

## Практичне заняття

### РОЗРАХУНОК НАГРІВУ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛУ

Як правило, нагрівання в промислових печах не є симетричним, що враховується розрахунковою товщиною виробу, що визначається за формулою:

$$S = \mu \cdot \delta, \quad (1.1)$$

де  $\delta$  – геометрична товщина тіла, м;  
 $\mu$  – коефіцієнт несиметричної нагріву (при односторонньому нагріві  $\mu=1$ , при двосторонньому  $\mu=0,5$ ).

У разі первинного параболічного розподілу температури (наприклад, під час переходу металу з методичної в зварювальну зону методичної печі) як первинна температура в температурному критерії слід використовувати середню температуру металу.

#### *Розрахунок випромінювання сірих тіл*

Щільність півсферичного випромінювання сірих тіл визначається за законом Стефана – Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot (T/100)^4, \quad (1.2)$$

де  $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon$  – міра чорноти;

$T$  – абсолютна температура, К.

Згідно із законом Кирхгофа міра чорноти випромінювання сірих тіл дорівнює їх поглинальній здатності –  $A$ , т. е.

$$\varepsilon = A. \quad (1.3)$$

Міра чорноти об'єму продуктів згорання може бути знайдена за формулою:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (1.4)$$

де  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  – міра, чорнота вуглекислого газу, що міститься в продуктах згорання;

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – міра чорноти водяної пари;

$\beta$  – поправочний коефіцієнт.

Міри чорноти  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  є функціями температури  $T$  і парціального тиску  $p$  на ефективну довжину променя  $S_{\text{еф}}$ , т.е.  $pS_{\text{еф}}$ .

Значення  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ ,  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  і поправочного коефіцієнта  $\beta$  знаходять по номограмах, приведених на рис. 1, 2 і 3.

