

JAN SZARGUT

Katedra Energetyki Ciepłej

WPŁYW PODGRZANIA DMUCHU NA WSKAŹNIKI ENERGETYCZNE
PROCESU WIELKOPIECOWEGO

Streszczenie. Wykorzystują równania bilansu substancjalnego pierwiastków C, H, O, N oraz bilansu energii wyprowadzono wzory ujmujące wpływ podgrzania dmuchu wielkopiecowego na jednostkowe zużycie koksu, na zużycie dmuchu, na energię chemiczną produkowanego gazu wielkopiecowego i na koszty zużytych paliw. Wzory te pozwalają obliczyć przewidywane efekty podwyższenia temperatury dmuchu podług wyników jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca. W obliczeniach należy wykorzystać równania empiryczne ujmujące wpływ temperatury dmuchu na skład chemiczny i temperaturę gazu wielkopiecowego.

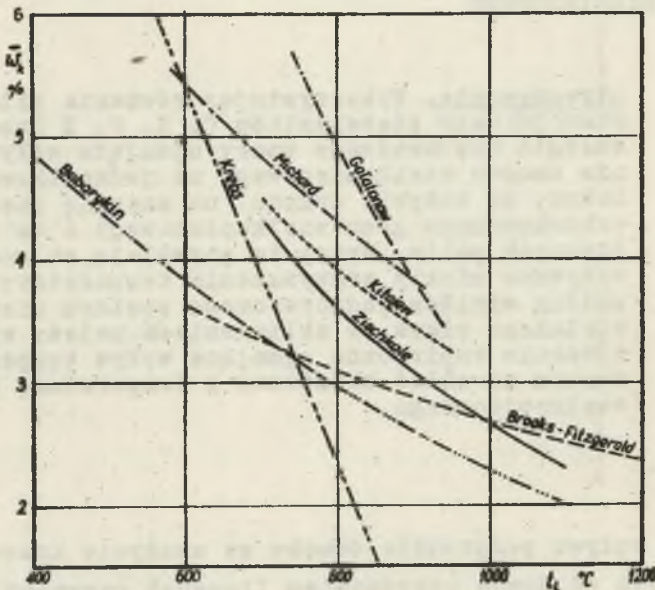
1. Wstęp

Zagadnienie wpływu podgrzania dmuchu na zużycie koksu w wielkim piecu było od dawna przedmiotem licznych rozważań naukowych. Pierwsze prace z tej dziedziny ogłoszono pod koniec XIX wieku [3], [9]. Wpływ podgrzania dmuchu analizowano bądź za pomocą przybliżonych rozważań teoretycznych [11], [7], bądź na podstawie wyników bezpośredniego pomiaru zużycia koksu [5] [2], [4], [15]. Wyniki uzyskane przez bezpośredni pomiar ujmowano za pomocą wykresów [13], [5], [14], [8], [15] bądź za pomocą równań empirycznych obowiązujących w ograniczonym zakresie temperatur [1].

Zasługuje na uwagę duża rozbieżność rezultatów otrzymanych na drodze empirycznej. Rozbieżność ta (zilustrowana na rysunku 1) wynika z ogromnych trudności empirycznego badania wpływu podgrzania dmuchu. Trudno jest bowiem po zmianie temperatury podgrzania dmuchu zachować bez zmiany wszystkie inne parametry

try procesu wielkopiecowego. Na zagadnienie to zwraca uwagę np. Babarykin [1] zalecając odpowiednie korygowanie zmierzonego zużycia koksu w celu wyeliminowania wpływu czynników niezależnych od stopnia podgrzania dmuchu.

Wskaźnik zużycia koksu ma duże znaczenie w procesie wielkopiecowym, nie wystaroza jednak do scharakteryzowania efektów



Rys. 1. Różniczkowy wskaźnik oszczędności koksu

energetycznych uzyskanych dzięki podgrzewaniu dmuchu. Dlatego zamierzeniem autora niniejszej pracy było nie tylko analizowanie wskaźnika oszczędności koksu, lecz także wyprowadzenie wzorów ujmujących wpływ podgrzania dmuchu na zużycie powietrza, na energię chemiczną wyprodukowanego gazu, na energię chemiczną gazu oddanego zewnętrznym odbiorcom, na wydajność cieplną nagrzewnio dmuchu i na koszt zużywanych paliw.

