$

Якщо площа шарів футеровий неоднакові (циліндрична футеровка), то тепловий потік через кожний шар визначають по рівнянню (5.9)

$$Q = g \cdot F_{cp1} = \frac{T_1 - T_{i+1}}{\frac{R_1}{F_{cp1}}} \quad (5.9)$$

де F_{cp1} - усереднена для кожного шару площа поверхні.

$$\text{При } \frac{F_{i+1}}{F_1} < 2, \quad F_{cp} = 0.5(F_1 + F_{i+1}),$$

а при значеннях $\frac{F_{i+1}}{F_1} \geq 2$, $F_{cp} = (F_1 + F_{i+1})^{0.5}$

Для тіл циліндричної форми за умови коли співвідношення площ шарів менш 2, що найбільш часто зустрічається на практиці, розрахунок теплового потоку визначається по формулі для плоскої стінки:

$$Q = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \cdot F_1} \right) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{2x_1}{\lambda_1} \cdot (F_i + F_{i+1}) \right] + \left(\frac{1}{\alpha_{\text{зов}} \cdot F_{\text{зов}}} \right)} \quad (5.10)$$

Величина коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{\text{вн}}$ як завжди велика, і по цьому температура робочого простору $T_{\text{зов}}$ по значенню близька к T_1 , що дозволяє прирівнювати ці температури у розрахунках та понизити член $\left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \cdot F_1} \right)$ у рівнянні (5.10).

Значення коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{\text{зов}}$ розраховується по рівнянню (5.11)

$$\alpha = A \cdot [10 + 0.06 \cdot (T_{\text{зов}} - T_o)], \quad (5.11)$$

де A - коефіцієнт, враховуючий орієнтацію поверхні.

1,63 - для горизонтальної поверхні, поверненою донизу;

2,56 - для вертикальної поверхні;

3,26 - для горизонтальної поверхні, поверненою доверху).

При розрахунках теплових втрат теплопровідністю температура на кордонах шарів і на зовнішній поверхні як завжди невідома, тому ця величинами задається, приймаючи до уваги, що температура внутрішньої поверхні гарнісажних печей дорівнювати температурі плавлення самого тугоплавкого компонента шихти, а у печей, працюючих з футерівкою, $T_{\text{зов}}$ як правило приймається рівними температурі розплаву при випуску.

Температуру усередині i - шару приймають рівній $\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$,

теплопровідність i - шару футерівки визначають із виразу:

$$\lambda_i = a_i + 0.5 \cdot b_i \cdot (T_i + T_{i+1}) \quad (5.12)$$

де a , b - коефіцієнти температурної залежності теплопровідність (довідникові дані).

Розрахунок теплових втрат теплопровідністю полягає в наступному:

1. Задають температуру на кордоні шарів та на зовнішній стінці ($T_{\text{зов}} \leq 150$ °C)

2. Розраховують коефіцієнти теплопровідності кожного шару по рівнянню (5.12).
3. Розраховують коефіцієнти тепловіддачі рівнянню (5.4) величину $R_{\text{зов.}}$.
4. Визначають сумарний приведений опір.

$$R_{\Sigma} = R_{\text{вн}} + R_i + R_{\text{зов.}} \quad (5.13)$$

5. Визначають теплові втрати по рівнянню (5.10).
6. Перевіряють значення температури на кордонах шарів та зовнішньої стінки по рівнянню

$$T_{i=n+1} = T_1 - Q \sum_{i=1}^n R \quad (5.14)$$

7. Якщо різниця між розрахунковими та заданим значеннями температур перевищує 5%, то слід задатися новим значенням температури або змінити товщину шару футерівки та перерахувати розрахунок з пункту 1.

Наприклад. Розрахувати футерівку подини руднотермічної печі, що виплавляє вуглецевий феромарганець.

1. Розрахункова схема футерівки та попередньо заданий розподіл температур по шарам футерівки наведені на рисунку 5.2.

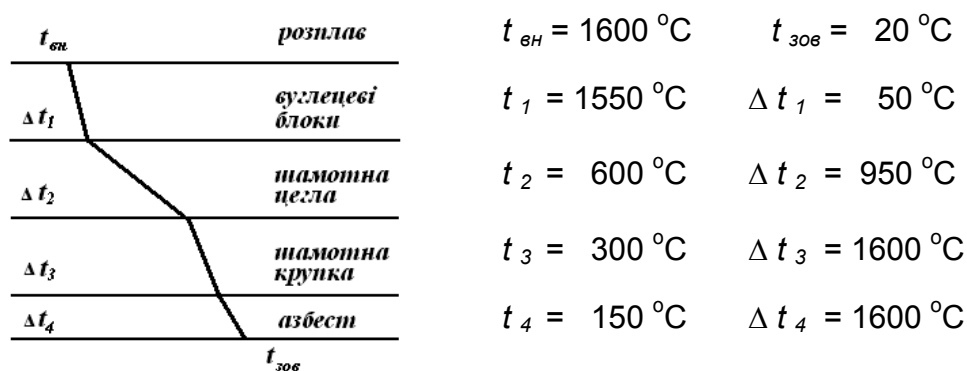


Рисунок 5.2 - Схема футерівки печі та розподіл температур

2. В відповідності з довідковими даними, коефіцієнт теплопровідності для обраних вогнетривких та ізоляційних матеріалів складає:

