ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 68 Nr kol. 564

Andrzej ZIĘBIK, Kazimierz WALECZEK
Andrzej KOPEĆ

Instytut Techniki Cieplnej

PORÓWNANIE EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH DODATKU RÓŻNYCH PALIW ZASTĘPCZYCH W PROCESIE WIELKOPIECOWYM

Streszczenie. W pracy przeprowadzono porównanie efektów energetycznych uzyskanych przy wdmuchiwaniu oleju opałowego, gazu ziemnego i gazu koksowniczego do wielkiego pieca jednej z polskich hut. Do oceny wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego zastosowano teoretyczno-doświadczalną metodę bilansową typu "input-output" [7].

OZNACZENIA I INDEKSY

Oznaczenia

a - ilość węgla i siarki w koksie i paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,

b - ilość wodoru H_2 w koksie i paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,

D - wskaźnik zużycia suchego dmuchu, m_n^3/t sur.,

E - wskaźnik energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego, GJ/t sur.,

E_z - wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców, GJ/t sur.,

e - ilość wilgoci w koksie i paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,

f - ilość tlenu w paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,

g - ilość azotu w paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,

G - wskaźnik produkcji suchego gazu wielkopiecowego, m_n^3/t sur.,

i - entalpia fizyczna właściwa (obliczona od temperatury otoczenia), kJ/m_n^3 lub kJ/kg,

K - wskaźnik zużycia koksu, kg/t sur.,

l - jednostkowe zużycie powietrza sprężonego do rozpylania oleju, m_n^3/kg,

n - udział molowy azotu w suchym gazie wielkopiecowym,

P - jednostkowe zużycie paliwa zastępczego, kg/t sur., m_n^3/t sur. lub kJ/t sur.,

t - temperatura, ^oC,

u - udział molowy wodoru w suchym gazie wielkopiecowym,

v - udział molowy CO_2 w suchym gazie wielkopiecowym,

W_d - wartość opałowa, kJ/kg lub kJ/m_n^3,

X - stopień zawilżenia, m_n^3 H_2O/m_n^3 gazu suchego,

y - udział molowy CO w suchym gazie wielkopiecowym,

ζ - mnożnik uwzględniający straty gazu wielkopiecowego w obrębie wielkiego pieca,

η_N - sprawność termiczna nagrzewnic dmuchu.

Indeksy

d - dmuch,
g - gaz wielkopiecowy,
k - koks,
l - powietrze sprężone do rozpylania oleju,
N - nagrzewnice dmuchu,
n - azot,
p - paliwo zastępcze,
u - wodór,
v - dwutlenek węgla,
x - para wodna,
y - tlenek węgla,
z - zewnętrzni odbiorcy gazu wielkopiecowego.

1. Wstęp

Dodatek paliw zastępczych w wielkim piecu wpływa na zużycie koksu i dmuchu, na ilość i energię chemiczną wytwarzanego gazu wielkopiecowego, na zużycie gazu w nagrzewnicach i ilość gazu dla zewnętrznych odbiorców. Wielkości te, odniesione do jednej tony surówki, noszą nazwę wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego. Służą one do oceny efektów energetycznych wdmuchiwania paliw zastępczych do strefy dysz. Jako paliwa zastępcze najczęściej stosuje się olej opałowy, gaz ziemny i gaz koksowniczy. W pracy przeprowadzono porównanie efektów energetycznych wdmuchiwania wymienionych paliw zastępczych z uwzględnieniem podgrzania paliw gazowych i powietrza do rozpylania oleju.

2. Metoda bilansowa wyznaczania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Zastosowana w pracy metoda wyznaczania wielkopiecowych wskaźników energetycznych jest metodą teoretyczno-doświadczalną, bazującą na informacjach dotyczących "wejścia" i "wyjścia" procesu [4, 7]. W części teoretycznej wykorzystuje się zasady zachowania ilości substancji i energii oraz równanie przepływu ciepła w nagrzewnicach. Część empiryczna dotyczy zbadania wpływu dodatku paliw zastępczych i temperatury dmuchu na stopień wykorzystania CO i H_2 w wielkim piecu i na temperaturę gazu wielkopiecowego.

