

Marcin SZEGA

EFEKTY ENERGETYCZNE WYKORZYSTANIA GAZU WIELKOPIECOWEGO ZAWRACANEGO DO PROCESU

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki ilościowej analizy zastosowania w procesie wielkopieczowym zawracanego gazu wielkopieczowego. Gaz wielkopieczowy zawracany do procesu może być wykorzystany jako czynnik konwertujący w procesie wytwarzania gorących gazów redukcyjnych wdmuchiwanym do szybu wielkiego pieca lub wdmuchiwanym bezpośrednio po usunięciu CO_2 i H_2O . Zastosowano teoretyczno-empiryczny strefowy model matematyczny wielkiego pieca. Zawracanie gazu wielkopieczowego wpływa na zmianę wskaźników energetycznych procesu wielkopieczowego: jednostkowego zużycia koku, dmuchu, produkcji i energii chemicznej gazu wielkopieczowego. Wyznaczone wskaźniki energetyczne są miernikami efektów energetycznych zastosowania zawracanego gazu wielkopieczowego.

ENERGY EFFECTS OF APPLICATION OF THE RECIRCULATING TOP-GAS INTO THE BLAST-FURNACE PROCESS

Summary. The paper presents results the quantitative analysis of the recirculating top gas application into the blast-furnace process. After the removal of CO_2 and H_2O the recirculating topgas can be introduced into the lower part of the shaft of the blast furnace. It may also be used as a converting factor in the production of hot reducing gases, which are then blown into lower part of the shaft. In order to simulate the work of blast-furnace a mathematical theoretical-empirical zone model at a blast-furnace has been used. Recirculation influences the following energy characteristics: specific consumption of coke, blast, specific production of top-gas and its chemical energy. These are direct energy effects of top-gas recirculation. Determined energy characteristics characterize energy effects of the top-gas recirculation.

ENERGETISCHE EFFEKTE DER AUSNUTZUNG DES IN DEN HOCHOFENPROZESS RUCKGEFÜRTEN GICHTGASES

Zusammenfassung. Es wurden den Ergebnisse der quantitative Analyse des ruckgeföhrenes Gichtgas der Anwendung im

Hochhoffenprozeß dargestellt. Das ruckfuhrunge Gichtgas konnte als das Konvertirungsagens im Hochhoffenprozeß ausgenutz werden. Um die Arbeit eines Hochhoffens zu simulieren, wurde ein theoretisch-empirisches mathematisches Zonenmodell des Hochhoffens dargestellt. Die Rückführung des Gichtgases hat ein Einfluß auf die energetische Kennziffern des Hochhoffenprozeß. Dieser Einfluß wurde vorgeführt die Kennziffern können als Bewertung den energetischen Effekte betrachtet werden.

1. WSTĘP

Przewaga technologii produkcji stali w dwuetapowym procesie „wielki piek-konwertor” powoduje, że w świecie obserwuje się stałe dążenia zmierzające do ulepszenia procesu wielkopiecowego. Proces wielkopiecowy dzięki wykorzystaniu zasady przeciwprądowego przepływu gazów względem materiałów wsadowych charakteryzuje się stosunkowo niedużymi stratami egzergii. Sprawność egzergetyczna nowoczesnego procesu wielkopiecowego loco wielki piec osiąga wartość około 80%. Obok udoskonaleń technologicznych wprowadza się ulepszenia o charakterze energetycznym. Przedsięwzięcia energetyczne w technologii wielkopiecowej są przede wszystkim związane z dążeniem do oszczędności koksu. Energia chemiczna koksu stanowi przeważającą pozycję (około 70%) w całkowitej energii doprowadzonej do procesu wielkopiecowego.

Zmniejszenie zużycia koksu przypadającego na jego funkcję energetyczną (nośnik energii w celu podtrzymania wymaganej temperatury procesu) oraz redukcyjną (dostarcza pierwiastka węgla do reakcji redukcji rud żelaza) można uzyskać drogą podwyższenia parametrów dmuchu wielkopiecowego (temperatury, ciśnienia i wzbogacenia w tlen) oraz dodatku czynników paliwowo-redukcyjnych. Ta jednak ilość koksu, która jest niezbędna jako struktura podporowa i jako środek do nawęglania surówki, stanowi granicę w dążeniach do zmniejszenia zużycia koksu w wielkim piecu. To minimalne zapotrzebowanie koksu jest zależne od jakości wsadu i koksu. Szacuje się je na około 250 + 300 kg/t sur. [7]. Nowoczesny proces wielkopiecowy charakteryzuje się stosowaniem przygotowanego i bogatego wsadu, frakcjonowaniem koksu, wysokim podgrzaniem dmuchu (do 1350°C ze względu na ograniczenia materiałowe), wysokim ciśnieniem w gardzieli wielkiego pieca (0,3 + 0,35 MPa), wzbogacaniem dmuchu w tlen w granicach opłacalności ekonomicznej oraz wdmuchiwaniem paliw zastępczych (opłacalnych ekonomicznie np. pyłu węglowego) do strefy dysz.