вуглецеві блоки	$\lambda_{\text{бл.}} = 7,9 + 0,014 t, \quad \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
шамотна цегла	$\lambda_{\text{ш.ц.}} = 0,7 + 0,00064 t, \quad \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
шамотна крупка	$\lambda_{\text{ш.к.}} = 0,225 + 0,00022 t, \quad \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
азбестовий картон	$\lambda_{\text{азб.}} = 0,157 + 0,00014 t, \quad \text{Вт/м}\cdot\text{К}$

Визначаємо середні температури шарів та коефіцієнтів теплопровідності:

$$\bar{t}_{\bar{\delta}_l} = 0.5(1600 + 1550) = 1575^\circ C \quad \bar{\lambda}_{\bar{\delta}_l} = 29.95 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$$

$$\bar{t}_{ш.ц.} = 0.5(1550 + 600) = 1075^\circ C \quad \bar{\lambda}_{ш.ц.} = 1,388 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$$

$$\bar{t}_{ш.к.} = 0.5(600 + 300) = 450^\circ C \quad \bar{\lambda}_{ш.к.} = 0,324 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$$

$$\bar{t}_{азб} = 0.5(300 + 150) = 225^\circ C \quad \bar{\lambda}_{азб} = 0,188 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$$

Оскільки $R_{\bar{\delta}_l} = \Delta t_1 / g$, та обираючи на підставі практичних даних величину щільності теплового потоку $g = 2000 \text{ Вт/м}^2$, отримуємо

$$R_{\bar{\delta}_l} = \Delta t_1 / g = 50 / 2000 = 0.25 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

В свою чергу, тепловий опір вогнетривкого шару подини, що складається із вуглецевих блоків $R_{\bar{\delta}_l}$ визначається залежністю $R_{\bar{\delta}_l} = x / \lambda_{\bar{\delta}_l}$, тоді товщина шару вуглецевих блоків складе:

$$x = R_{\bar{\delta}_l} \cdot \lambda_{\bar{\delta}_l} = 29.95 \cdot 0.25 = 0.75 \text{ м}$$

Опір шару шамотної цегли визначається аналогічно.

$$R_{ш.ц.} = \Delta t_2 / g = 950 / 2000 = 0.4715 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

$$x_{ш.ц.} = R_{ш.ц.} \cdot \lambda_{ш.ц.} = 1,388 \cdot 0.475 = 0.66 \text{ м}$$

Беремо шамотну кладку із 10 рядків цегли, укладеної на «плашку»:

$$10 \cdot 0,065 = 0,65 \text{ м}$$

Визначаємо опір та товщину шамотної крупки:

$$R_{ш.к.} = \Delta t_3 / g = 300 / 2000 = 0.15 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

$$x_{ш.к.} = R_{ш.к.} \cdot \lambda_{ш.к.} = 0,324 \cdot 0.15 = 0.5 \text{ м}$$

Товщину шару шамотної крупки з 10% запасом на невраховані теплові втрати беремо 0,06 м.

Визначаємо опір і товщину теплоізоляційного шару азбестового картону:

$$R_{азб} = \Delta t_4 / g = 150 / 2000 = 0.075 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

$$x_{азб} = R_{азб} \cdot \lambda_{азб} = 0,188 \cdot 0.075 = 0.5 \text{ м}$$

Беремо два шари азбестового картону товщиною по 0,006 м, що у сумі складає 0,012 м.

Сумарна товщину футерівки складає:

$$0,012 + 0,06 + 0,65 + 0,8 = 1,522 \text{ м.}$$

3. Визначення коефіцієнту тепловіддачі (λ_{306}) та зовнішнього теплового опору R_{306} :

$$\alpha = 1,63 \cdot [10 + 0,06 \cdot (T_{306} - T_o)] = 1,63 \cdot [10 + 0,06 \cdot (423 - 293)] = 12,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$R_{306} = \frac{1}{\alpha_{306}} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