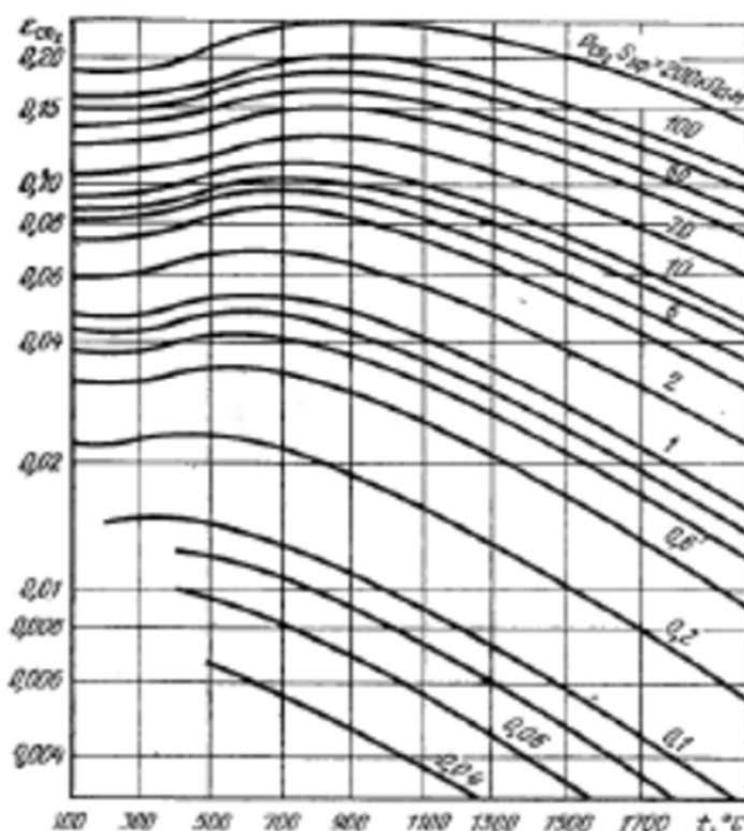


Рисунок 1 – Номограма для визначення міри чорноти  $\text{CO}_2$

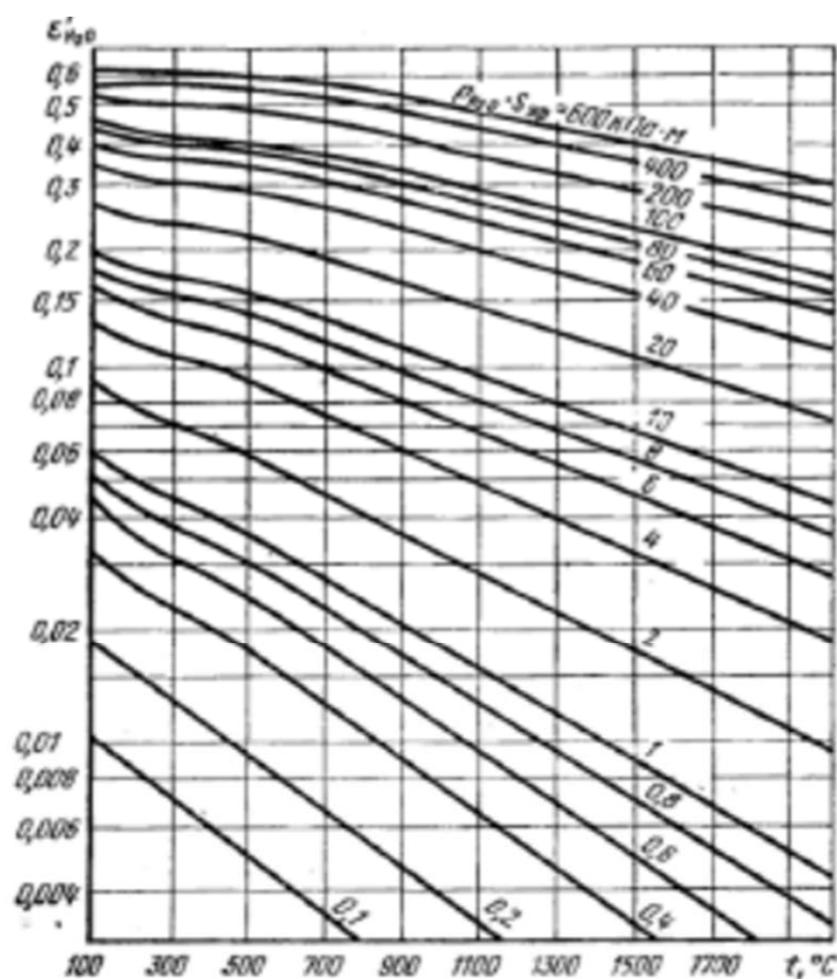


Рисунок 2 – Номограма для визначення міри чорноти  $H_2O$

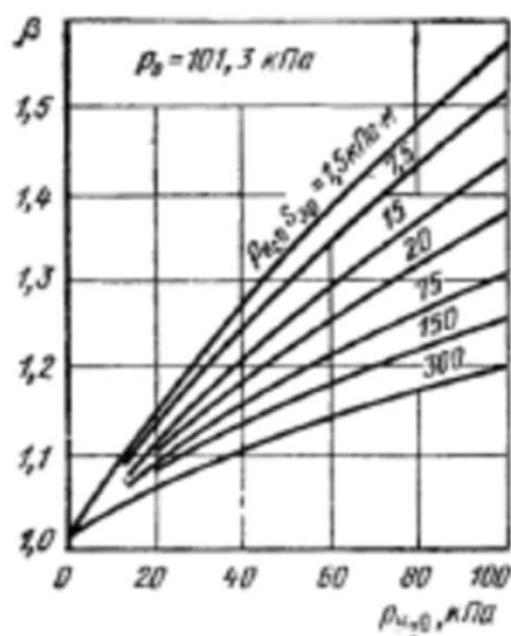


Рисунок 3 – Монограма для визначення поправочного коефіцієнту  $\beta$

Ефективна довжина променя визначається за формулою:

$$S_{\text{еф}} = \eta \frac{3,6 \cdot V}{F}, \quad (1.5)$$

де  $V$  – об'єм, заповнений випромінюючим газом,  $\text{м}^3$ ;

$F$  – площа стінок, обмежувачих цей об'єм,  $\text{м}^2$ ;

$\eta$  – коефіцієнт, зазвичай приймають рівним 0,9–1,0.