Drugim celem niniejszej pracy było wyprowadzenie wzorów w oparciu o równania bilansu substancji i energii. Metoda ta pozwala w znacznym stopniu uniezależnić się od danych czysto empirycznych, a w szczególności daje możliwość uniknięcia bezpo-

średnich pomiarów zużycia koksu przy różnych temperaturach dmuchu. Dla przewidywania wartości wskaźników energetycznych po zmianie temperatury dmuchu wystarczy w zasadzie wykorzystać wyniki stosunkowo prostych jednorazowych pomiarów cieplnych wielkiego pieca. We wspomnianym jednorazowym pomiarze wystarczy zmierzyć temperaturę dmuchu i gazu wielkopiecowego, zbadać skład chemiczny koksu oraz określić ilość substancji poszczególnych składników dmuchu i gazu wielkopiecowego, przypadającą na jednostkę energii chemicznej koksu.

Wzory teoretyczne wyprowadzone za pomocą bilansów substancji i energii pozwalają ponadto ustalić związki pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami energetycznymi charakteryzującymi wpływ podgrzania dmuchu i dają możliwość analizowania zależności tych wskaźników od innych parametrów procesu wielkopiecowego.

Trzecim celem niniejszej pracy było skontrolowanie, czy dla różnych wielkich pieców otrzymuje się podobną zależność wskaźników energetycznych od temperatury. Chodziło więc o zbadanie, czy jest celowe szukanie ujęcia uogólnionego, do którego dążyli autorzy uwzględnieni na rysunku 1.

Metoda bilansów substancji i energii nie eliminuje w pełni wzorów empirycznych. Główna trudność występuje przy przewidywaniu wpływu podgrzania dmuchu na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. Podgrzanie dmuchu wpływa zarówno na wartości stałych równowagi chemicznej jak też na kinetykę przepływu ciepła i substancji w procesie wielkopiecowym. Analityczne ujęcie tych wpływów nie wydaje się możliwe przy obecnym stanie wiedzy. Dlatego jest konieczne wprowadzenie do rozważań trzech równań empirycznych ujmujących wpływ temperatury dmuchu na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. Każda z omówionych wyżej funkcji empirycznych powinna przedstawiać nie jedną krzywą, lecz jednoparametrową rodzinę krzywych, tak by wyniki jednorazowego pomiaru wielkiego pieca pozwoliły na wybranie właściwej krzywej, przystosowanej do badanego procesu wielkopiecowego.

2. Podstawowe oznaczenia

- B - jednostkowe zużycie koksu, kg/jedn. surówki,
 l - względna ilość dmuchu suchego odniesiona do jednostki energii chemicznej koksu m_n^3/kJ ,
 t_L - temperatura podgrzanego dmuchu, °C,
 u, x, y, z - względna ilość (H_2+2CH_4), H_2O , CO, CO_2 w gazie wielkopiecowym odniesiona do jednostki energii chemicznej koksu, m_n^3/kJ ,
 V_1 - jednostkowa ilość substancji gazowej, $m_n^3/jedn.$ surówki,
 W_k - wartość opałowa koksu, kJ/kg,
 W_x - wartość opałowa wilgotnego gazu wielkopiecowego, kJ/m_n^3 ,
 W_{CO} , W_{H_2} - wartość opałowa CO i H_2 , kJ/m_n^3 ,
 X_L - stopień zawilżenia dmuchu doprowadzanego do wielkiego pieca, m_n^3/m_n^3 pow.,
 ω - względna oszczędność liczona w stosunku do wskaźników procesu podstawowego (przebiegającego bez podgrzewania dmuchu),
 $\bar{\omega}$ - względna oszczędność lokalna, liczona w stosunku do wskaźników lokalnych i przypadająca na 100 deg przyrostu temperatury dmuchu.

Wielkości oznaczone indeksem "o" odnoszą się do procesu podstawowego, przebiegającego bez podgrzewania dmuchu. Jako jednostkę substancji gazowych przyjęto fizyczny m_n^3 (1 kmol = $= 22,42 m_n^3$).

3. Wskaźniki względnej oszczędności

W rozważaniach dotyczących wielkiego pieca oblicza się zwykle względną oszczędność lokalną $\bar{\omega}$ liczoną w stosunku do wskaźników lokalnych i przypadającą na 100 deg = 1 hdeg^x) przyrostu temperatury dmuchu:

^x) 1 hektostopień = 1 hdeg = 100 deg.

$$\bar{\omega} = - \frac{100}{Y} \frac{dY}{dt_L} \frac{1}{hd\theta g} \quad (1)$$

gdzie:

Y - lokalna wartość rozpatrywanej wielkości (np. zużycia koksu),

t_L - temperatura podgrzanego dmuchu.

Metoda bilansów substancji i energii pozwala w zasadzie na bezpośrednie wyprowadzenie wzorów wyrażających lokalne wskaźniki oszczędności. Wyprowadzenie takie prowadzi jednak do niedogodnych równań różniczkowych, których całkowanie można by przeprowadzić tylko żmudną metodą różnic skończonych. Trudności tych można uniknąć, wyprowadzając wzory na całkowite wskaźniki oszczędności. Przejście od wskaźników całkowitych do wskaźników lokalnych można wykonać przez różniczkowanie bądź analityczne bądź wykreślne.

