ENERGETYKA z. 55

ANDRZEJ ZIĘBIK

P. 3349/75

WPŁYW DODATKU PALIW ZASTĘPCZYCH I PODGRZANIA DMUCHU NA GOSPODARKĘ CIEPLNĄ WYDZIAŁU WIELKICH PIECÓW

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY NR 456 – GLIWICE 1975

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 456

P. 3349/75

ANDRZEJ ZIĘBIK

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

WPŁYW DODATKU PALIW ZASTĘPCZYCH I PODGRZANIA DMUCHU NA GOSPODARKĘ CIEPLNĄ WYDZIAŁU WIELKICH PIECÓW

GLIWICE 1975

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Iwo Pollo

REDAKTOR DZIAŁU

Jan Składzień

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 50+170 Ark. wyd 5,6 Ark. druk. 4,9 Papier offsetowy kl. III 70x100, 70 g
Oddano do druku 7. 8. 1975 Podpis. do druku 20.9 1975 Druk ukończ. w listopadzie 1975
Zam. 1364 75 Cena zł 9,—

Fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Ф-1273/75

SPIS TREŚCI

Str.

Podstawowe oznaczenia i indeksy 5

1. Wstęp i cel pracy 7
2. Opis metody przewidywania wskaźników energetycznych 9
3. Całkowe wskaźniki energetyczne 13
4. Różniczkowe wskaźniki energetyczne 18
   4.1. Zastosowanie różniczkowej postaci bilansów substancji i energii 18
   4.2. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy t_d=idem . 23
   4.3. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy P=idem .. 25
5. Pomocnicze równania empiryczne 27
6. Przykład obliczeniowy 32
7. Wpływ błędów pomiarów i niedokładności równań empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych 49
8. Porównanie obliczonych całkowych wskaźników energetycznych z wynikami doświadczeń 53
9. Uwagi i wnioski końcowe 60
10. Dodatek. Sprawdzenie poprawności założeń metody przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego 62

Literatura 68

Streszczenia 72

PODSTAWOWE OZNACZENIA I INDEKSY

Oznaczenia:

A - powierzchnia ogrzewalna nagrzewnic, m^2,
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.,
c_p - rzeczywista pojemność cieplna właściwa przy stałym ciśnieniu kJ/(m_n^3K),
D - całkowy wskaźnik zużycia suchego dmuchu, m_n^3/t sur.,
E - całkowy wskaźnik energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego, GJ/t sur.,
E_N - całkowy wskaźnik zużycia energii chemicznej gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach, GJ/t sur.,
E_z - całkowy wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców, GJ/t sur.,
e - ilość wilgoci w koksie i paliwie zastępczym, m_n^3/jedn.,
G - całkowy wskaźnik produkcji suchego gazu wielkopiecowego, m_n^3/t sur.,
i - entalpia fizyczna właściwa (obliczana od temperatury otoczenia), kJ/m_n^3 lub kJ/kg,
K - całkowy wskaźnik zużycia koksu, kg/t sur.,
k - współczynnik przenikania ciepła w nagrzewnicach, W/m^2 K,
l - jednostkowe zużycie powietrza sprężonego do rozpylania oleju, m_n^3/kg,
m - średni błąd bezwzględny,
n - udział molowy azotu w suchym gazie wielkopiecowym,
P - jednostkowe zużycie paliwa zastępczego, kg/t sur. lub m_n^3/t sur.,
$\dot{S}$ - strumień surówki, kg/s,
t - temperatura, ^oC,
u - udział molowy wodoru w suchym gazie wielkopiecowym,
V_s - ilość spalin uzyskana z jednostki gazu wielkopiecowego, m_n^3/m_n^3,
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,
Z - stosunek zastępowania energii chemicznej koksu energią chemiczną paliwa zastępczego,
α - różnica pomiędzy ilością węgla i siarki w produktach nieenergetycznych a ilością C i S w substratach nieenergetycznych, m_n^3/t sur.,
β - wilgoć wsadu (bez wilgoci koksu), m_n^3/t sur.,

γ - różnica między ilością tlenu w produktach nieenergetycznych a ilością tlenu w substratach nieenergetycznych, m_n^3/t sur.,

δ - różnica pomiędzy sumą entalpii produktów nieenergetycznych i strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej a entalpią substratów nieenergetycznych, kJ/t sur.,

ε_{ot} - względna strata ciepła z nagrzewnic do otoczenia uwzględniająca bezpośrednie straty ciepła i straty dmuchu przy rewersji,

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

η_N - sprawność termiczna nagrzewnic dmuchu,

λ - stosunek nadmiaru powietrza,

μ - różniczkowy mnożnik oszczędności energii chemicznej koksu,

ω - różniczkowy wskaźnik energetyczny.

