

Eugeniusz MAJZA

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Śląskiej

METODA WYZNACZANIA ROZKŁADU STRUMIENIA SPALIN W OKRESIE WYTOPU W PIECU MARTENOWSKIM

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę określenia rozkładu strumienia spalin w poszczególnych fazach wytopu. Parametry rozkładu strumienia spalin w okresie wytopu wyznacza się na podstawie specjalnych pomiarów. W obliczeniach wykorzystano rachunek wyrównawczy.

1. Wprowadzenie

Dla dokonania oceny zasobów energii odpadowej i opracowania założeń projektowych kotłów odzyskowych za regeneratory pieców martenowskich konieczna jest między innymi znajomość wykresu uporządkowanego strumienia spalin. Dla wyznaczenia uporządkowanych wykresów strumieni spalin można zastosować probabilistyczną metodę przedstawioną w pracy [4]. Metoda probabilistyczna wyznaczania uporządkowanych wykresów opiera się na wynikach pomiarów i obliczeń rozkładu strumienia spalin i ilości szkodliwego powietrza wynikającego przez nieszczelności traktu spalinowego w okresie wytopu.

2. Równania bilansowe

W celu wyznaczenia rozkładu strumienia spalin w głowicy pieca martenowskiego i rozkładu względnej ilości szkodliwego powietrza wnikającego przez nieszczelności traktu spalinowego w okresie wytopu wykorzystuje się bilanse substancji dla pieca martenowskiego i traktu spalinowego. Założono, że piec martenowski opalany jest olejem opalowym i gazem ziemnym wysokometanowym, a spalanie jest zupełne.

Dla poszczególnych faz wytopu można sformułować równanie bilansu azotu. Równania bilansu pozostałych pierwiastków są trudne do określenia z powodu braku informacji o aktualnym ich udziale we wsadzie dostarczonej do pieca martenowskiego. Równanie bilansu azotu dla i-tej fazy wytopu ma postać:

$$\dot{n}_{g1} N_2 + \dot{p}_i \frac{L}{2H} + 0,79 (\dot{n}_{ai} + k \delta \dot{n}_a) = (\dot{n}_{ss\ 1i} + k \delta \dot{n}_{ss}) [N_2]_{1i} \quad (1)$$

gdzie:

- \dot{n}_{g1} - strumień gazu ziemnego zużywanego w i-tej fazie wytopu,
- \dot{p}_i - strumień oleju opałowego zużywanego w i-tej fazie wytopu,
- \dot{n}_{ai} - strumień powietrza do spalania i rozpylania oleju opałowego w i-tej fazie wytopu,
- $\delta \dot{n}_a$ - strumień powietrza wnikającego do pieca martenowskiego przez szczeliny okna wsadowego,
- $\dot{n}_{ss\ 1i}$ - strumień spalin suchych w głowicy pieca w i-tej fazie wytopu,
- $\delta \dot{n}_{ss}$ - strumień spalin wybijanych przez szczeliny okna wsadowego pieca martenowskiego,
- k - liczba okien wsadowych pieca martenowskiego,
- N_2 - udział molowy azotu w gazie ziemnym,
- n - udział gramowy azotu w oleju opałowym,
- $[N_2]_{1i}$ - udział molowy azotu w spalinach suchych w głowicy pieca w i-tej fazie wytopu,
- i - kolejny numer fazy wytopu (naprawa, ładowanie, nagrzewanie, topienie i wyrabianie).

Znajomość składu spalin w głowicy pieca oraz w czopuchu komina umożliwia sporządzenie bilansu dwutlenku węgla oraz tlenu dla traktu spaliniowego głowica-czopuch w poszczególnych fazach wytopu:

$$[CO_2]_{1i} = (1 + \varphi_1) [CO_2]_{2i} \quad (2)$$

$$[O_2]_{1i} + 0,21 \varphi_1 = (1 + \varphi_1) [O_2]_{2i} \quad (3)$$

gdzie:

- φ_1 - względna ilość szkodliwego powietrza wnikająca w czasie i-tej fazy wytopu,
- $[CO_2]_{1i}, [O_2]_{1i}$ - udziały molowe CO_2 i O_2 w głowicy pieca w czasie i-tej fazy wytopu,
- $[CO_2]_{2i}, [O_2]_{2i}$ - udziały molowe CO_2 i O_2 w czopuchu komina w czasie i-tej fazy wytopu,

Względna ilość szkodliwego powietrza wnikającego przez nieszczelności φ_1 jest zdefiniowana następująco:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta \dot{n}_{ai}}{\dot{n}_{ss\ 1i}}, \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta \dot{n}_{ai}$ - oznacza strumień powietrza suchego wnikającego przez nieszczelności traktu spaliniowego.