Całkowy wskaźnik względnej oszczędności (nazywany dalej krótko względną oszczędnością ω) oblicza się w stosunku do procesu podstawowego przebiegającego bez podgrzewania dmuchu:

$$\omega = - \frac{\Delta Y}{Y_0} \quad (2)$$

gdzie:

ΔY - przyrost rozpatrywanej wielkości w stosunku do procesu podstawowego,

Y_0 - wartość rozpatrywanej wielkości w procesie podstawowym.

Przy obliczaniu wskaźnika ω występują więc wielkości dotyczące procesu podstawowego. Wielkości te wynikają z dość daleko idącej ekstrapolacji. Odgrywają one jednak tylko pomocniczą rolę w obliczeniach, gdyż określają przebieg funkcji ω w zakresie niskich temperatur dmuchu nie rozpatrywanych w końcowej fazie rozważań. Jest rzeczą zrozumiałą, że wpływ wartości wynikających z ekstrapolacji zanika całkowicie przy obliczaniu różniczkowych lokalnych wskaźników $\bar{\omega}$. Można to zresztą łatwo udowodnić analizując wspomniane wyżej bezpośrednio wyprowadzenie wzorów na wskaźniki lokalne. W wyprowadzeniu tym nie występują żadne wielkości odnoszące się do procesu podstawowego.

Wskaźniki lokalne $\bar{\omega}$ można wyznaczyć na podstawie wskaźników całkowych ω za pomocą zależności

$$\bar{\omega} = \frac{100}{1 - \omega} \frac{d\omega}{dt_L} \frac{1}{\text{hdeg}} \quad (3)$$

4. Zastosowanie bilansu energetycznego

Względna oszczędność koksu ω_k oblicza się, sporządzając bilans energetyczny wielkiego pieca dla procesu podstawowego i procesu przebiegającego z podgrzaniem dmuchu. Dla procesu podstawowego otrzymuje się w odniesieniu do jednostki energii chemicznej koksu:

$$1 = i_p - i_s + q + (u_o + x_o + y_o + z_o + 0,79 l_o)(W_{x_o} + \Delta i_{g_o}) \quad (4)$$

gdzie:

- i_p - entalpia (fizyczna + chemiczna) produktów nieenergetycznych (surówki, żużła, pyłu wielkopieczowego),
- i_s - entalpia (fizyczna + chemiczna) surowców nieenergetycznych (rudę, topników),
- q - ciepło oddane do otoczenia i wody chłodzącej,
- Δi_{g_o} - właściwa entalpia fizyczna wilgotnego gazu wielkopieczowego liczona od temperatury otoczenia.

W równaniu (4) wykorzystano bilans azotu do obliczenia ilości azotu w gazie wielkopieczowym. Dla uproszczenia przyjęto, że temperatura otoczenia ma wartość 0°C . Wszystkie wielkości w równaniu (4) odniesiono do tej ilości surówki, którą uzyskuje się z jednostki energii chemicznej koksu w procesie podstawowym.

Po zastosowaniu podgrzanego dmuchu inne parametry procesu wielkopieczowego powinny pozostać bez zmiany. W szczególności więc powinna pozostać bez zmiany entalpia fizyczna i chemiczna surowców nieenergetycznych oraz entalpia surówki. Entalpia żużła przypadająca na ustaloną ilość surówki może ulec pewnej zmianie, zmniejszenie bowiem zużycia koksu przyczynia się do zmniejszenia ilości żużła, podwyższenie zaś temperatury dmu-

chu sprzyja podwyższeniu temperatury żużła. Ponadto zwiększenie wydajności pieca uzyskane dzięki podwyższonej temperaturze dmuchu przyczynia się do zmniejszenia przypadających na ustaloną ilość surówki strat ciepła do otoczenia i do wody chłodzącej. Wspomniane tu wpływy trudno jest ująć analitycznie. Uwzględniając jednak to, że wpływy te są drugorzędne i ozęściowo wzajemnie się znoszą, można przyjąć, że wielkość $(i_p - i_s + q)$ odniesiona do ustalonej w równaniu (4) ilości surówki powinna po zastosowaniu gorącego dmuchu zachować swą wartość, z tym, że będzie jej odpowiadać zmniejszone zużycie energii chemicznej koksu:

$$(1 - \omega_k) [1 + l (\Delta i_L + X_L \Delta i_p)] = i_p - i_s + q + (1 - \omega_k) (u + x + y + z + 0,79 l)(w_x + \Delta i_g) \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta i_L, \Delta i_p$ - właściwa entalpia podgrzanego powietrza i pary wodnej liczona od stanu w temperaturze 0°C , kJ/m^3 ,

X_L - stopień zawilżenia powietrza doprowadzonego do wielkiego pieca, $\text{m}^3\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3$ pow. suchego.