У регенеративних насадках ефективну довжину променя знаходять за формулою:

$$S_{\text{еф}} = 3,6 \cdot (1 - v) / f_1, \quad (1.6)$$

де  $v$  – питомий об'єм насадки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$f_1$  – питома поверхня нагріву,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

При спалюванні мазуту або висококалорійного газу в продуктах згорання часто знаходяться частки саж, що значно збільшують міру чорноти газового об'єму.

Приведена міра чорноти системи в робочій камері печі безперервного дії розраховують за формулою:

$$\varepsilon_{\text{сп}} = \varepsilon_{\text{м}} \cdot \frac{\omega + 1 - \varepsilon_{\text{г}}}{[\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{г}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}} + \omega}, \quad (1.7)$$

де  $\varepsilon_{\text{м}}$  – міра чорноти стрічки;

$\omega$  – міра розвитку кладки.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, при постійній температурі печі, розраховують за формулою:

$$\alpha_{\text{взм}} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\text{взм}} \sqrt{[(T_r/100)^4 - (T_m^{\text{поч}}/100)^4] \cdot [(T_r/100)^4 + (T_m^{\text{кін}}/100)^4]}}{\sqrt{(T_r - T_m^{\text{поч}}) \cdot (T_r - T_m^{\text{кін}})}},$$

Вт/(м<sup>2</sup>·К). (1.8)

де індекси «поч» и «кін» означають температури газу и металу відповідно на початку і по закінченню періоду нагріву.

Температуру, яку матиме тонке тіло через час нагріву  $\tau$ , можна визначити за формулою:

$$T = T_a - (T_a - T_n) \cdot e^{-\frac{K \cdot \alpha_r \cdot \tau}{S \cdot \rho \cdot c}}, \quad (1.9)$$

- $T_a$  – температура довкілля, °С;
- $T_n$  – початкова температура нагріву, °С;
- $S$  – характерний розмір тіла, м;
- $\rho$  – щільність тіла, кг/м<sup>3</sup>;
- $c$  – теплоємність тіла, кДж/кг·К;
- $K$  – коефіцієнт форми, (для пластини  $K=1$ ).

## 1.1 Задача №1

### Умови задачі

Визначити температуру стрічки з середньовуглецевої сталі на виході з камери нагріву протяжної печі.

Початкова температура стрічки  $T_n = 293$  К, температура продуктів згорання палива  $T_r = 1073$  К.

В продуктах згорання міститься 9 % CO<sub>2</sub> и 18 % H<sub>2</sub>O.

Товщина стрічки  $\delta = 0,002$  м, ширина  $b = 1$  м. Ширина печі  $B = 1,5$  м, висота  $2H = 1$  м. Нагрів стрічки – двосторонній, час нагріву  $\tau = 35$  с.

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, приймаючи орієнтовно, що  $T_{\text{взм}} = 973$  К.

### Приклад рішення

Знайдемо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Ефективну довжину променя в газовому шарі визначаємо за формулою (1.5):

$$S_{\text{эф}} = \frac{3,6 \cdot B \cdot H}{2 \cdot (B + H)} = \frac{3,6 \cdot 1,5 \cdot 0,5}{2 \cdot (1,5 + 0,05)} = 0,675 \text{ м.}$$

Міра розвитку кладки:

$$\omega = \frac{F_{\text{вн}}}{F_{\text{вн}}} = \frac{2 \cdot (B + 2 \cdot H)}{2 \cdot b} = \frac{2 \cdot (1,5 + 1)}{2 \cdot 1} = 2,5.$$

Парціальні тиски випромінюючих газів:

$$P_{\text{CO}_2} = 0,09 \cdot 98,1 = 8,82 \text{ кПа,}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,18 \cdot 98,1 = 17,64 \text{ кПа.}$$