Równanie bilansu węgla i siarki dla całego wytopu ma postać

$$n_c = \sum_{i=1}^5 (\dot{n}_{ss\ i} \tau_i [\text{CO}_2]_{1i}) + k \delta \dot{n}_s \sum_{i=1}^5 \tau_i [\text{CO}_2]_{1i} + G_{st} \frac{c_{st}}{12} \quad (5)$$

gdzie:

$$n_c = (\text{CH}_4 + m C_m \text{H}_n) \sum_{i=1}^5 \dot{n}_{gi} \tau_i + \left(\frac{c}{12} + \frac{s}{32}\right) \sum_{i=1}^5 \dot{p}_i \tau_i + G_k \frac{\text{CO}_{2k}}{M_{\text{CO}_2}} + G_{wp} \frac{\text{CO}_2 \text{ wp}}{M_{\text{CO}_2}} + G_s \frac{c_s}{12} + G_z \frac{c_z}{12} \quad (6)$$

- τ_i - czas trwania i-tej fazy wytopu,
- G_{st} - ilość wytworzonej stali na wytop,
- G_k - zużycie kamienia wapiennego w czasie wytopu,
- G_{wp} - zużycie wapna palonego w czasie wytopu,
- G_s - zużycie surówki w czasie wytopu,
- G_z - zużycie żelaza w czasie wytopu,
- c, c_s, c_z, c_{st} - udziały gramowe węgla w oleju opalowym, surówce, żelazie oraz w stali,
- s - udział gramowy siarki w oleju opalowym,
- $\text{CH}_4, C_m \text{H}_n$ - udziały molowe metanu i ciężkich węglowodorów w gazie ziemnym,
- $\text{CO}_{2k}, \text{CO}_2 \text{ wp}$ - udziały gramowe CO_2 w kamieniu wapiennym oraz w wapnie palonym.

Jeżeli w okresie wytopu przeprowadza się pomiary ilości i składu żużla oraz pyłu unoszonego ze spalinami to do układu równań bilansowych można dołączyć równanie tzw. "wolnego tlenu" (różnica bilansów tlenu i wodoru, przy czym równanie bilansu wodoru jest obustronnie pomnożone przez 1/2):

$$n_{O_2} + 0,21 \sum_{i=1}^5 (\dot{n}_{a1} + k \delta \dot{n}_a) \tau_i + \left(\frac{o}{32} - \frac{h}{4}\right) \sum_{i=1}^5 \dot{p}_i \tau_i - (\text{CH}_4 + \frac{n}{2} C_m \text{H}_n) \cdot \sum_{i=1}^5 \dot{n}_{gi} \tau_i - \frac{1}{2} n_{H_2} = \sum_{i=1}^5 (\dot{n}_{ss1i} + k \delta \dot{n}_{ss}) ([\text{CO}_2]_{1i} + [\text{O}_2]_{1i} + n_{O_{2p}}) \tau_i + n_{O_{2z}} \quad (7)$$

gdzie:

- n_{O_2} - ilość tlenu w substratach nieenergetycznych doprowadzona do pieca w okresie wytopu,
- o, h - udział gramowy tlenu i wodoru w oleju opalowym,

- n_{H_2} - ilość wodoru doprowadzona do pieca w okresie wytopu w wilgoci substratów nieenergetycznych,
 $n_{O_{2p}}$ - ilość tlenu zawarta w wnoszonym pyłe odniesiona do jednostki spolia suchych,
 $n_{O_{2ż}}$ - ilość tlenu odprowadzona w okresie wytopu w żużłu martenowskim.

Równania bilansu należy uzupełnić warunkami wynikającymi z sumy udziałów

$$c + s + h + o + n + w = 1 \quad (8)$$

$$CH_4 + C_m H_n + N_2 = 1 \quad (9)$$

$$[CO_2]_{1i} + [O_2]_{1i} + [N_2]_{1i} = 1 \quad (10)$$

$$[CO_2]_{2i} + [O_2]_{2i} + [N_2]_{2i} = 1 \quad (11)$$

dla $i = 1, \dots, 5$

gdzie:

h, o, w - udział gramowy wodoru, tlenu i wilgoci w oleju opałowym.

Strumień spalin wybijanych oraz strumień powietrza wnikaącego przez szczeliny okna wsadowego zależy od położenia zerowego poziomu ciśnienia manometrycznego w piecu. Uwzględniając dwie szczeliny boczne oraz szczelinę dolną i górną otrzymuje się następujące równania na strumień spalin wybijanych oraz na strumień powietrza zasysanego:

$$\dot{Q}_{ss} = \frac{p_s \alpha b}{(MR) T_s} 2g \frac{\rho_{ot} - \rho_s}{\rho_s} \left(2 \int_0^{y_s} \sqrt{y} dy + a \sqrt{y_s} \right) \quad (12)$$