Po odjęciu stronami równań (4) i (5) otrzymuje się:

$$(1 - \omega_k) [1 + l (\Delta i_L + X_L \Delta i_p) - (u + x + y + z + 0,79 l)(w_x + \Delta i_g)] = 1 - (u_o + x_o + y_o + z_o + 0,79 l_o)(w_{x_o} + \Delta i_{g_o}) \quad (6)$$

Wszystkie wielkości w równaniu (6) należy wyrazić odpowiednimi wzorami uzależniając je od temperatury t_L podgrzanego dmuchu oraz od zmierzonych jednorazowo parametrów procesu.

W miarę zwiększania temperatury podgrzania powietrza stosuje się coraz większe nawilżanie powietrza doprowadzanego do wielkiego pieca. Wielkość X_L jest także funkcją temperatury

t_L .

W dalszych rozważaniach przyjęto, że zależność X_L od temperatury jest liniowa:

$$X_L = \xi t_L + 0,005 \frac{m^3 H_2O}{m_n^3} \text{ pow.s.} \quad (7)$$

Współczynnik ξ wynika z jednorazowego pomiaru wielkiego pieca.

5. Zastosowanie równań bilansu substancjonalnego

Bilanse pierwiastków należy sporządzić w postaci uproszczonej, gdyż w przeciwnym razie prowadzą one do zbyt złożonych równań. Dlatego przyjęto następujące założenia:

- gaz wielkopiecowy zawiera tylko CO_2 , CO , N_2 , H_2 i H_2O ;
- substancja palna koksu zawiera tylko C i H ;
- różnica ilości pierwiastka węgla oraz różnica ilości pierwiastka tlenu w nieenergetycznych produktach i nieenergetycznych surowcach odniesiona do jednostki surówki jest stała;
- wilgość wsadu (bez koksu) odniesiona do jednostki surówki jest stała.

W celu ujęcia wpływu temperatury dmuchu na skład gazu wielkopiecowego wprowadza się dwie empiryczne funkcje temperatury dmuchu. Funkcje te powinny wyrażać proporcje składników wynikające z reakcji chemicznych przebiegających w dolnej części pieca. Powinno się z tych funkcji wyłączyć produkty procesu suszenia wsadu oraz rozkładu hydratów i węglanów przebiegającego w górnej części pieca, gdyż H_2O i CO_2 powstające w tych procesach nie uczestniczą w reakcjach chemicznych i ich ilość nie zależy od temperatury dmuchu. Dlatego należałoby wprowadzić następujące funkcje:

$$\varphi' = \frac{V_{CO}}{V_{CO} + V_{CO_2} - V_C w} \quad (8)$$

gdzie:

V_{CO} , V_{CO_2} , $V_C w$ - ilość CO i CO_2 w gazie wielkopiecowym oraz CO_2 w węglanach wsadu, m_n^3 /jedn. surówki.

$$\varphi = \frac{V_{H_2} + 2CH_4}{V_L X_L + V_{H_2} k} \quad (9)$$

gdzie:

$V_{H_2+2CH_4}$, V_L , $V_{H_2} k$ - ilość (H_2+2CH_4) w gazie wielkopieczowym, ilość powietrza dmuchu i wodoru palnego w koksie, m^3 /jedn. surówki.

Postać funkcji φ' jest bardzo niedogodna dla dalszych obliczeń. Stosowanie tej postaci funkcji znacznie utrudniłoby obliczanie wielkości stałych charakteryzujących dany proces wielkopieczowy. Można jednak uwzględnić, że ilość CO_2 powstająca z rozkładu węglanów jest stosunkowo niewielka (stanowi około 4% łącznej ilości $CO+CO_2$ w gazie wielkopieczowym). Dlatego w dalszych rozważaniach zastosowano uproszczoną postać funkcji empirycznej

$$\varphi = \frac{V_{CO}}{V_{CO} + V_{CO_2}} \quad (8a)$$

Przyjęcie takiej postaci funkcji φ nie oznacza pominięcia CO_2 pochodzącego z węglanów, a jest tylko równoznaczne z założeniem, że ilość CO_2 pochodzącego z węglanów jest proporcjonalna do łącznej ilości $CO + CO_2$ zawartej w gazie wielkopieczowym.

Bilans pierwiastka węgla odniesiony do jednostki surówki prowadzi do równania

$$V_{CO} + V_{CO_2} = \frac{22.42}{12} B o - V_{C s} \quad (10)$$

gdzie:

c - udział gramowy pierwiastka węgla w koksie.