Układ równań bilansowych substancji i energii dla wielkiego pieca sporządza się przyjmując, że zachowane są stałe warunki wsadowe a dodatek paliwa zastępczego i temperatura dmuchu są jedynymi zmiennymi niezależnymi. Pozostałe wielkości w procesie wynikają ze zmian P i t_d lub mogą być przyjęte jako stałe. W analizie należałoby przyjąć także stałą wydajność procesu. Z uwagi na sposób prowadzenia badań, które wykorzystano do wyznaczenia zależności empirycznych przyjęto, że wzory wyprowadzone w pracy odnoszą się do wydajności maksymalnej, jaką dla danych P i t_d dopuszcza technologia [4].

W równaniach bilansowych, dotyczących wielkiego pieca, założono, że następujące wielkości, odniesione do jednostkowej surówki, nie zależą od zmian dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu:

a) różnica między ilością węgla i siarki w produktach nieenergetycznych a ilością C i S w substratach nieenergetycznych - stała procesu α,
b) różnica między ilością tlenu w produktach nieenergetycznych a ilością tlenu w substratach nieenergetycznych - stała procesu γ,
c) różnica między sumą entalpii produktów nieenergetycznych i strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej a entalpią substratów nieenergetycznych - stała procesu δ.

Wskaźniki energetyczne zużycia koksu, dmuchu, ilości i energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego wyznacza się z równań bilansowych pierwiastków C, S, H, O, N i bilansu energii dla wielkiego pieca. Bilanse sporządza się w odniesieniu do jednej tony surówki, uwzględniając założenia a), b), c).

Bilans węgla i siarki:

$$K\,a_k + P\,a_p = \alpha + G(y + v). \tag{1}$$

Bilans wodoru:

$$K(b_k + e_k) + P(b_p + e_p) + DX_d + \beta = G(u + X_g). \tag{2}$$

Bilans tzw. "wolnego tlenu":

$$0{,}21(D + Pl) + Pf - 0{,}5(K\,b_k + P\,b_p) = \gamma + G\left[0{,}5(y - u) + v\right]. \qquad (3)$$

Bilans azotu:

$$0{,}79(D + P\,l) + P\,g = G(1 - y - v - u). \qquad (4)$$

Bilans energii:

$$K\,W_{dk} + P(W_{dp} + i_p + l\,i_l) + D(i_d + X_d\,i_{xd}) =$$

$$= \delta + G(y\,W_{dy} + u\,W_{du} + y\,i_y + v\,i_v + u\,i_u + n\,i_n + X_g\,i_{xg}) \qquad (5)$$

Stałe procesu α, β, γ i δ wyznacza się odpowiednio z równań (1), (2), (3) i (5) według wyników jednorazowego pomiaru cieplnego badanego procesu wielkopiecowego.

Wprowadza się dwie funkcje empiryczne φ i ψ ujmujące wpływ dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu odpowiednio na stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym i stosunek ilości wodoru w gazie wielkopiecowym do ilości wodoru doprowadzonego do strefy dysz:

$$\varphi = \frac{y}{v}, \qquad (6)$$

$$\psi = \frac{Gu}{K\,b_k + D\,X_d + P(b_p + e_p)}. \qquad (7)$$

Trzecią zależność empiryczną, ujmującą wpływ dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na temperaturę gazu wielkopiecowego, wykorzystuje się do obliczenia entalpii fizycznej składników gazu wielkopiecowego.

Z układu równań (1)÷(7) wyznacza się wskaźniki K, D, G, E:

$$K = \frac{\Theta\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\Omega}{\left[0{,}5(\psi - 1)\,b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\Gamma}, \qquad (8)$$

$$D = \frac{\left[0{,}5(\psi - 1)\,b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Omega - \Theta\Lambda}{\left[0{,}5(\psi - 1)\,b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\Gamma}, \qquad (9)$$

gdzie:

$$\Gamma = W_{dk} - \frac{a_k}{1+\varphi}\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] - \psi b_k(W_{du} + i_u) -$$

$$- \left[(1-\psi)\, b_k + e_k\right] i_{xg},$$

$$\Theta = P\left[\frac{1+0{,}5\varphi}{1+\varphi} a_p - 0{,}21\, l - f - 0{,}5(\psi - 1)\, b_p - 0{,}5\psi e_p\right] +$$