Perspektywicznym kierunkiem w rozwoju procesu wielkopiecowego może być przemysłowe zastosowanie nowej technologii wielkopiecowej polegającej na recykulacji ubocznie wytwarzanego w procesie gazu wielkopiecowego. Zastosowanie recykulacji powoduje, że głównym odbiorcą gazu wielkopiecowego staje się wielki piec oraz prowadzi do częściowej realizacji technologii

bezodpadowej, w której produkt uboczny jest zużywany prawie w całości w procesie, w którym powstaje.

2. WYKORZYSTANIE GAZU WIELKOPIECOWEGO ZAWRACANEGO DO PROCESU

Rozpatruje się dwa sposoby wykorzystania gazu wielkopieczowego zwracanego do procesu:

- a) zastosowanie go jako czynnika konwertującego w procesie otrzymywania gorących gazów redukcyjnych na drodze konwersji paliw węglowodorowych wdmuchiwanym następnie do dolnej części szybu wielkiego pieca [3, 5, 10, 17]. W procesie konwersji jako czynnik konwertujący zamiast tlenu lub pary wodnej można stosować CO_2 i H_2O zawarte w gazie wielkopieczowym. Zaletą tej metody jest również możliwość zwrócenia do wielkiego pieca i powtórnego wykorzystania reduktorów CO i H_2 zawartych w gazie wielkopieczowym. W rezultacie uzyskuje się oszczędność paliwa wyjściowego (gazu ziemnego lub koksowniczego) używanego do konwersji;
- b) oczyszczenie z CO_2 i H_2O i zastosowanie go po podgrzaniu do wdmuchiwania do strefy dysz lub do dolnej części szybu wielkiego pieca (podobnie jak gorące gazy redukcyjne); wykorzystuje się w tym przypadku składniki redukcyjne tego gazu [2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 15, 16].

W badaniach światowych nad zastosowaniem recykulacji gazu wielkopieczowego ze względu na duże koszty instalacji doświadczalnych zdecydowanie przeważają badania symulacyjne prowadzone za pomocą zweryfikowanych modeli matematycznych.

Wyniki symulacyjnych badań numerycznych wpływu wdmuchiwania oczyszczonego i podgrzanego gazu wielkopieczowego oraz wdmuchiwania gorących gazów redukcyjnych otrzymanych z zastosowaniem jako czynnika konwertującego recykulującego gazu do procesu wielkopieczowego przedstawiono w [2, 9, 16]. Przeprowadzono analizę energetyczną i ekonomiczną procesu uwzględniając metody oczyszczania recykulującego bezpośrednio do procesu gazu wielkopieczowego za pomocą etanoloamin i sit molekularnych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych oszacowano oszczędność koksu w granicach $20 \div 30\%$ i wzrost wydajności wielkiego pieca o około 11% . Przeprowadzona analiza ekonomiczna wykazała, że koszt jednostkowy surówki wzrasta o $5 \div 13\%$. O opłacalności ekonomicznej praktycznego zastosowania recykulacji gazu wielkopieczowego będzie decydowała zdaniem autora cena koksu oraz koszt instalacji oczyszczania recykulującego gazu wielkopieczowego.

Technologie wytwarzania gorących gazów redukcyjnych za pomocą reformowania gazu koksowniczego lub ziemnego za pomocą CO_2 i H_2O zawartych w recykulującym gazie wielkopieczowym opisano w [3, 5]. Zawartość azotu w

gazie redukcyjnym została zmniejszona poprzez pobieranie gazu wielkopiecowego z obrzeża wielkiego pieca.

3. WPŁYW ZAWRACANIA GAZU WIELKOPIECOWEGO NA PROCES WIELKOPIECOWY

Wdmuchiwanie gorących gazów redukcyjnych otrzymanych z zastosowaniem jako czynnika konwertującego gazu wielkopiecowego lub recyrkulującego oczyszczonego gazu wielkopiecowego wpływa na bilans energetyczny procesu wielkopiecowego. Na skutek wdmuchiwania ulegają zmianie:

- wielkość zużycia koksu,
- wielkość zużycia dmuchu,
- ilość i energia chemiczna ubocznie wytwarzanego gazu wielkopiecowego.

Wielkości te odniesione do jednostkowej ilości surowki produkowanej w procesie nazwano jednostkowymi wskaźnikami energetycznymi procesu wielkopiecowego [12].

4. ZASTOSOWANIE METODY BILANSÓW STREFOWYCH WIELKIEGO PIECA DO PROGNOZY WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU WIELKOPIECOWEGO

Realizowanie przedsięwzięć mających na celu poprawę wskaźników energetycznych i ekonomicznych procesu wielkopiecowego powinno być poprzedzone teoretyczną analizą ilościową przewidywanych efektów. Do tego celu może służyć teoretyczno-empiryczna strefowa metoda bilansowa przewidywania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego [13]. Metoda ta została opracowana w celu prognozy wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego w warunkach recyrkulacji gazu wielkopiecowego lub wdmuchiwania gorących gazów redukcyjnych otrzymanych z zastosowaniem jako czynnika konwertującego recyrkulującego gazu wielkopiecowego.