Wielkość $V_{C s}$ uwzględnia przejście węgla do surówki, pyłu i metanu w gazie oraz powstawanie CO_2 z rozkładu węglanów. Przyjmuje się, że wielkość $V_{C s}$ nie zależy od temperatury podgrzanego dmuchu.

Dzieląc równanie (10) przez BW_k otrzymuje się równanie odniesione do jednostki energii chemicznej koksu:

$$y + z = a - \frac{\alpha}{1 - \omega_k} \quad (11)$$

gdzie:

$$a = \frac{22.42}{12} \frac{o}{W_k} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{V_{C_2} s}{B_o W_k} = \text{idem} \quad (13)$$

Z równań (11) i (7a) otrzymuje się względną ilość CO

$$y = \varphi \left(a - \frac{\alpha}{1 - \omega_k} \right) \quad (14)$$

Dla procesu podstawowego otrzymuje się:

$$y_o = \varphi_o (a - \alpha) \quad (15)$$

Z równań (8a) i (11) wynika ponadto zależność:

$$\varphi = \frac{y}{y + z} \quad (16)$$

Bilans azotu został wykorzystany przy wyprowadzaniu równania (6).

Bilans wodoru ujęty podobnie jak bilans węgla prowadzi do równania:

$$u + x = 1 X_L + d' + d'' + \frac{\delta}{1 - \omega_k} \quad (17)$$

gdzie:

$$d' = \frac{22.42}{2} \frac{h}{W_k} \quad (18)$$

$$d'' = \frac{22.42}{18} \frac{w}{W_k} \quad (19)$$

$$\delta = \frac{V_{H_2O \text{ ws}}}{B_o W_k} = \text{idem} \quad (20)$$

h, w - udział gramowy wodoru i wilgoci w koksie,
 $V_{H_2O \text{ ws}}$ - ilość H_2O wniesiona ze wsadem, bez wilgoci koksu
 $m_n^3/\text{jedn. surówki}$.

Z równania (9) wynika względna ilość (H_2+2CH_4)

$$u = \psi (1 X_L + d) \quad (21)$$

Dla procesu podstawowego otrzymuje się:

$$u_o = \psi_o (1_o X_{L_o} + d') \quad (22)$$

Bilans tlenu można uprościć odejmując od niego połowę bilansu wodoru. Otrzymuje się wówczas tzw. bilans wolnego tlenu, który prowadzi do równania

$$0,21 l + \frac{\beta}{1 - \omega_k} = (1 - \frac{\varphi}{2})(a - \frac{\alpha}{1 - \omega_k}) - \frac{\psi}{2} (1 X_L + d') \quad (23)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{V_R}{B_o W_k} = \text{idem} \quad (24)$$

V_R - różnica ilości tlenu w surowcach nieenergetycznych i produktach nieenergetycznych, $m_n^3/\text{jedn. surówki}$.

Z równania (23) wynika zużycie powietrza

$$l = \frac{(1 - \frac{\varphi}{2})(a - \frac{\alpha}{1 - \omega_k}) - \frac{\psi}{2} d' - \frac{\beta}{1 - \omega_k}}{0,21 + 0,5 \psi X_L} \quad (25)$$

Dla procesu podstawowego otrzymuje się

$$l_o = \frac{(1 - \frac{\varphi_o}{2})(a - \alpha) - \frac{\psi_o}{2} d' - \beta}{0,21 + 0,5 \psi_o X_{L_o}} \quad (26)$$

6. Energia chemiczna gazu

Dla uproszczenia przyjęto, że gaz zawiera tylko 2 składniki palne: CO i H₂. Metan zawarty w niewielkiej ilości w gazie zastąpiono podwójną ilością wodoru. Wyrażenie uwzględniające energię chemiczną gazu w równaniu (6) można więc przedstawić następująco:

$$(u + x + y + z + 0,79 l) W_x = u W_{H_2} + y W_{CO} \quad (27)$$

Podobne wyrażenie otrzymuje się dla procesu podstawowego. Po podstawieniu tych wyrażień do równania (6) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} (1 - \omega_k) \left[1 + l (\Delta i_{L o} + X_{L o} \Delta i_p) - (u + x + y + z + 0,79 l) \Delta i_g - \right. \\ \left. - y W_{CO} - u W_{H_2} \right] + 1 - [a + d' + d'' + \delta - \alpha + (X_{L o} + 0,79 l) \Delta i_{g o} - \\ - \varphi_o (a - \alpha) W_{CO} - \psi_o (l_o X_{L o} + d') W_{H_2} \end{aligned} \quad (28)$$

7. Wyznaczanie stałych procesu

Występujące w podanych wyżej równaniach wielkości pomocnicze a , d' , d'' oblicza się bezpośrednio podług składu chemicznego i wartości opałowej koksu. Stałe procesu α , β , δ , l_o , ξ , oblicza się podług wyników jednorazowego pomiaru. Za pomocą tego pomiaru należy wyznaczyć przy pewnej temperaturze t_{L1} podgrzanego dmuchu następujące wielkości: u_1 , x_1 , y_1 , z_1 , l_1 , X_{L1} , Δi_{g1} . Wartości φ_1 oraz ψ_1 wynikają z równań (16) i (21). Wartości φ_o , ψ_o , $\Delta i_{g o}$ otrzymuje się za pomocą wspomnianych wyżej równań empirycznych. Wartość $X_{L o}$ wynika z parametrów otoczenia. Wartość ξ wynika z równania (7).