$$+ \gamma - \frac{1+0{,}5\varphi}{1+\varphi}\alpha,$$

$$\Lambda = i_d + X_d\, i_{xd} - \psi X_d(W_{du} + i_u) - 0{,}79\, i_n - (1-\psi)\, X_d\, i_{xg},$$

$$\Omega = P\left\{\frac{a_p}{1+\varphi}\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] + \psi(b_p + e_p)(W_{du} + i_u) +\right.$$

$$\left. + (0{,}79\, l + g)\, i_n + (1-\psi)(b_p + e_p)\, i_{xg} - W_{dp} - i_p - l\, i_l\right\} -$$

$$- \frac{\alpha}{1+\varphi}\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] + \beta i_{xg} + \delta.$$

$$G = K(a_k + \psi b_k) + D(0{,}79 + \psi X_d) + P\left[0{,}79\, l + g + a_p +\right.$$

$$\left. + \psi(b_p + e_p)\right] - \alpha \tag{10}$$

$$E = \frac{\varphi}{1+\varphi}(K\, a_k + P\, a_p - \alpha)\, W_{dy} + \psi\left[K\, b_k + D\, X_d + P(b_p + e_p)\right] W_{du}. \tag{11}$$

Wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców wynika z bilansu gazu wielkopiecowego:

$$E_z = \zeta E - \frac{D(\Delta i_d + X_d\, \Delta i_{xd})}{\eta_N}. \tag{12}$$

gdzie Δi_d oraz Δi_{xd} oznaczają przyrosty właściwej entalpii fizycznej dmuchu suchego i pary wodnej w nagrzewnicach.

Praktyczne zastosowanie wzorów na wskaźniki energetyczne jest uzależnione od znajomości równań empirycznych

$$\varphi = \varphi(P, t_d), \quad \psi = \psi(P, t_d) \quad \text{i} \quad t_g = t_g(P, t_d).$$

3. Pomocnicze równania empiryczne

Każdą z wymienionych zależności empirycznych należy ująć jako jednoparametrową rodzinę powierzchni. Nieznany a priori parametr wyznacza się według wyników jednorazowego pomiaru cieplnego, uwzględniając w ten sposób specyfikę badanego procesu wielkopiecowego. Dla każdego z analizowanych paliw zastępczych wyznaczono oddzielne równania empiryczne. Równania empiryczne opracowano na podstawie materiału doświadczalnego z kilkunastu wielkich pieców [3, 5, 6]. Przyjęta postać równań empirycznych jest wynikiem analizy danych doświadczalnych i posiada uzasadnienie teoretyczne [7]. Przy wyznaczaniu równania rodziny powierzchni, dla każdej serii pomiarowej uwzględniono wagę statystyczną. Funkcje empiryczne φ i t_g dla rozpatrywanych paliw zastępczych mają postać:

olej opałowy

$$\varphi = 0{,}288 \exp(-0{,}0111\, P) + 7{,}22 \exp(-0{,}0049\, t_d) + \varphi_o, \tag{13}$$

$$t_g = (0{,}0028\, t_{go} - 0{,}41)\, P - (0{,}0001\, t_{go} + 0{,}115)\, t_d + t_{go}, \tag{14}$$

gaz ziemny

$$\varphi = 0{,}268 \exp(-0{,}021\, P) + 6{,}14 \exp(-0{,}0045\, t_d) + \varphi_o \tag{15}$$

$$t_g = 0{,}6494\, P - 0{,}1194\, t_d + t_{go} \tag{16}$$

gaz koksowniczy

$$\varphi = 0{,}116 \exp(-0{,}0394\, P) + 5{,}25 \exp(-0{,}0043\, t_d) + \varphi_o \tag{17}$$

$$t_g = 0{,}2987\, P - 0{,}1388\, t_d + t_{go}. \tag{18}$$

Parametry φ_o, t_{go} wyznacza się na podstawie jednorazowego pomiaru badanego wielkiego pieca.

Przy założeniu stanu równowagi chemicznej dla reakcji gazu wodnego wynika, że między funkcjami φ i ψ istnieje korelacja. Współzależność tę potwierdzają wyniki pomiarów składu gazu w strefie rezerwy cieplnej w wielkim piecu. Na podstawie badań przytoczonych w literaturze [1, 2, 7] wyznaczono zależność uogólnioną $\psi = \psi(\varphi)$:

$$\psi = 0{,}127\varphi + \psi_o,$$

gdzie ψ_o wyznacza się z jednorazowego pomiaru wielkiego pieca.