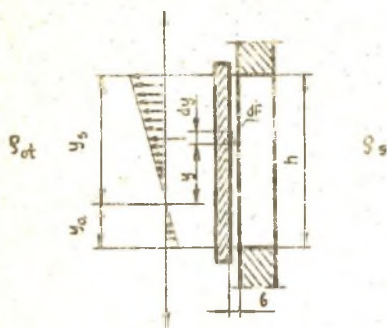
$$\dot{Q}_a = \frac{p_{ot} \alpha b}{(MR) T_{ot}} 2g \frac{\rho_{ot} - \rho_s}{\rho_{ot}} \left(2 \int_0^{y_a} \sqrt{y} dy + a \sqrt{y_a} \right) \quad (13)$$

$$y_a + y_s = h \quad (14)$$

gdzie:

- p_s, p_{ot} - ciśnienie spalin lub otoczenia,
 ρ_s, ρ_{ot} - gęstość spalin lub powietrza,
 T_{ot}, T_s - temperatura powietrza lub spalin,
 y - odległość w pionie od zerowego poziomu ciśnienia manometrycznego, (rys. 1),
 g - przyspieszenie grawitacyjne,
 (MR) - uniwersalna stała gazowa,
 α - liczba wypływu ($\alpha \approx 0,85$),
 a - szerokość okna wsadowego,

- h - wysokość okna wsadowego,
b - szerokość szczeliny.



Rys. 1. Rozkład ciśnienia przy założeniu okna wsadowego pieca martenowskiego

Fig. 1. Distribution of the pressure close to batch window of open-hearth furnace

(3), (5), (6), (7), (8) otrzymuje się 18 równań warunków zawierających 10 niewiadomych $\beta_1, \dots, \beta_{10}$ oraz n wielkości mierzonych $\alpha_1, \dots, \alpha_n$. W celu zmniejszenia wymiarów zadania obliczeniowego przekształcono układ równań warunków eliminując niewiadome β_1, \dots, β_5 z równania (1), zaś niewiadome $\beta_6, \dots, \beta_{10}$ z równania (2). Otrzymuje się ostatecznie 8 równań warunków zawierających n wielkości mierzonych podlegających korekcie.

W celu korekty wielkości mierzonych i następnie wyznaczenia najbardziej prawdopodobnych wartości niewiadomych, zastosowano metodę uzgodnienia bilansów substancji i energii opartą o rachunek wyrównawczy [2, 3].

Niech równanie warunku wybrane z układu (3) - (8) ujmujemy w postaci

$$F_k(\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_n) = 0 \quad (10)$$

Po podstawieniu wyników pomiarów do równań warunków (3) - (8) równania te nie są spełnione z uwagi na nieuniknione błędy pomiarów wielkości mierzonych.

Otrzymuje się zatem:

$$F_k(l_1, \dots, l_j, \dots, l_n) = -v_k \quad (11)$$

gdzie:

l_j - wynik pomiaru wielkości α_j ,

v_k - niezgodność k-tego równania warunków.

Wartości strumieni $\delta \dot{n}_{ss}$ oraz $\delta \dot{n}_a$ należy wyznaczyć na podstawie pomiaru rozkładu ciśnienia w komorze pieca martenowskiego.

Z równań (8) - (10) wyznacza się

$$N_2 = 1 - CH_4 - C_m H_n \quad (15)$$

$$[N_2]_{1i} = 1 - [CO_2]_{1i} - [O_2]_{1i} \quad (16)$$

$$[N_2]_{2i} = 1 - [CO_2]_{2i} - [O_2]_{2i} \quad (17)$$

3. Uzgodnienie bilansu substancji

Po wykorzystaniu zależności (15).

(17) do równań warunków (1), (2)

Dla uzyskania zgodności równań warunków należy wprowadzić poprawki v_j^b spostrzeżeń

$$F_k(1_1 + v_1^b, \dots, 1_j + v_j^b, \dots, 1_n + v_n^b) = 0 \quad (20)$$

gdzie v_j^b oznacza poprawkę j-tej wielkości mierzonej.

Do obliczenia poprawek v_j^b wykorzystano metodę uzgadniania bilansów substancji [2, 3] otrzymując układ równań

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} v_j^b = w_k \quad (k = 1, \dots, 8) \quad (21)$$

$$v_j^b = m_j^2 \sum_{k=1}^8 a_{kj} k_k, \quad (j = 1, \dots, n) \quad (22)$$

gdzie:

$$a_{kj} = \left(\frac{\partial F_k}{\partial x_j} \right)$$

k_k - korekta Lagrange'a,

m_j - średni błąd bezwzględny j-tej wielkości mierzonej.