Podstawiając przytoczone wyżej wyniki pomiaru do równań (11), (17), (25), (26) i (28) oblicza się niewiadome α , β , δ , l_o oraz ω_{k1} . Tę ostatnią wielkość oblicza się tylko ze względu na trudność wyeliminowania jej z równań.

Najlepiej jest zastosować następującą kolejność obliczeń. W równaniu (28) można bezpośrednio z wyników jednorazowego pomiaru obliczyć wielkość bezwymiarową H_1 określoną wzorem:

$$H_1 = 1 + l_1 (\Delta i_{L1} + X_{L1} \Delta i_{p1}) - (u_1 + x_1 + y_1 + z_1 + 0,79 l_1) \Delta i_{g1} - y_1 W_{CO} - u_1 W_{H_2} \quad (29)$$

Po podstawieniu tej wartości do wzoru (28) otrzymuje się:

$$(1 - \omega_{k1}) H_1 = 1 - [a + d' + d'' + \delta - \alpha + (X_{L0} + 0,79) l_0] \Delta i_{g0} - \varphi_0 (a - \alpha) W_{CO} - \psi_0 (l_0 X_{L0} + d') W_{H_2} \quad (30)$$

Z równań (11), (17) i (25) wynikają następujące zależności:

$$\alpha = (a - y_1 - z_1)(1 - \omega_{k1}) \quad (31)$$

$$\delta = (u_1 + x_1 - d' - d'' - X_{L1} l_1)(1 - \omega_{k1}) \quad (32)$$

$$\beta = (z_1 + \frac{1}{2} y_1 - \frac{1}{2} u_1 - 0,21 l_1)(1 - \omega_{k1}) \quad (33)$$

Po podstawieniu zależności (31), (32), (33) do równań (26) i (30) otrzymuje się układ 2 równań liniowych do wyznaczenia l_0 i $(1 - \omega_{k1})$. Obliczoną wartość $(1 - \omega_{k1})$ podstawia się do równań (31), (32), (33), otrzymuje się stałe procesu α , δ i β .

8. Wskaźniki energetyczne

Względna oszczędność koksu ω_k oblicza się z równania (28) po wyeliminowaniu wielkości l , u , x , y , z , będących funkcjami temperatury t_L . Po przekształceniach dochodzi się do wzoru:

$$\omega_k = 1 - \frac{1 + [(1 - \frac{\varphi}{2}) \alpha + \beta] D - B}{1 + [(1 - \frac{\varphi}{2}) a - \frac{\psi}{2} d'] D - (d' + d'' + a) \Delta i_g - \varphi a W_{CO} - \psi d' W_{H_2}} \quad (34)$$

gdzie:

$$D = \frac{\Delta i_L + X_L \Delta i_p - (0,79 + X_L) \Delta i_k - \psi X_L W_{H_2}}{0,21 + 0,5 \psi X_L} \quad (35)$$

$$B = [d' + d'' + a + 1_0 (X_L o + 0,79)] \Delta i_{g o} + (d' - \alpha) (\Delta i_{g o} - \Delta i_g) + \\ + [\varphi_0 (a - \alpha) + \varphi \alpha] W_{CO} + (1_0 X_L o + d') \psi_0 W_{H_2} \quad (36)$$

Wielkości występujące w równaniach od (34) do (36) mają wartość stałą lub są znanymi funkcjami temperatury dmuchu t_L .

Względna oszczędność dmuchu ω_L określa równanie

$$\omega_L = \frac{V_{L o} - V_L}{V_{L o}} = 1 - (1 - \omega_k) \frac{1}{1_0} \quad (37)$$

Względne zmniejszenie ω_g energii chemicznej gazu wielkopiecowego określa wzór

$$\omega_g = \frac{Q_{ch o} - Q_{ch}}{Q_{ch o}} = 1 - (1 - \omega_k) \frac{y W_{CO} + u W_{H_2}}{y_0 W_{CO} + u_0 W_{H_2}} \quad (38)$$

gdzie:

Q_{ch} - energia chemiczna gazu wielkopiecowego.