Strefowa metoda bilansowa prognozowania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego jest metodą teoretyczno-doświadczalną. Część teoretyczna bazuje na zasadach zachowania ilości substancji i energii [12] oraz na podstawach nowoczesnej teorii procesu wielkopiecowego, która wyróżnia w wielkim piecu dwa obszary temperaturowe oddzielone strefą rezerwy cieplnej. Bilanse pierwiastków C+S, H, O, N oraz bilans energii sporządza się oddzielnie dla górnej strefy przepływu ciepła (strefy przygotowawczej) oraz dla dolnej strefy (strefy wytwarzającej) wraz ze strefą rezerwy cieplnej [14]. Warunki zbliżone do stanu równowagi termodynamicznej, które panują w strefie rezerwy cieplnej, pozwalają na sformułowanie równań równowagi chemicznej dla wyznaczenia składu fazy gazowej w tej strefie. Do części doświadczalnej

metody należy jednorazowy pomiar cieplny badanego wielkiego pieca, na podstawie którego wyznacza się stałe procesu w równaniach bilansowych poszczególnych stref temperaturowych. W ten sposób dochodzi się do równań indywidualnych uwzględniających specyfikę badanego procesu wielkopieczowego pozwalających przewidywać wskaźniki dla konkretnego procesu wielkopieczowego. Zakłada się, że w przypadku badanego wielkiego pieca są zachowane stałe warunki wsadowe i stały skład produktów nieenergetycznych. Zakłada się także, że w równaniach bilansowych następujące wielkości odniesione do jednostkowej ilości surowki nie zależą od ilości wdmuchiwanego recyrkulującego gazu wielkopieczowego lub gazu redukcyjnego [12, 13]:

- ilość węgla zawarta w dwutlenku węgla pochodzącym z rozkładu węglanów – stała procesu α_p ,
- wilgoć wsadu (bez wilgoci koksu) – stała procesu β_p ,
- różnica między ilością tlenu w nieenergetycznych produktach (bez pyłu wielkopieczowego) i substratach górnej strefy przepływu ciepła – stała procesu γ_p ; podobnie dla dolnej strefy przepływu ciepła – stała procesu γ_w ,
- różnica między sumą entalpii produktów nieenergetycznych (z wyjątkiem pyłu wielkopieczowego) a sumą entalpii substratów nieenergetycznych górnej strefy przepływu ciepła – stała procesu δ_p ; podobnie dla dolnej strefy przepływu ciepła – stała procesu δ_w ,
- całkowity strumień strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej jest stały.

Układ równań bilansowych dla dolnej strefy przepływu ciepła rozpatrywanej razem ze strefą rezerwy cieplnej ma postać:

Połączony bilans węgla i siarki:

$$k_{sr} \left(\frac{C_{Ksr}}{12} + \frac{S_{Ksr}}{32} \right) + G_r(CO_r + CO_{2r}) = \frac{C_N}{12} + G_{sr}(CO_{sr} + CO_{2sr}). \quad (1)$$

Bilans wodoru:

$$K_{sr} \frac{h_{Ksr}}{2} + DX_{zD} + G_r(H_{2r} + X_{zr}) = G_{sr}(H_{2sr} + X_{zsr}). \quad (2)$$

Różnica bilansów tlenu i wodoru:

$$\begin{aligned} DO_{2D} - K_{sr} \frac{h_{Ksr}}{4} + G_r[0,5(CO_r - H_{2r}) + CO_{2r}] = \\ = \gamma_w + G_{sr}[0,5(CO_{sr} - H_{2sr}) + CO_{2sr}] \end{aligned} \quad (3)$$

Bilans azotu:

$$\begin{aligned} D(1 - O_{2D}) + G_r(1 - CO_r - H_{2r} - CO_{2r}) = \\ = G_{sr}(1 - CO_{sr} - H_{2sr} - CO_{2sr}). \end{aligned} \quad (4)$$

Bilans energii:

$$\begin{aligned} K_{sr}(d_{Ksr} + i_{Ksr}) + D(i_D + X_{zD}i_{xD}) + G_r(W_{dr} + i_r + X_{zr}i_{zr}) = \\ = \delta_w + \xi_q \dot{Q}_{ow} \frac{D}{D} + G_{sr}(W_{dsr} + i_{sr} + X_{zsr} i_{Xsr}). \end{aligned} \quad (5)$$

Dla górnej strefy przepływu ciepła układ równań bilansowych ma podobną postać [13]. Relacja między K_{sr} i K ma następującą postać:

$$K_{sr} = \left(K - P \frac{c_p}{c_K} \right) (1 - o_K - n_K). \quad (6)$$

Skład gazu w strefie rezerwy cieplnej wyznacza się z zależności opisujących sprawności wykorzystania CO i H₂. Sprawność wykorzystania tlenu węgla i wodoru w strefie rezerwy cieplnej dla ustalonej temperatury panującej w tej strefie jest stała. W praktyce wielkopiecowej redukcja wüstytu w strefie rezerwy cieplnej nie osiąga jednak poziomu idealnego wynikającego z warunku równowagi chemicznej w tej strefie. Sprawności wykorzystania tlenu węgla i wodoru w tej strefie w praktyce przyjmują wartości leżące pomiędzy 80 a 95% wartości maksymalnej wynikającej ze stanu równowagi chemicznej [1]. Zatem teoretyczne wartości sprawności wykorzystania składników redukcyjnych gazów należy skorygować przy wykorzystaniu współczynnika empirycznego:

$$\frac{CO_{2sr}}{CO_{sr} + CO_{2sr}} = \chi \frac{K_{pCO}}{1 + K_{pCO}}, \quad (7)$$

$$\frac{H_2O_{sr}}{H_{2sr} + H_2O_{sr}} = \chi \frac{K_{pH_2}}{1 + K_{pH_2}}, \quad (8)$$

gdzie:

χ – współczynnik uwzględniający odchylenie od teoretycznych wartości sprawności wykorzystania składników redukcyjnych gazów w strefie rezerwy cieplnej.