W zapisie macierzowym układy równań (21) oraz (22) przyjmują postać:

$$AV = W \quad (23)$$

$$V = MA^T K \quad (24)$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{81} & \dots & a_{8n} \end{bmatrix}$$

- macierz współczynników zlinearyzowanych równań warunków,

$$M = \begin{bmatrix} m_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & m_n^2 \end{bmatrix}$$

- macierz diagonalna kwadratów średnich błędów bezwzględnych wielkości mierzonych,

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n \end{bmatrix} \quad - \text{ macierz kolumnowa poprawek wielkości mierzonych,}$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_8 \end{bmatrix} \quad - \text{ macierz kolumnowa niezgodności równań warunków,}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ k_8 \end{bmatrix} \quad - \text{ macierz kolumnowa korelat Lagrange'a.}$$

Po podstawieniu równania (24) do (23) otrzymuje się

$$AMA^T K = W \quad (25)$$

a stąd

$$K = (AMA^T)^{-1} W \quad (26)$$

Poprawki spostrzeżeń oblicza się z równania

$$V = MA^T (AMA^T)^{-1} W \quad (27)$$

Skorygowane wielkości mierzone oznaczono symbolem \bar{i}_j ,

$$\bar{i}_j = i_j + v_j \quad \text{dla } j = 1, \dots, n \quad (28)$$

4. Strumień spalin w czopuchu komina

Strumień spalin wilgotnych w czopuchu komina oblicza się z wzoru

$$\bar{n}_{sw2} = \bar{n}_{ss1i} (1 + \bar{\varphi}_1) (1 + X_{zs\ 2i}) \quad (29)$$

gdzie:

$$\bar{n}_{ss\ 1i} = \frac{\bar{n}_{g1} N_2 + \bar{p}_1 \frac{n}{28} + 0,79 (\bar{n}_{ai} + k \delta \bar{n}_a)}{[\bar{N}_2]_{1i}} - k \delta \bar{n}_{ss} \quad (30)$$

$$\bar{\varphi}_1 = \frac{[CO_2]_{1i}}{[CO_2]_{2i}} - 1 \quad (31)$$

$$X_{zs\ 2i} = \frac{X_{zs\ 1i} + \bar{\varphi}_1 X_{za}}{1 + \bar{\varphi}_1} \quad (32)$$

$$X_{zs\ 1i} = \frac{(2 CH_4 + \frac{n}{2} C_m H_n) \bar{n}_{g1} + (\frac{h}{2} + \frac{\bar{w}}{18}) \bar{p}_1 + 0,79 (\bar{n}_{ai} + k \delta \bar{n}_a)}{\bar{n}_{ss\ 1i} + k \delta \bar{n}_{ss}} \quad (33)$$

Średni strumień spalin w czasie wytopu wynika z wzorów:

- dla głowicy

$$\hat{n}_{ss1} = \sum_{i=1}^5 \bar{n}_{ss\ 1i} \bar{v}_i / \bar{v}_w \quad (34)$$

- dla czopucha

$$\hat{n}_{sw2} = \sum_{i=1}^5 \bar{n}_{sw\ 2i} \bar{v}_i / \bar{v}_w \quad (35)$$

gdzie \bar{v}_w oznacza czas wytopu

$$\bar{v}_w = \sum_{i=1}^5 \bar{v}_i \quad (36)$$

W podobny sposób można wyznaczyć średnią na wytop wartość względnej ilości szkodliwego powietrza wnikającego do kanałów spalinowych

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=1}^5 \bar{\varphi}_1 \bar{n}_{ss\ 1i} \bar{v}_i / (\hat{n}_{ss1} \bar{v}_w). \quad (37)$$

Rozkłady strumieni spalin w głowicy pieca oraz w czopuchu komina pieca martenowskiego dogodnie jest przedstawić w współrzędnych zredukowanych;

$$z_{s \ 1i} = \bar{n}_{ss \ 1i} / \bar{n}_{ss1}^{\Delta} \quad (38)$$

$$z_{s \ 2i} = \bar{n}_{sw \ 2i} / \bar{n}_{sw2}^{\Delta} \quad (39)$$

Zmienną niezależną jest wówczas zredukowany czas $\bar{\tau}_i / \bar{\tau}_w$.

5. Przykład liczbowy

Przykład wyznaczania rozkładu strumienia spalin w okresie wytopu sporządzono dla pieca martenowskiego o pojemności 140 t. Piec jest opalany gazem ziemnym i olejem opałowym. W tabelicy 1 zestawiono wyniki specjalnego pomiaru pieca martenowskiego. Z rozkładu ciśnienia w badanym piecu martenowskim wynika, że zerowy poziom ciśnienia znajduje się poniżej okien wsadowych. Na podstawie pomiarów [1] obliczono średni strumień spalin wybijanych przez szczeliny okna wsadowego $\delta \dot{n}_{ss} = 7,5$ kmol/h, przy czym nie stwierdzono zasysania szkodliwego powietrza przez szczeliny okien wsadowych $\delta \dot{n}_a = 0$.

W obliczeniach nie wykorzystano równania (7) bilansu tzw. "wolnego tlenu" ze względu na brak dokładnego pomiaru ilości i składu żużła. Otrzymuje się ostatecznie układ 7 równań warunków podlegających uzgadnianiu zawierający wyłącznie wielkości mierzone ($n = 50$).

W tabelicy 2 zamieszczono wykaz wielkości mierzonych podlegających korekcie, elementy macierzy A oraz wartości liczbowe elementów wektora W przed uzgadnianiem i po uzgadnianiu.

Tabelica 3 ujmuje skorygowane w wyniku uzgadniania wartości wielkości mierzonych.