4. Сумарний тепловий опір футеровки R_{Σ} :

$$R_{\Sigma} = \frac{x_{\text{бл}}}{\lambda_{\text{бл}}} + \frac{x_{\text{ш.ц.}}}{\lambda_{\text{ш.ц.}}} + \frac{x_{\text{ш.к.}}}{\lambda_{\text{ш.к.}}} + \frac{x_{\text{азб}}}{\lambda_{\text{азб}}} + \frac{1}{\alpha_{306}} =$$

$$= \frac{0,8}{29,95} + \frac{0,65}{1,388} + \frac{0,06}{0,324} + \frac{0,012}{0,188} + 0,078 = 0,82 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$$

5. Щільність теплового потоку $g = Q/F_{cp}$ складає

$$g = \frac{T_{\text{вн}} + T_{306}}{R_{\Sigma}} = \frac{1600 - 150}{0,820} = 1758 \text{ Вт/м}^2$$

6. Перевірка прийнятого значення температури зовнішньої стінки $T_{306} = 150^\circ \text{C}$:

$$\text{так як } g = \frac{T_{\text{вн}} + T_{306}}{R_{306}}, \text{ то } T_{306} - T_o = g \cdot R_{306}, \text{ звідкіля}$$

$$T_{306} - T_o = 1768 \cdot 0,078 = 137,9^\circ \text{C}$$

Оскільки отримане значення близьке до прийнятого $\Delta T = 180^\circ \text{C}$, розрахунок закінчено.

5.3 Передача теплоти випромінюванням

Передача теплоти випромінюванням виконується в багатьох металургійних процесах і являється основним видом теплопередачі у вакуумі. В квантовій теорії теплове випромінювання роздивляється як поширювання електромагнітних хвиль інфрачервоної області спектра і характеризується довжиною хвиль від 0,72 до 400 мкм. Для рішення цілого ряду експериментальних задач в області теплотехніці необхідно застосовувати модельне представлення абсолютно чорного тіла з поглинаючою придатністю теплового випромінювання рівній 1. Тіла, які не пропускають теплову енергію, визначаються як сірі тіла. Гази мають близьку до нуля придатність, що відбиває. Випромінювання тіл та поглинання променистої енергії і, як наслідок, нагрівання тіл зв'язані з фізичними

процесами на міжатомному рівні. Теплове випромінювання при цьому розглядається як потік фотонів, які викликані переходом збуджених електронів з більш віддалених атомних орбіт на стійкі. Зворотний процес відбувається при поглинанні променистої енергії. Для розрахунку випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла використовують рівняння Стефана - Больцмана:

$$g = \sigma_o \cdot T^4 = c_o (0.01 \cdot T)^4 \quad (5.15)$$

де $\sigma_o = 5,76 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ і $c_o = 5,76 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коефіцієнти випромінювальної здатності чорного тіла.

Для визначення густини теплового потоку променистої енергії сірого тіла використовують рівняння

$$g = \varepsilon \cdot \sigma_o \cdot T^4 \quad (5.14)$$

де ε - ступінь чорноти поверхні (0...1).

Для визначення втрат тепла випромінюванням з поверхні печі можна використовувати рівняння

$$g = c_o \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{нагр}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{навк}}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.15)$$

Наприклад. Визначити втрати тепла випромінюванням з поверхні стін руднотермічної печі діаметром кожуху 7 м та висотою стін 4,2 м. Температура зовнішньої поверхні кожуху 150°C, температура навколишнього середовища 20°C.

Для матеріалу кожуху (сталь листова) 5 складає 0,82 (див. додаток Б).

Оскільки тепловий потік Q визначається з вираження

$$Q = g \cdot F, \text{ то}$$

$$Q = 0.82 \cdot 5.76 \cdot \pi \cdot 4.2 \cdot 7 (4.23 - 2.93) = 107460 \text{ Вт}$$

Відповідно, питомий потік випромінювання складе

$$g = \frac{Q}{F} = 1164 \text{ Вт/м}^2$$

Сумарний тепловий потік, випромінюваний піччю у навколишній простір, складається із частин тепла, що переноситься конвекцією ($g_{\text{конв}}$), та передачі тепла випромінюванням ($g_{\text{випр}}$) і дорівнює, у свою чергу, тепловому потоку, минаючому через футеровку печі, що являється обов'язковою умовою стаціонарності теплового процесу:

$$g_{\Sigma} = g_{\text{конв}} + g_{\text{випр}} = g_{\text{фут}} \quad (5.16)$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д. Я. Поволоцкий. Б.Е.Рощин. М.А. Рысс и др.: под ред. Д.Я. Поволоцкого. - М.:Металлургия. 1984, - 568 с.
2. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электропечей металлургии. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Металлургия. 1997, - 280 с.
3. Романец В. А., Леонтьев А. М. Дуговые сталеплавильные печи. М. Металлургия. 1971, 216 с.
4. Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей. --М.: Энергия. 1977. -304 с.
5. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей. - Л. : Госэнергоиздат . 1969. -440с.