Твори парціальних тисків  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на ефективну довжину променя:

$$P_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{эф}} = 8,82 \cdot 0,675 = 5,95 \text{ кПа} \cdot \text{м,}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эф}} = 17,64 \cdot 0,675 = 11,90 \text{ кПа} \cdot \text{м.}$$

По графіках приведених на рисунках 1–3 знаходимо значення міри чорноти вуглекислого газу ( $\epsilon_{\text{CO}_2}$ ) і міри чорноти водяної пари ( $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ ) що містяться в продуктах згорання і поправочного коефіцієнта  $\beta$ :

$$\epsilon_{\text{CO}_2} = 0,095; \quad \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,16; \quad \beta = 1,1.$$

Загальна міра чорноти об'єму продуктів згорання (ф-ла 1.4):

$$\varepsilon_r = 0,09 + 1,1 \cdot 1,16 = 0,266.$$

Приймаючи міру чорноти стрічки  $\varepsilon_m = 0,8$  знаходимо приведену міру чорноти системи (ф-ла 1.7):

$$\varepsilon_{\text{сп}} = 0,8 \cdot \frac{2,5 + 1 - 0,266}{[0,8 + 0,266 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,266}{0,266} + 2,5} = 0,178.$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням при постійній температурі печі (ф-ла 1.8):

$$\alpha_{\text{вкл}} = \frac{5,7 \cdot 0,178 \cdot \sqrt{[(1073/100)^4 - (293/100)^4] \cdot [(1073/100)^4 + (973/100)^4]}}{\sqrt{(1073 - 293) \cdot (1073 - 973)}} =$$

$$= 271,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Приймаючи  $\alpha_{\text{вкл}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , знаходимо сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_z = \alpha_{\text{вкл}} + \alpha_{\text{вкл}},$$

$$\alpha_z = 271,5 + 25 = 296,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Температура стрічки на виході з камери нагріву печі (формула 1.9):

$$t = 800 - (800 - 20) \cdot e^{-\frac{1 \cdot 296,5 \cdot 35}{0,001 \cdot 7850 \cdot 0,62 \cdot 10^3}} = 718 \text{ }^\circ\text{C}.$$

тобто близько до набутого значення.

При розрахунку прийнято, що щільність сталі  $\rho = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3$  і середня теплоємність середньовуглецевої сталі  $c = 0,62 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

## Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання для розрахунку температури металевої стрічки на виході з камери нагріву печі наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Індивідуальні завдання для розрахунку температури металевої стрічки

№	$T_{\text{п}}$	$T_{\text{г}}$	$T_{\text{кін}}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\delta$	$B$	$2H$	$\tau$
	К	К	К	%	%	м	м	м	с
1	295	1101	950	8,0	19	0,0025	1,3	0,8	29
2	297	1099	952	8,5	17	0,0030	1,4	0,9	30
3	299	1097	954	9,0	19	0,0035	1,5	1,0	31
4	301	1095	956	9,5	17	0,0025	1,6	1,1	32
5	303	1093	958	10,0	19	0,0030	1,7	1,2	33
6	305	1091	960	8,0	17	0,0035	1,8	0,8	34
7	307	1089	962	8,5	19	0,0025	1,3	0,9	36
8	309	1087	964	9,0	17	0,0030	1,4	1,0	37
9	311	1085	966	9,5	19	0,0035	1,5	1,1	38
10	313	1083	968	10,0	17	0,0025	1,6	1,2	39
11	315	1081	970	8,0	19	0,0030	1,7	0,8	40
12	317	1079	972	8,5	17	0,0035	1,8	0,9	41
13	319	1077	974	9,0	19	0,0025	1,3	1,0	42
14	321	1075	976	9,5	17	0,0030	1,4	1,1	43
15	323	1073	978	10,0	19	0,0035	1,5	1,2	44
16	295	1101	980	8,0	19	0,0025	1,3	0,8	29
17	297	1099	982	8,5	17	0,0030	1,4	0,9	30
18	299	1097	984	9,0	19	0,0035	1,5	1,0	31
19	301	1095	986	9,5	17	0,0025	1,6	1,1	32
20	303	1093	988	10,0	19	0,0030	1,7	1,2	33