Rozkłady strumienia spalin w głowicy pieca, czopuchu komina oraz rozkłady względnej ilości szkodliwego powietrza przedstawiono na rys. 2 - 4.

6. Uwagi końcowe

Znajomość rozkładu strumienia spalin oraz nieszczelności traktu spalin w czasie wytopu umożliwia:

- dokonanie analizy cieplnej pracy pieca martenowskiego,
- badanie wpływu strumienia spalin wilgotnych na temperaturę spalin,
- ocenę wpływu stanu pieca i traktu spalin na średnią względną ilość szkodliwego powietrza wnikającego do kanału spalinowego,

Tablica 1

Wyniki pomiaru pieca martenowskiego o pojemności 140 t

| Lp. | Wielkość mierzona | Oznaczenie | Jednostka | Faza wytopu | | | | Wyrzabienie |
|-----|--|------------------|------------------|--------------------|----------|------------------------------|-----------|-------------|
| | | | | Kapruwa popasutowa | Sadzonis | Nagrzewania | Topnienie | |
| 1. | Strumień gazu ziemnego | \dot{V}_{g1} | kmol/h | 17,6 | 57,2 | 57,2 | 8,8 | 8,8 |
| 2. | Strumień oleju opałowego | \dot{V}_1 | kg/h | 1500 | 2500 | 2500 | 2500 | 1400 |
| 3. | Strumień powietrza | \dot{V}_{a1} | kmol/h | 766,2 | 2078,2 | 2078,2 | 2078,2 | 2078,2 |
| 4. | Udział molowy CO_2 w spalinach w głowicy | $[CO_2]_{11}$ | % | 9,0 | 12,4 | 11,7 | 11,9 | 10,1 |
| 5. | Udział molowy O_2 w spalinach w głowicy | $[O_2]_{11}$ | % | 6,2 | 2,2 | 3,5 | 4,7 | 8,6 |
| 6. | Udział molowy CO_2 w spalinach w mininie | $[CO_2]_{21}$ | % | 5,2 | 5,8 | 5,9 | 10,2 | 5,8 |
| 7. | Udział molowy O_2 w spalinach w kominie | $[O_2]_{21}$ | % | 12,0 | 12,3 | 12,2 | 9,4 | 13,1 |
| 8. | Czas trwania fazy wytopu | t_1 | h | 1,23 | 2,5 | 2,33 | 0,33 | 1,5 |
| 9. | Udziały molowe składników gazu ziemnego | CH_4 H_2 | % % | | | 93,85 6,15 | | |
| 10. | Udziały gramowe składników oleju | c s w v | % % % % | | | 86,76 2,37 8,87 2,0 | | |
| 11. | Zużycie kasilania wapiennego | G_k | kg | | | 10000 | | |
| 12. | Udziały gramowe CO_2 w kasileniu wapiennym | G_{CO_2k} | % | | | 43 | | |
| 13. | Zużycie surowców martenowskiej | G_s | kg | | | 60000 | | |
| 14. | Udział gramowy węgla w surowcu | G_w | % | | | 3,8 | | |
| 15. | Zużycie żelaza | G_z | kg | | | 105000 | | |
| 16. | Udział gramowy węgla w żelazie | G_{wz} | % | | | 0,2 | | |
| 17. | Produkcja stali | G_{st} | kg | | | 127000 | | |
| 18. | Udział gramowy węgla w stali | C_{st} | % | | | 0,27 | | |

Tablica 2

Wzrost wielkości mierzonych podlegających korygowaniu, miernik A współzmienników równak warunków po zliniaryzowaniu oraz wartości liczbowe średnich błędów bezwzględnych wielkości mierzonych

| k | Wielkości mierzone | kolej mierzonych | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|--|
| | | h _{g1} | h _{g2} | h _{g3} | h _{g4} | h _{g5} | p ₁ | p ₂ | p ₃ | p ₄ | p ₅ | h _{a1} | h _{a2} | h _{a3} | h _{a4} | h _{a5} | [CO ₂] ₁₁ | |
| 1 | Równanie (1) dla fazy 1 po eliminacji niewiadomej | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | |
| 2 | Równanie (2) dla fazy 1 po eliminacji niewiadomej | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,21 · [O ₂] ₁₁ |
| 3 | Równanie (3) dla fazy 2 po eliminacji niewiadomej | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Równanie (3) dla fazy 3 po eliminacji niewiadomej | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Równanie (3) dla fazy 4 po eliminacji niewiadomej | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Równanie (5) po eliminacji niewiadomych | h _{g1} | h _{g2} | h _{g3} | h _{g4} | h _{g5} | h _{g6} | h _{g7} | h _{g8} | h _{g9} | h _{g10} | h _{g11} | h _{g12} | h _{g13} | h _{g14} | h _{g15} | h _{g16} | h _{g17} |
| 7 | Równanie (8) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Średni błąd bezwzględny wielkości zmiennej m ₁ | | 2,2 kmol/h | | | | | | | | | | | | | | | 50 kmol/h | 0,005 |