Z warunku występowania w strefie rezerwy cieplnej stanu zbliżonego do stanu równowagi chemicznej wynika, że zależność pomiędzy składnikami gazu w tej strefie może być opisana równaniem o następującej postaci:

$$\frac{H_2O_{sr}}{H_{2sr} + H_{2O_{sr}}} = \frac{K_{pH_2}(1 + K_{pCO})}{K_{pCO}(1 + K_{pH_2})} \frac{CO_{2sr}}{CO_{sr} + CO_{2sr}} \quad (9)$$

W gardzieli wielkiego pieca skład gazu odbiega od składu równowagowego, lecz nadal istnieje związek pomiędzy funkcjami $CO_2/(CO+CO_2)$ a $H_2O/(H_2+H_2O)$ [13]. Stopień odchylenia składu gazu wielkopieczowego w gardzieli wielkiego pieca od stanu zbliżonego do stanu równowagowego w strefie rezerwy cieplnej uwzględniono wprowadzając do równania wyraz wolny wyznaczany na podstawie jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca. Przyjęto następującą postać rozważanego równania na ilość H_2 w gazie wielkopieczowym:

$$\frac{GH_2}{\left(K - P \frac{c_P}{c_K}\right) \frac{h_K}{2} + DX_{zD} + G_r(H_{2r} + X_{zr})} = \frac{-C_{sr}}{1 + \frac{CO}{CO_2}} + \psi_0, \quad (10)$$

gdzie:

C_{sr} – stały współczynnik wynikający z wartości stałych równowagi chemicznej reakcji zachodzących w strefie rezerwy cieplnej.

ψ_0 – parametr wyznaczany na podstawie jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca.

Współczynnik C_{sr} wyznacza się z równania:

$$C_{sr} = \frac{K_{pH_2}(1 + K_{pCO})}{K_{pCO}(1 + K_{pH_2})} \quad (11)$$

Układ równań bilansowych substancji i energii adiabatycznej komory spalania dla strefy dysz wielkiego pieca stanowi uzupełnienie bilansów substancji i energii dolnej strefy przepływu ciepła (strefy wytwarzającej) z uwagi na wzajemne powiązania pomiędzy tymi bilansami (parametry dmuchu T_D , O_{2D} i wskaźnik jednostkowy D) [13].

Wydmuch pyłu wielkopieczowego w gardzieli wielkiego pieca opisano za pomocą zależności empirycznej [18]:

$$P = (58,24 + 2,65P_0)u_G + P_0 \quad (12)$$

gdzie:

u_G – prędkość wypływu gazu wielkopiecowego w gardzieli wielkiego pieca.

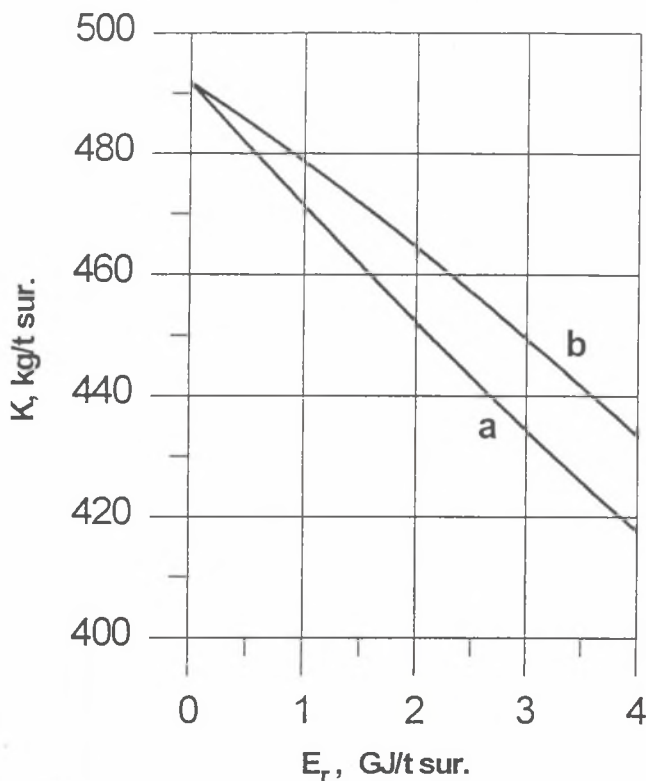
Parametr funkcji P_0 wyznaczany jest na podstawie danych jednorazowego pomiaru ciepłego wielkiego pieca.

Skład wdmuchiwanego gorącego gazu redukcyjnego wyznaczany jest na podstawie modelu matematycznego komory konwersji z zastosowaniem jako czynnika konwertującego gazu wielkopiecowego. Skład gazu wielkopiecowego bezpośrednio recyrkulującego do procesu wynika z danych instalacji oczyszczania gazu za pomocą etanoloamin [2].

5. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Na rysunkach 1 ÷ 4 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń symulacyjnych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego w przypadku:

a. Wdmuchiwania do dolnej części szybu wielkiego pieca gorącego gazu redukcyjnego otrzymanego z zastosowaniem jako czynnika konwertującego ga-



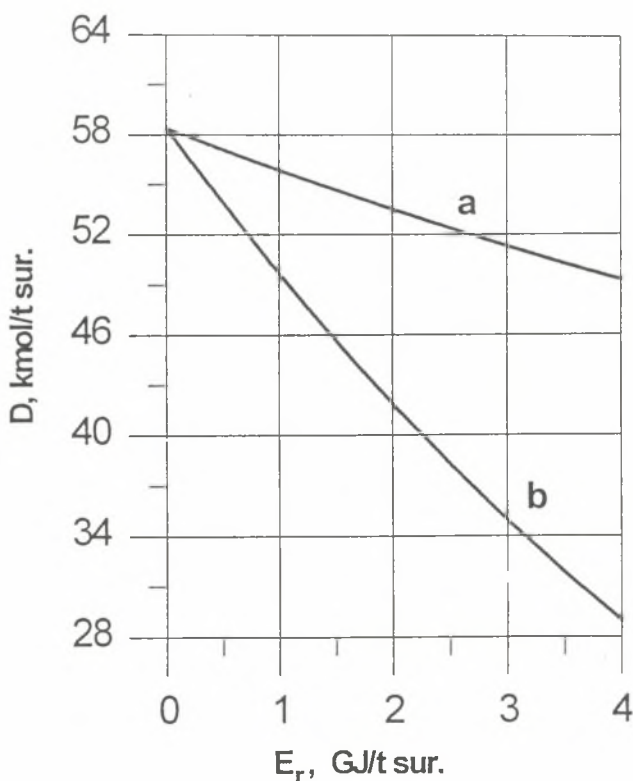
Rys. 1. Wskaźnik jednostkowego zużycia koksu

Fig. 1. Specific consumption of coke

zu wielkopiecowego pobieranego z górnej części szybu. Jako czynnik wyjściowy do procesu konwersji przyjęto gaz koksowniczy.

- b. Wdmuchiwanie do strefy dysz oczyszczonego i podgrzanego recyrkulującego gazu wielkopiecowego.

Analizowane przypadki charakteryzują się największymi bezpośrednimi efektami energetycznymi w postaci oszczędności koksu. W przypadku wdmuchiwania do dolnej części szybu wielkiego pieca gorącego gazu redukcyjnego otrzymanego z zastosowaniem jako czynnika konwertującego gazu wielkopiecowego pobieranego z górnej części szybu przyjęto, że pobierany gaz ma skład na wyjściu ze strefy rezerwy cieplnej. W przypadku recyrkulacji gazu wielkopiecowego do strefy dysz uwzględnia się jednocześnie nakładanie się efektów wdmuchiwania recyrkulującego gazu i przyjętego jako zmienne wzbogacenia dmuchu w tlen w celu zachowania na niezmiennym poziomie adiabatycznej temperatury spalania w strefie dysz.



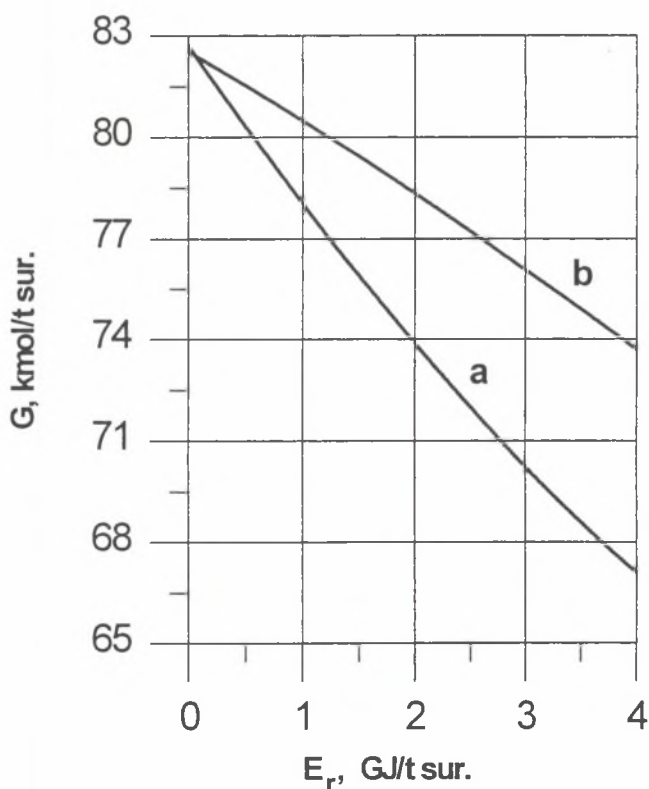
Rys. 2. Wskaźnik jednostkowego zużycia dmuchu

Fig. 2. Specific consumption of blast

Na rys. 1 przedstawiono wpływ analizowanych przypadków recyrkulacji gazu wielkopiecowego na wskaźnik jednostkowego zużycia koksu. W obydwu przypadkach występuje wyraźne zmniejszanie się jednostkowego zużycia koksu w miarę zwiększania się jednostkowej energii chemicznej i fizycznej wdmuchiwanego gazu. Dla obu przypadków wdmuchiwania występuje inny zakres zmian wymienionego wskaźnika.