4. Porównanie wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego przy wdmuchiwaniu oleju opałowego, gazu ziemnego i gazu koksowniczego

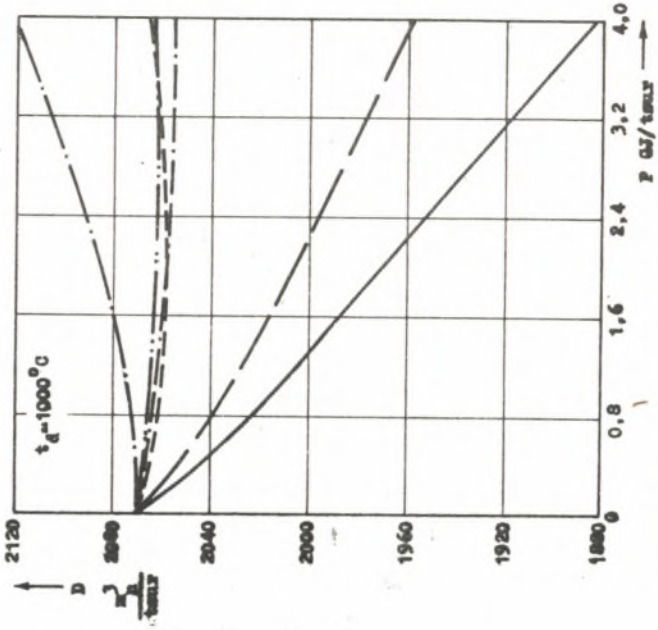
W celu porównania efektów energetycznych wdmuchiwania rozpatrywanych paliw zastępczych przeprowadzono obliczenia dla wielkiego pieca jednej z polskich hut. Piec ma objętość użyteczną około 500 m^3. Temperatura dmuchu wynosiła t_d = 1000°C. W piecu wytwarzano surówkę odlewniczą. Obliczenia przeprowadzono dla następujących przypadków wdmuchiwania paliw zastępczych:

a) olej opałowy rozpylany za pomocą powietrza nie podgrzanego,
b) olej opałowy rozpylany za pomocą powietrza o temperaturze 200°C,
c) gaz ziemny nie podgrzany,
d) gaz ziemny podgrzany do temperatury 700°C,
e) gaz koksowniczy nie podgrzany,
f) gaz koksowniczy podgrzany do temperatury 700°C.

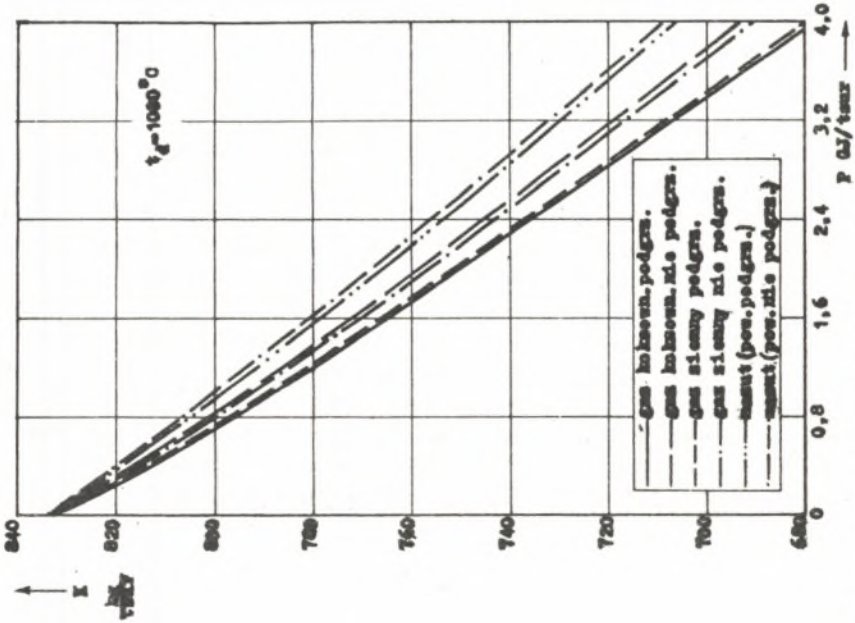
Wyniki obliczeń wskaźników energetycznych przedstawiono na rys. 1÷5.