Oznaczenia w tablicy 2:

$$h_{g1} = (CH_4 + mC_H) \cdot \tau_1 - \frac{[CO_2]_{11} \cdot \tau_1 (1 - CH_4 - C_H)}{1 - [CO_2]_{11} - [O_2]_{11}}$$

$$h_{g1+5} = \left(\frac{2}{12} + \frac{3}{12}\right) \cdot \tau_1 - \frac{[CO_2]_{11} \cdot \tau_1}{1 - [CO_2]_{11} - [O_2]_{11}}$$

gdzie: i = 1, ..., 5.

$$h_{g1+10} = \frac{0,79 [CO_2]_{11} \cdot \tau_1}{1 - [CO_2]_{11} - [O_2]_{11}}$$

$$h_{g1+15} = \frac{(1 - CH_4 - C_H) h_{g1} + 0,79(h_{g1} + k \delta h_a) + \frac{2}{12} \tau_1}{(1 - [CO_2]_{11} - [O_2]_{11})^2}$$

od. tablicy 2

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $[CO_2]_{12}$ | $[CO_2]_{13}$ | $[CO_2]_{14}$ | $[CO_2]_{15}$ | $[O_2]_{11}$ | $[O_2]_{12}$ | $[O_2]_{13}$ | $[O_2]_{14}$ | $[O_2]_{15}$ | $[CO_2]_{21}$ | $[CO_2]_{22}$ | $[CO_2]_{23}$ | $[CO_2]_{24}$ | $[CO_2]_{25}$ | $[O_2]_{21}$ | $[O_2]_{22}$ | $[O_2]_{23}$ | $[O_2]_{24}$ | $[O_2]_{25}$ | | | | | | | | | | | |
| 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | $[CO_2]_{21}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[O_2]_{11} -$ $-0,21$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $-[CO_2]_{11}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | |
| $0,21-[CO_2]_{21}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[CO_2]_{22}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[O_2]_{12} - 0,21$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $-[CO_2]_{12}$ | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 0 | $0,21-[CO_2]_{21}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[CO_2]_{23}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[O_2]_{13} -$ $-0,21$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $-[CO_2]_{13}$ | 0 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | $0,21-[CO_2]_{21}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[CO_2]_{24}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[O_2]_{14} -$ $-0,21$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $-[CO_2]_{14}$ | 0 | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | $0,21 -$ $-[CO_2]_{25}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[CO_2]_{25}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $[O_2]_{15} -$ $-0,21$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $-[CO_2]_{15}$ | | | | | | | | | | | |
| $\bar{P}_{6,17}$ | ${}^n_{6,18}$ | ${}^n_{6,19}$ | ${}^n_{6,20}$ | ${}^n_{6,21}$ | ${}^n_{6,22}$ | ${}^n_{6,23}$ | ${}^n_{6,24}$ | ${}^n_{6,25}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| 0,005 | | | | | | | | | | 0,005 | | | | | | | | | | 0,005 | | | | | | | | | |

Omnożenie w tablicy 2:

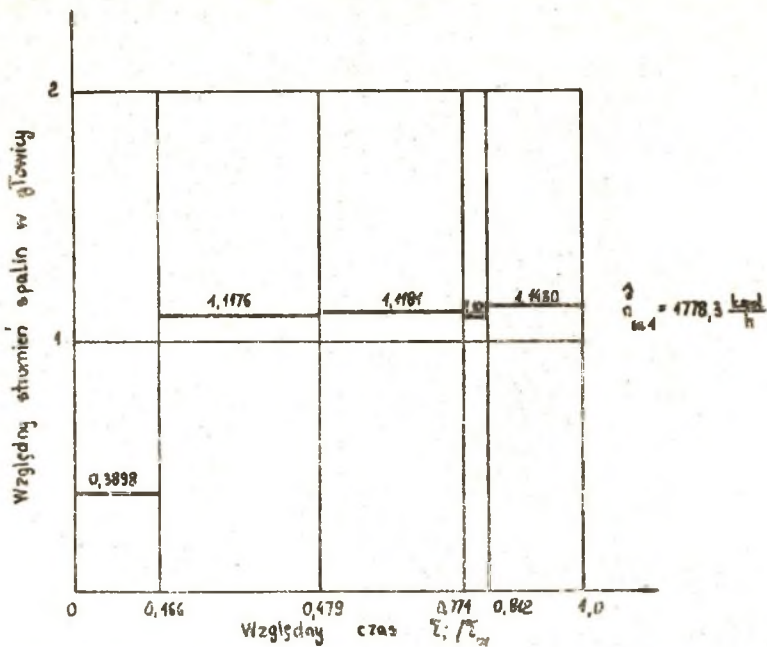
$${}^n_{6,1+20} = -[CO_2]_{11} \bar{\tau}_1 \frac{(1 - CH_4 - C_{R_1})^2}{R_1 \cdot \bar{\tau}_1 \cdot \bar{\tau}_1} + 0,79(n_{6,21} + k \delta \bar{h}) + \frac{n_{6,21} \bar{P}_1}{2R_1 \bar{\tau}_1}$$

$${}^n_{6,36} = \sum_{i=1}^5 (1 + [CO_2]_{i1} \frac{1}{1 - [CO_2]_{i1} - [O_2]_{i1}}) n_{6,1} \bar{\tau}_1$$