Względne zmniejszenie ω_z energii chemicznej gazu oddanego zewnętrznym odbiorcom wynika z równania

$$\omega_z = \frac{Q_{ch o} - Q_{ch} - \frac{1}{\rho_N} V_L (\Delta i_L + X_L \Delta i_p)}{Q_{ch o}} = \\ = 1 - (1 - \omega_k) \frac{u W_{H_2} + y W_{CO} - \frac{1}{\rho_N} 1 (\Delta i_L + X_L \Delta i_p)}{u_0 W_{H_2} + y_0 W_{CO}} \quad (39)$$

gdzie:

η_N - sprawność termiczna nagrzewnicy dmuchu.

Równanie (39) nie uwzględnia strat gazu występujących w obrębie zespołu wielkiego pieca.

Lokalny wskaźnik zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic
 $\bar{\omega}_N$ oblicza się za pomocą wzoru:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_N &= \frac{100}{V_L (\Delta i_L + X_L \Delta i_p)} \frac{d[V_L (\Delta i_L + X_L \Delta i_p)]}{dt_L} = \\ &= 100 \left(\frac{c_p L + X_L c_p p}{\Delta i_L + X_L \Delta i_p} + \frac{\Delta i_p}{\Delta i_L + X_L \Delta i_p} \frac{dX_L}{dt_L} \right) - \bar{\omega}_L \approx \\ &\approx \frac{100}{t_L} - \bar{\omega}_L \frac{1}{\text{hdeg}} \end{aligned} \quad (40)$$

Wskaźnik zmniejszenia kosztu paliw ϵ należy obliczać, uwzględniając wpływ podgrzania dmuchu na zużycie koksu, na zużycie gazu wielkopieczowego w nagrzewnicach i na zużycie węgla związane ze sprężaniem i nawilżaniem dmuchu. Ponadto należy wziąć pod uwagę to, że jednostka energii chemicznej koksu jest droższa niż jednostka energii chemicznej węgla, ta ostatnia zaś jest droższa niż jednostka energii chemicznej gazu wielkopieczowego. Po uwzględnieniu wszystkich tych czynników dochodzi się do następującego wzoru na wskaźnik zmniejszenia kosztu paliw

$$\epsilon = 1 - \frac{K}{K_0} = 1 - \frac{B W_k + V_L (q_L + X_L q_X) m - [V W_X - V_L \Delta i_L \frac{1}{\eta_N}] n}{B_0 W_k + V_L q_L m - V_0 W_X n} \quad (41)$$

gdzie:

- K - koszt paliw odniesiony do jednostki surowki,
- q_L, q_X - jednostkowe zużycie energii chemicznej węgla do sprężania powietrza i produkcji pary do nawilżania, kJ/m^3_n ,

- ϱ_N - sprawność termiczna nagrzewnicy dmuchu,
 VW_X - energia chemiczna gazu wielkopieczowego odniesiona do jednostki surówki,
 m, n - stosunek ceny jednostki energii chemicznej węgla i gazu wielkopieczowego do ceny jednostki energii chemicznej koksu ($n < m < 1$).

Po wykorzystaniu równań (38), (39) otrzymuje się:

$$\varepsilon = 1 - \frac{(1 - \omega_k) + l_o(1 - \omega_L)(q_L + X_L q_X) m - \left[(1 - \omega_g) F - l_o(1 - \omega_L) \frac{\Delta i_L}{\varrho_N} \right] n}{1 + l_o q_L m - F n} \quad (42)$$

gdzie:

$$F = (a - \alpha) \varphi_o W_{CO} + (l_o X_L o + d') \psi_o W_{H_2} \quad (43)$$

Lokalne wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_k$, $\bar{\omega}_L$, $\bar{\omega}_g$, $\bar{\omega}_z$ i $\bar{\varepsilon}$ można otrzymać przez różniczkowanie opierając się na wzorze (3).

9. Pomocnicze równania empiryczne

Podane dotąd równania mają znaczenie ogólne, obowiązują bez względu na postać pomocniczych równań empirycznych ujmujących wpływ temperatury dmuchu na wielkości φ , ψ , Δi_g . Aby umożliwić przeprowadzenie konkretnych obliczeń konieczne jest ustalenie ogólnej postaci funkcji φ , ψ i Δi_g na podstawie wyników pomiarów.

Przy jednakowej temperaturze dmuchu w różnych wielkich piecach występują różne wartości stosunku $CO/(CO + CO_2)$. Równanie ujmujące funkcję φ powinno więc zawierać współczynnik ustalany indywidualnie podług wyników jednorazowego pomiaru badanego procesu. Odpowiedni dobór tego współczynnika pozwala poprowadzić krzywą φ przez punkt wynikający z jednorazowego pomiaru badanego procesu. Inaczej mówiąc równanie empiryczne na funkcję φ powinno określać nie jedną krzywą lecz zespół (rodzinę) krzywych.