Wskaźnik K jednostkowego zużycia koksu osiąga najmniejsze wartości przy wdmuchiwaniu podgrzanego gazu koksowniczego i ziemnego. Najmniejszą oszczędność koksu daje wdmuchiwanie oleju opałowego rozpylanego za pomocą powietrza nie podgrzanego. Podgrzanie powietrza do rozpylania oleju wpływa na zmniejszenie zużycia koksu.

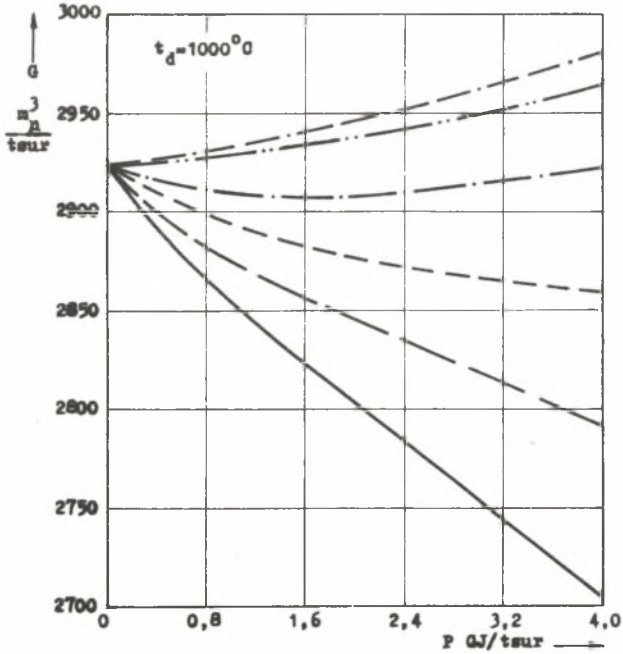
Zmniejszanie się wskaźnika D, jednostkowego zużycia dmuchu, ze wzrostem dodatku gazu koksowniczego jest spowodowane doprowadzaniem tlenu w gazie koksowniczym. Podgrzanie gazowych paliw zastępczych powoduje zmniejszenie zużycia dmuchu. Jest to rezultatem zmniejszenia zużycia koksu jako czynnika energetycznego w wielkim piecu. Zmienność wskaźników G, E i E_z wynika ze zmian zużycie dmuchu i składu gazu wielkopiecowego.