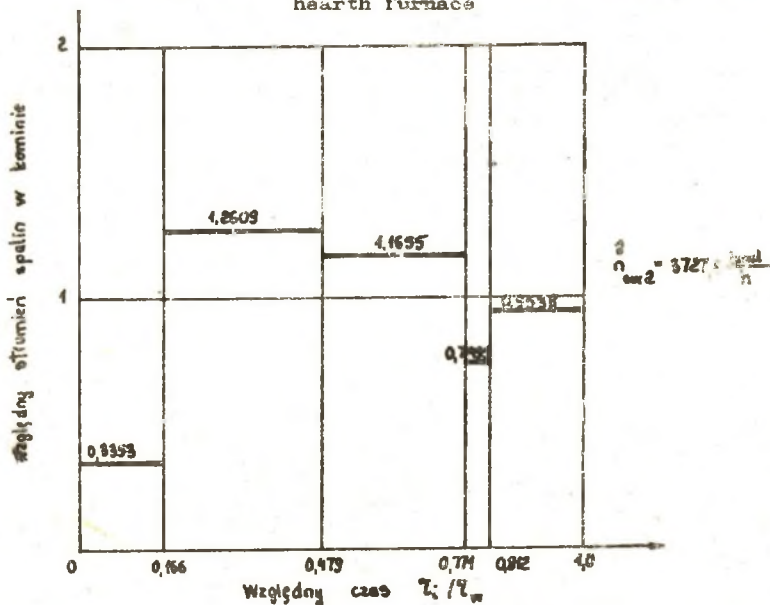
Tabela 3

Wyniki obliczeń uzgadniania bilansu substancji
i wyznaczenia nielawnych dla pieca martenowskiego 140 t

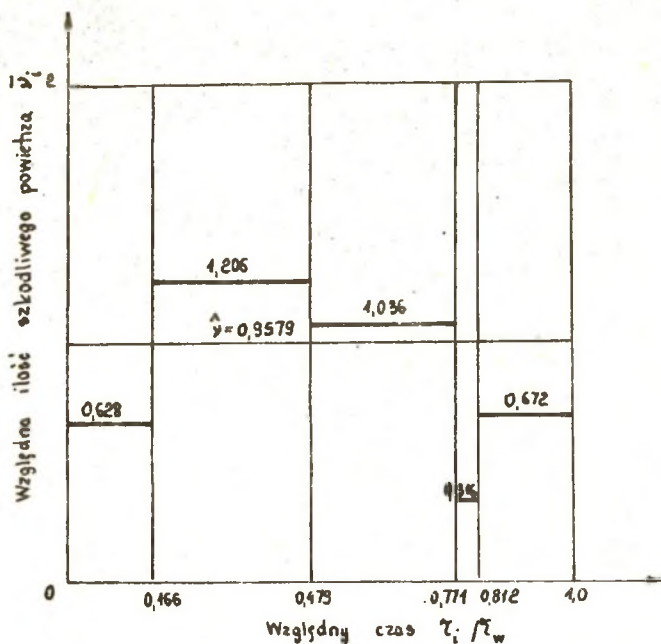
| Lp. | Wielkość mierzona lub niewiadoma | Oznaczenia | Jednostka | Faza wytopu | | | | |
|-----|---|--|------------------------------------|-----------------------|----------|-------------------------------|----------|------------|
| | | | | Nagrzewanie poplastow | Sadzenie | Nagrzewanie | Topienie | Wyrabianie |
| 1. | Strumień gazu ziemnego | \dot{V}_{g_1} | kmol/h | 17,0 | 56,2 | 56,2 | 8,6 | 8,1 |
| 2 | Strumień oleju opałowego | \dot{V}_2 | kg/h | 1567 | 4839 | 2442 | 2491 | 1363 |
| 3 | Strumień powietrza | \dot{V}_{z_1} | kmol/h | 789,0 | 2154 | 2137,6 | 2087 | 2121,5 |
| 4 | Udział molowy CO ₂ w spalinach w głowicy | [CO ₂] ₁ | % | 8,30 | 13,33 | 12,72 | 12,54 | 10,57 |
| 5 | Udział molowy O ₂ w spalinach w głowicy | [O ₂] ₁ | % | 6,26 | 2,26 | 3,33 | 5,13 | 8,45 |
| 6 | Udział molowy CO ₂ w spalinach w kominie | [CO ₂] ₂ | % | 5,10 | 6,14 | 6,25 | 9,54 | 6,31 |
| 7 | Udział molowy O ₂ w spalinach w kominie | [O ₂] ₂ | % | 11,96 | 12,52 | 12,43 | 8,92 | 13,52 |
| 8 | Udziały molarne składników gazu ziemnego | \overline{C}_H^g \overline{N}_2^g | % % | | | 93,82 6,18 | | |
| 9 | Udziały gramowe składników oleju - węgiel - siarka - wodor - azot | \overline{C}^o \overline{S}^o \overline{H}^o \overline{N}^o | % % % % | | | 86,59 2,37 9,05 2,61 | | |
| 10 | Zużycie kominie wapniowego | \overline{C}_k | kg | | | 9916 | | |
| 11 | Udział gramowy CO ₂ w kam. wap. | $\overline{C}_{CO_2}^k$ | % | | | | | |
| 12 | Zużycie surowki martenowskiej | \overline{C}_s | kg | | | 36819 | | |
| 13 | Udział gramowy węgla w surowce | \overline{C}_s | % | | | 3,78 | | |
| 14 | Zużycie złomu | \overline{C}_z | kg | | | 10494 | | |
| 15 | Udział gramowy węgla w złomie | \overline{C}_z | % | | | 0,17 | | |
| 16 | Produkcja stali | \overline{C}_{st} | kg | | | 18752 | | |
| 17 | Udział gramowy węgla w stali | \overline{C}_{st} | % | | | 0,305 | | |
| 18 | Względna ilość suchego powietrza | \overline{D}_s | | 0,628 | 1,206 | 1,036 | 0,314 | 0,672 |
| 19 | Strumień spalin suchych w głowicy | \dot{V}_{ss}^s | kmol/h | 693,3 | 1987,5 | 1983 | 1965,8 | 2032,6 |
| 20 | Stopień zawilżenia spalin w głowicy | X_{ss}^s | kmol H ₂ O kmol s.s. | 0,160 | 0,131 | 0,132 | 0,089 | 0,061 |
| 21 | Stopień zawilżenia spalin w kominie | X_{ss}^k | kmol H ₂ O kmol s.s. | 0,107 | 0,072 | 0,076 | 0,073 | 0,046 |
| 22 | Strumień spali wilgotnych w kominie | \dot{V}_{sw}^k | kmol/h | 1249,8 | 4700,4 | 4344,6 | 2771,3 | 3555,4 |