Równanie na funkcję φ powinno ponadto być dobrane tak, by prowadziło ono do sensownych wartości przy $t_L = 0^\circ\text{C}$ i przy $t_L \rightarrow \infty$. W pierwszym wypadku wartość φ powinna być mniejsza od jedności, w drugim zaś większa od zera.

Funkcja ψ w porównaniu z funkcją φ odgrywa znacznie mniejszą rolę w obliczeniach ze względu na małą zawartość wodoru w gazie wielkopiecowym. Funkcję ψ można więc ustalić mniej dokładnie niż funkcję φ . Również wielkość Δi_g odgrywa mniejszą rolę niż φ gdyż entalpia fizyczna gazu jest kilkakrotnie mniejsza od entalpii chemicznej.

Sposób ustalenia równań empirycznych ujmujących wielkości φ , ψ i Δi_g omówiono w kolejnej publikacji.

LITERATURA

- [1] Babarykin N.N.: Wlijanije nagriewa dutja na raschod koksia i stiepien koswiennogo wostanowlenija okislow zeleza w domiennoj pieci; Stal 24 (1964) nr 9, str. 778/84.
- [2] Babarykin N.N., Juszkina F.A.: Wlijanije nagriewa dutja na rabotu domiennoj pieczy; Stal 20 (1960) nr 5, str. 391/96.
- [3] Bell I.L.: Principles of the manufacture of iron and steel, London 1884.
- [4] Brooks S.H., Fitzgerald F.: Progress in blast furnace stove operation at Appleby - Frodingham; J. Iron and Steel Ind. (1964) nr 10, str. 818/32.
- [5] Gałatonow A.L.: Wlijanije tiempieratury dutja na tiechnikoekonomičeskije i tiechnologičeskije pokazateli domiennoj pławki; Stal 23 (1963) nr 10, str. 869/74.
- [6] Gotlib A.: Nagrzew dmuchu i zużycie koksia przy wytopie surówki w wielkim piecu (tłum. z rosyjskiego), Katowice 1951.
- [7] Kitajew B.J.: Trudy NTO czernoj mietalłurgii, t.8, Mietalłurgizdat 1956.
- [8] Michard J.: Cahiers du CESSID 1960 nr 18, str. 78 (Cahier II, CESSID D 49).
- [9] Okierman R.: Issledowanije nad raspriedielenijem tiepla pri domiennoj pławkie, w osobiennosti pod wlijanijem goriačego dutja; Gornyj žurnal, 1873, II str. 129/72.

- [10] Ostrouchow M.: *Ekonomija koksa w domiennej pławkie*, Moskwa 1960.
- [11] Pawłow M.A.: *Mietalżurgija čuguna, t. II Domiennyj proces*, Mietalżurgizdat 1949.
- [12] Ramm A.N.: *Kompleksnyj metod rasceta materialnogo i tieplowego balansa domiennej pławki*; Trudy Gipromieza, III, Moskwa-Leningrad 1941.
- [13] Reichardt P.: *Ein Beitrag zum Wärmeschaubild des Hochofens*, Stahl u. Eisen 76 (1956) nr 12, str. 731/38.
- [14] Wesemann F.: *Anhaltzahlen für die Wärmewirtschaft in Eisenhüttenwerken*, Düsseldorf 1957.
- [15] Zischkale W., Heynert G., Beer H.: *Auswirkung der Heißwindtemperaturen auf die Betriebsergebnisse des Hochofens*, Stahl u. Eisen 83 (1963) nr 18, str. 1117/23.

ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА ДУТЬЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Р е з ю м е

Используя уравнения материального баланса элементов С, Н, О, N а также уравнение энергетического баланса, выводятся формулы, представляющие влияние температуры дутья на удельный расход кокса, на расход дутья, на химическую энергию доменного газа и на стоимость израсходованных топлив. Эти формулы дают возможность, на основе результатов единичного теплового измерения доменного процесса, рассчитать ожидаемые эффекты повышения температуры дутья.

В расчетах следует использовать эмпирические уравнения, представляющие влияние температуры дутья на состав и температуру доменного газа.

THE INFLUENCE OF HEATING BLAST ON THE ENERGY
CHARACTERISTICS OF BLAST FURNACE PROCESS

S u m m a r y

Using the substance balance equations of elements C, H, O, N and energy balance equation, the author derives the formulae describing the influence of heating blast on rate of coke, rate of air, chemical energy of produced gases and on the cost of used fuels. By means of these formulae the predicted effects of increased blast temperature one can calculate basing on the single heat measurement results of blast furnace. In calculation there must be used the empirical equation describing the influence of blast temperature on the chemical composition and temperature of the gas.