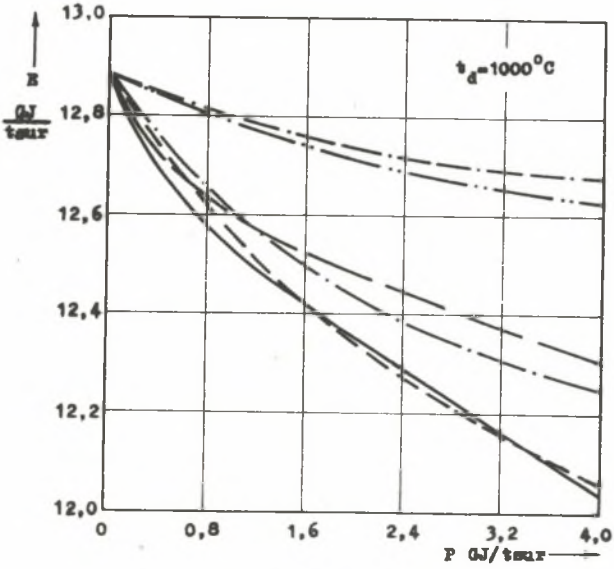
Rys. 2. Wskaźnik zużycia dmuchu



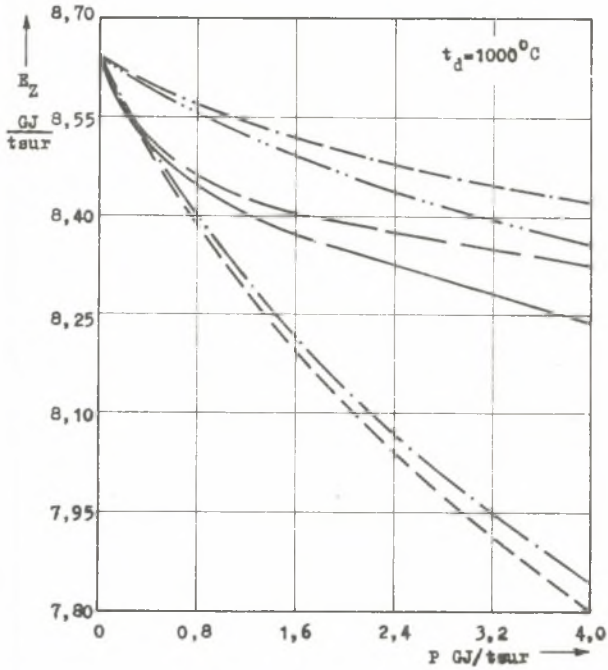
Rys. 1. Wskaźnik zużycia koksu przy zastosowaniu różnych paliw zastępczych



Rys. 3. Wskaźnik produkcji gazu wielkopiecowego



Rys. 4. Wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego



Rys. 5. Wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców

5. Uwagi końcowe

Zastosowana w pracy metoda bilansowa wyznaczania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego pozwala na uniknięcie założeń dotyczących niedostatecznie jeszcze poznanych zjawisk przepływu ciepła i substancji w wielkim piecu. W porównaniu z metodą bezpośrednich pomiarów metoda bilansowa pozwala na wyeliminowanie długotrwałych pomiarów wielkich pieców.

Przeprowadzone porównanie wskaźników energetycznych pozwoliło ocenić efektywność wdmuchiwania rozpatrywanych paliw zastępczych. Wdmuchiwanie gazu koksowniczego i gazu ziemnego przynosi większą oszczędność koksu niż wdmuchiwanie oleju opałowego. Podgrzanie paliw lub powietrza do rozpylania zwiększa efekty energetyczne wdmuchiwania paliw zastępczych i umożliwia wykorzystanie gazu wielkopiecowego do podgrzewania paliw gazowych lub powietrza w podgrzewaczach autonomicznych.

LITERATURA

[1] Babarykin N.N.: Wzaimoswjaz mieżdu stiepieniami ispolzowanija wodoroda i okisi uglieroda w domiennoj pieczi. Stal 1975, nr 8, s. 684.

[2] Bogdandy L., Engell H.: Die Reduktion der Eisenerze.Verlag Stahleisen mbH/Düsseldorf, Springer - Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1967.

[3] Kopeć A.: Analiza wpływu dodatku gazu ziemnego i podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Praca dyplomowa 1976, Instytut Techniki Cieplnej, Politechniki Śląskiej.

[4] Szargut J.: Energetyka cieplna w hutnictwie. Śląsk, Katowice 1971.

[5] Waleczek K.: Ocena efektów energetycznych zastosowania paliw zastępczych w procesie wielkopiecowym, ze szczególnym uwzględnieniem gazu koksowniczego. Praca dyplomowa 1977, Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska.

[6] Ziębik A.: Równania empiryczne ujmujące wpływ dodatku oleju opałowego i podgrzania dmuchu na wykorzystanie CO i H_2 w wielkim piecu oraz na temperaturę gazu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl.1976, z. 54, s. 85.

[7] Ziębik A.: Wpływ dodatku paliw zastępczych i podgrzania dmuchu na gospodarkę cieplną wydziału wielkich pieców. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., 1975, Energetyka z. 55.

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАМЕНИТЕЛЕЙ КОКСА В ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ

Р е з ю м е

В работе проведено сравнение энергетических эффектов, полученных при подаче мазута, природного газа и коксового газа в доменную печь одного из польских металлургических заводов. Для оценки энергетических показателей доменного процесса применён теоретико-эмпирический метод балансов типа "input-output" [7].

A COMPARISON OF THE ENERGETIC EFFECTS OF THE INJECTION OF VARIOUS AUXILIARY FUELS IN A BLAST-FURNACE

S u m m a r y

The paper provides a comparison of the enegetic effects of the injection of fuel oil, natural gas and coke-oven gas into a blast-furnace of a selected Polish ironworks. In order to evaluate the energy characteristics of a blast-furnace process the theoretical - experimental balance method of the type "input - output" was adapted [7].