W przypadku wdmuchiwania gazu redukcyjnego do dolnej części szybu zmniejszenie zużycia koksu wynika z zastępowania części gazów redukcyjnych powstających z koksu przez składniki redukcyjne zawarte we wdmuchiwanym gazie.

W przypadku recyrkulacji gazu do strefy dysz zmniejszenie zużycia koksu wynika również z zastępowania części koksu związanej z zapotrzebowaniem cieplnym procesu przez podgrzany recyrkulujący gaz.



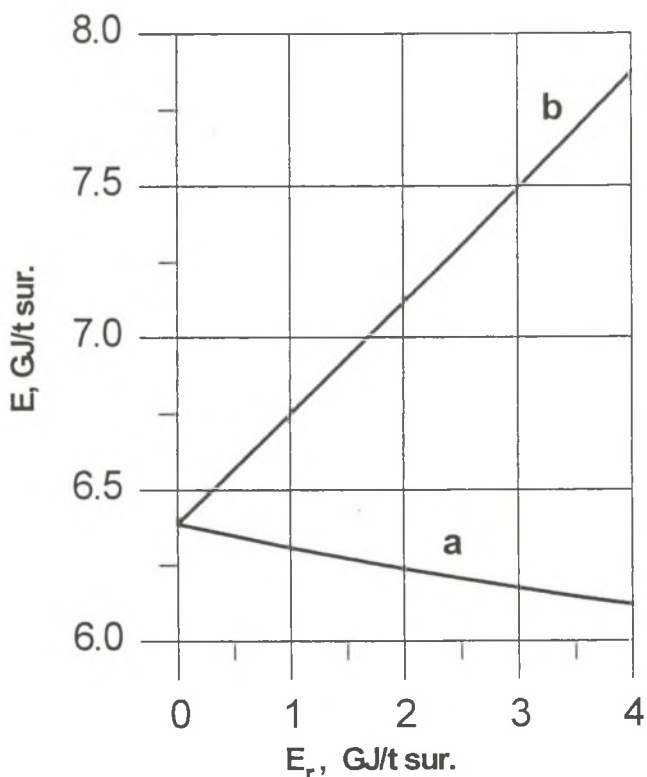
Rys. 3. Jednostkowa produkcja gazu wielkopiecowego

Fig. 3. Specific production of top-gas

Zakres zmian jednostkowego wskaźnika dmuchu przedstawionego na rys. 2 dla obu przypadków wdmuchiwania jest wynikiem wpływu zmian zużycia koksu, sposobu wdmuchiwania gazu i wzbogacenia dmuchu w tlen.

Przebieg jednostkowego wskaźnika jednostkowej produkcji gazu wielkopieczowego przedstawiono na rys. 3. W obu przypadkach występuje zmniejszanie się tego wskaźnika na skutek oszczędności koksu i zmniejszania się zużycia dmuchu. Dla przypadku wdmuchiwania gazu redukcyjnego jest on również wynikiem pobierania gazu z szybu do komory konwersji.

Przebieg jednostkowego wskaźnika energii chemicznej gazu wielkopieczowego przedstawionego na rys. 4 jest wynikiem zmian ilości produkowanego gazu oraz jego wartości opałowej. W przypadku wdmuchiwania recyrkulującego gazu do strefy dysz następuje wzrost tego wskaźnika. Wzrost ten jest wynikiem wpływającej się wartości opałowej gazu. W przypadku wdmuchiwania gazu redukcyjnego do dolnej części szybu następuje niewielkie



Rys. 4. Jednostkowa ilość energii chemicznej produkowanego gazu wielkopieczowego

Fig. 4. Specific chemical energy of top-gas

zmniejszanie się wartości tego wskaźnika. Jest to wynikiem większego spadku wartości wskaźnika produkcji gazu wielkopiecowego.

6. PODSUMOWANIE

Stosowane tradycyjne metody obniżania zużycia koksu w procesie wielkopiecowym nie zwalniają od konieczności zbadania innych rozwiązań. Zawracanie do procesu gazu wielkopiecowego stanowi perspektywiczny kierunek w dążeniach do unowocześniania i poprawy doskonałości termodynamicznej procesu wielkopiecowego. Stanowi ono krok w kierunku technologii bezodpadowych, w których produkt uboczny skojarzonego procesu energotechnologicznego jest zużywany w procesie, w którym powstaje zgodnie z proekologicznymi tendencjami, aby realizować procesy energotechnologiczne w sposób jak najmniej zagrażający środowisku naturalnemu człowieka.

W pracy przedstawiono wyniki numerycznych badań symulacyjnych bezpośrednich efektów energetycznych rozważanych przypadków zastosowania gazu wielkopiecowego zawracanego do procesu. Zastosowano zweryfikowany model matematyczny procesu wielkopiecowego oparty na bilansie strefowym [20].

Uzyskane wyniki bezpośrednich efektów energetycznych mogą być wykorzystane w analizie ekonomicznej. Dodatkowo w analizie ekonomicznej powinien być uwzględniony efekt zwiększenia wydajności procesu.