Rys. 2. Rozkład strumienia spalin suchych w głowicy pieca martenowskiego
 Fig. 2. Distribution of the dry waste gases flux in the head of open-hearth furnace



Rys. 3. Rozkład strumienia spalin wilgotnych w ozopuchu kominia pieca martenowskiego
 Fig. 3. Distribution of the wet waste gases flux in the smoke conduit of open-hearth furnace



Rys. 4. Rozkład względnej ilości powietrza wnikającego do kanału spalino-
wego

Fig. 4. Distribution of relative air quantity penetrating the waste channel

- dokonanie oceny strat paliwa wskutek nadmiernych nieuszczelności traktu spalin,
- prognozowanie uporządkowanych wykresów strumienia spalin wilgotnych w czopuchu komina,
- prognozowanie uporządkowanych wykresów produkcji pary z kotła odzyskowego przewidzianego do zainstalowania w czopuchu komina pieca martenowskiego.

Opracowana metoda obliczeń została wykorzystana przy wyznaczaniu rozkładu strumienia spalin w piecach o działaniu okresowym w hucie miedzi.

LITERATURA

- [1] Szargut J., i inni: Analiza kompleksowa dotycząca oceny zasobów energii odpadowej oraz wytyczne w kierunku jej wykorzystania. Praca zlecena NB-181/RME-3/81. Instytut Techniki Ciepłej Gliwice.
- [2] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983.

- [3] Szargut J. (red): Rachunek wyrównawczy w technice cieplnej. PAN, Ossolineum 1984.
- [4] Ziębik A., Majza E.: Metoda probabilistyczna wyznaczania uporządkowanych wykresów strumieni spalin przed kotłami odzyskowymi pieców martenowskich. Hutnik 5/86.

Recenzent: Doc dr inż. Jerzy Maroń

Wpłynęło do redakcji w styczniu 1987

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОДОЖИТЕЛЬНОСТИ ПОТОКОВ
ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В МАРТЕНОВСКОЙ ПЕЧИ

Резюме

В работе представлен метод определения распределений продолжительности потоков сгорания по периодам выплавки. Параметры потока продуктов сгорания определяются на основании измерений мартеновской печи. В расчётах использовано согласование результатов измерений.

METHOD OF DETERMINATION OF TIME-DISTRIBUTION OF THE WASTE GASES FLUXES
IN HEATING PERIOD OF OPEN - HEARTH FURNACES

S u m m a r y

The paper presents a method of determination of time-distribution of waste gases in a waste-heat boiler. The results of open-hearth furnaces measurements are used for determination of the parameters of waste gases flux distribution during the heat. In numerical calculations the method of coordination of the measured results is employed.