Praca powstała w wyniku realizacji grantu 9 S603 014 07 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

SPIS OZNACZEŃ

- c – udział gramowy węgla,
- c_N – suma pierwiastków węgla i siarki w produktach nieenergetycznych procesu, kg/t sur.,
- CO – udział molowy CO w suchym gazie wielkopiecowym, kmol/kmol,
- CO₂ – udział molowy CO₂ + SO₂ w suchym gazie wielkopiecowym, kmol/kmol,
- CO_r – udział molowy CO w oczyszczonym recyrkulującym gazie wielkopiecowym lub gorącym gazie redukcyjnym, kmol/kmol,
- CO_{2r} – udział molowy CO₂ w oczyszczonym recyrkulującym gazie wielkopiecowym lub gorącym gazie redukcyjnym, kmol/kmol,
- CO_{sr} – udział molowy CO w gazie w strefie rezerwy cieplnej, kmol/kmol,
- CO_{2sr} – udział molowy CO₂ w gazie w strefie rezerwy cieplnej, kmol/kmol,
- d – entalpia dewaluacji, kJ/kg lub kJ/kmol,
- D – jednostkowy wskaźnik zużycia suchego, wzbogaconego tlenem dmuchu, kmol/t sur.,

- \dot{D} – strumień dmuchu suchego, doprowadzany do wielkiego pieca, kmol/s,
 E – jednostkowy wskaźnik energii chemicznej ubocznie wytwarzanego gazu wielkopiecowego, kJ/t sur.,
 G – jednostkowy wskaźnik produkcji suchego gazu wielkopiecowego, kmol/t sur.,
 G_r – jednostkowa ilość recyrkulującego oczyszczonego suchego gazu wielkopiecowego lub gorącego gazu redukcyjnego, kmol/t sur.,
 G_{sr} – jednostkowa ilość gazu w strefie rezerwy cieplnej, kmol/t sur.,
 h – udział gramowy wodoru,
 H_2 – udział molowy wodoru w suchym gazie wielkopiecowym, kmol/kmol,
 H_{2r} – udział molowy wodoru w oczyszczonym recyrkulującym gazie wielkopiecowym lub gorącym gazie redukcyjnym, kmol/kmol,
 H_{2sr} – udział molowy wodoru w gazie w strefie rezerwy cieplnej, kmol/kmol,
 i – entalpia fizyczna właściwa, kJ/kg lub kJ/kmol,
 K – jednostkowy wskaźnik zużycia koksu, kg/t sur.,
 K_{sr} – jednostkowa ilość koksu w strefie rezerwy cieplnej, kg/t sur.,
 K_p – stała równowagi chemicznej,
 n – udział gramowy azotu,
 o – udział gramowy tlenu,
 O_{2D} – udział molowy tlenu w suchym dmuchu wielkopiecowym, kmol/kmol,
 P – jednostkowa ilość wydmuchiwanego pyłu wielkopiecowego, kg/t sur.,
 \dot{Q}_{ow} – całkowity strumień strat ciepła wielkiego pieca do otoczenia i wody chłodzącej, kW,
 s – udział gramowy siarki,
 u_G – prędkość przepływu gazu w gardzieli wielkiego pieca, m/s,
 w – udział gramowy wilgoci,
 W_d – wartość opałowa, kJ/kg lub kJ/kmol,
 X_z – molowy stopień zawilżenia, kmol H_2O /kmol g.s.,
 ξ_q – mnożnik podziału strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej dla stref temperaturowych wielkiego pieca.

Indeksy

- CO – dotyczy tlenku węgla,
 CO_2 – dotyczy dwutlenku węgla,
 D – dotyczy dmuchu wielkopiecowego,
 E – dotyczy energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego,
 G – dotyczy suchego gazu wielkopiecowego lub gardzieli wielkiego pieca,
 H_2 – dotyczy wodoru,
 H_2O – dotyczy pary wodnej,

- K – dotyczy koksu,
- P – dotyczy pyłu wielkopiecowego,
- r – dotyczy oczyszczonego recyrkulującego gazu wielkopiecowego lub gorącego gazu redukcyjnego,
- sr – dotyczy górnego przekroju strefy rezerwy cieplnej,
- XD – dotyczy molowego stopnia zawilżenia dmuchu,
- XG – dotyczy molowego stopnia zawilżenia gazu wielkopiecowego,

LITERATURA

- [1] Coheur P., Decker A.: Diversification of energy sources for the blast furnace: the double injection process. *Ironmaking and Stellmaking* 2, 1974.
- [2] Giuli M., Drigo G.: Recircolo del gas di bocca dell'altoforno. Analisi del processo e valutazione tecnico-economica. *Bollettino Tecnico Finsider* nr 390, 1981.
- [3] Garina I.M., Jeremiejewa K.A.: Poluczienije i ispolzowanije w domienom proizvodstwiye gorjaczich wosstanowitielnych gazow. *Domiennoje proizvodstwo* 4, 1973.
- [4] Minsheng Q., Naifu Y.: A blast-furnace process with pulverized coal, oxygen and gas circulation for reduction. *Scand. J. of Metallurgy* 15, 1986.
- [5] Miyashita T., Sano K.: Blast furnace stack injection by top gas recycled system (NKG process). *Ironmaking Proc.*, 33 (1974), 39.
- [6] Ohno Y., Hotta H., Matsuura M., Mitsufuji M., Saito H.: Development of the oxygen blast furnace. *Stell Research Center Nippon Kokan K.K. Process Technology Conference Proceedings, AIME*, 1988.
- [7] Oppermann K.: Zur Substitution von Hochofenkoks durch Zusatzbrennstoffe *Neue Hütte* nr 6, 1983.
- [8] Papst G.: Development in smelting reductions processes. *Steel Research* 60, 1989 nr 3 i 4.
- [9] Ramm A.N., Karpilowski J.B.: Analityczieskoje issledowanije effiektivnosti domiennoj plawki pri wduwanii w gorn kołosznikowogo gaza, ocziszcziennogo ot CO₂ i tiechnologiczieskogo kisloroda biez atmosfjernogo dutia. *Stal* nr 4, 1971.
- [10] Ramm A.N., Karpilowski J.B.: O domiennoj plawkie s wduwanijem wosstanowitielnych gazow polucziennych razlicznymi sposobami. *Stal* nr 7, 1975.
- [11] Steffen R.: Direct reduction and smelting reduction-an overview. *Steel Research* 60, 1989, Nr 3 i 4.

- [12] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Ossolineum, Wrocław 1983.
- [13] Szega M.: Analiza termodynamiczna możliwości wykorzystania składników redukcyjnych gazu wielkopiecowego zwracanego do procesu. Praca doktorska. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska, Gliwice 1993.
- [14] Szega M., Ziębik A.: Efekty energetyczne recyrkulacji gazu wielkopiecowego. Hutnik -Wiadomości Hutnicze, nr 10-11, 1994, s. 302 + 313.
- [15] Tichomirow E. N.: Metodika rasczieta i pokazateli domiennoj pławki s wduwaniem goriaczich wosstanowitielnych gazow i kisloroda biez atmosfiericznogo dutia. Stal nr 7, 1987.
- [16] Wartmann R., Bekemeier W.: Überprüfung neuer Verfahrensweisen zur Herstellung von flüssigem Roheisen. Forschungsbericht T 84-220, Bundesministerium für Forschung und Technologie, (BMFT). Bonn, Oct. 1984.
- [17] Woskobjnikow W.T.: Domiennaja pławka s primienienijem goriaczich wosstanowitielnych gazow i tiechnologiczieskiego kisloroda. Stal nr 4, 1970.
- [18] Ziębik A., Kruczek T.: Analysis of the Influence of the Top-Gas Pressure on the Increase Energy Characteristics of a Blast-Furnace Assembly. Bull. Pol. Acad. Sci., Techn. Sciences, Vol. 39, No 2, 1991.
- [19] Ziębik A., Szega M.: A System Analysis of the Energy Effects of Top-Gas Recirculation in the Blast-Furnace Process. Materiały konferencyjne Międzynarodowej Konferencji ENSEC'93 Energy Systems and Ecology, Kraków 1993.
- [20] Ziębik A., Szega M.: Weryfikacja strefowej metody bilansowej prognozowania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego. Materiały konferencyjne XV Zjazdu Termodynamików, Kokotek koło Lublińca, 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. Andrzej Ziębik

Wpłynęło do Redakcji: 10. 02. 1995 r.

Abstract

Two-stage technology (blast-furnace – oxygen converter) in the actual world production of steel represents about 70%. Trends towards improving the blast-furnace process have been observed world-wide. This concerns both

the technological, as well as the energy improvement. Both lead also towards an ecological improvement. The major part of energy designs is the result of attempts to decrease the coke consumption in a blast-furnace.

Further possibilities of improving the blast-furnace process concern the application of injecting hot reducing gases into the lower part of the shaft and the recirculation of top-gas after the removal of CO_2 and H_2O . Recirculated top-gas can be injected into the tuyere zone. Recirculated top-gas may also be used as the conversion factor in the process of producing hot reducing gas by means of the conversion of hydrocarbon fuels. This paper presents the case of utilizing the recirculated top-gas.

Recirculation of part of the top-gas into the lower part of the shaft or into the tuyere zone influences the consumption of coke, blast, the amount of top-gas and the chemical energy. Calculated in relation to a pig-iron unit, these quantities have been called energy characteristics.

The zone-balance method of predicting the energy characteristics of a blast-furnace plant is both theoretical and empirical in its character. The theoretical part bases on principles of the conservation of substance and energy, as well as on the modern theory of the blast-furnace process, which distinguishes two segments separated from each other by the thermal reserve zone. The balances of the elements C, S, H, O and N and energy balance equations have been set up separately for the top zone of heat transfer and for the lower zone together with the thermal reserve zone. The conditions in the thermal reserve zone approach thermodynamic equilibrium which makes it possible to apply chemical equilibrium equations in order to determine the composition of the gas phase in this zone.

The empirical part of this method includes one single thermal measurement of the investigated blast-furnace. The results of this measurement are used to determine the process constant in the balance equations and the unknown parameters in the empirical equations.

The results of simulation have been presented in Figs. 1 - 4. Recirculation of top-gas in the blast-furnace process is considered to be one of the perspective methods of improving the blast-furnace process. At present only simulative numerical investigations of this technology are being carried out.