Indeksy:

1 - dla wielkości wyznaczonych w czasie jednorazowego pomiaru,
d - dmuch,
dp - dmuch przy dopływie do nagrzewnic,
e - energia chemiczna wytwarzanego gazu wielkopiecowego,
g - gaz wielkopiecowy,
go - oczyszczony gaz wielkopiecowy,
k - koks,
l - powietrza sprężone do rozpylania oleju,
N - nagrzewnice dmuchu,
n - azot,
o - tlen,
p - paliwo zastępcze,
s - spaliny wylotowe z nagrzewnic,
sp - spaliny przy dopływie do powierzchni grzejnej nagrzewnic,
t - temperatura,
u - wodór,
v - dwutlenek węgla,
x - para wodna,
y - tlenek węgla,
z - zewnętrzni odbiorcy gazu wielkopiecowego,
η - sprawność termiczna nagrzewnic.

1. WSTĘP I CEL PRACY

Większość zagadnień gospodarki cieplnej wydziału wielkich pieców wynika z dążenia do zmniejszenia zużycia koksu. Energia chemiczna koksu stanowi bowiem przeważającą pozycję w bilansie energetycznym zespołu wielkopiecowego.

Koks spełnia w wielkim piecu trzy funkcje:

a) energetyczną - utrzymuje wymaganą temperaturę w procesie,
b) chemiczną - uczestniczy w reakcjach redukcji,
c) fizyczną - podtrzymuje wsad i umożliwia pożądany przepływ gazu.

Zmniejszenie zużycia koksu można uzyskać przez:

a) odpowiednie przygotowanie wsadu (sortowanie rud, zwiększenie udziału spieku lub grudek we wsadzie),
b) podwyższenie temperatury dmuchu,
c) zastosowanie dodatku paliw zastępczych (olej opałowy, smoła, gaz ziemny, gaz koksowniczy, mieszanina oleju z węglem),
d) wdmuchiwanie do szybu tzw. reformowanego gazu redukcyjnego,
e) wzbogacenie dmuchu w tlen,
f) podwyższenie ciśnienia dmuchu.

Trzecia w kolejności funkcja koksu narzuca granicę w dążeniach do zmniejszania jego zużycia. Granica ta nie została dotąd wyznaczona [4,24].

Pracę niniejszą poświęcono analizie efektów energetycznych uzyskanych przez zastosowanie paliw zastępczych i podwyższenie temperatury dmuchu w wielkim piecu. Środki te bardzo często stosuje się równocześnie. Dodatek paliw zastępczych umożliwia bowiem zastosowanie wyższej temperatury dmuchu. W niektórych przypadkach może wystąpić ograniczenie temperatury dmuchu wynikające z konstrukcji nagrzewnic. Zawsze jednak można podwyższyć temperaturę dmuchu co najmniej o wartość rezerwy, jaką utrzymuje się dla umożliwienia regulacji cieplnej procesu wielkopiecowego. Ten sam bowiem efekt regulacyjny można osiągnąć przez zmianę ilości wdmuchiwanego paliwa zastępczego.

Koks nie jest jedynym nośnikiem energii, którego zużycie zmienia się na skutek dodatku paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu. Zmianie ulegają także: zużycie dmuchu, ilość i skład wytwarzanego gazu wielkopiecowego, zużycie gazu w nagrzewnicach oraz ilość gazu wielkopiecowego pozostającego do dyspozycji zewnętrznych odbiorców (takich jak baterie koksownicze, piece grzejne, kotłownia). Są to zresztą tylko zmiany

bezpośrednie. W wyniku wzajemnych powiązań międzygałęziowych w hucie powstają w dalszej kolejności zmiany w produkcji pary, energii elektrycznej wody przemysłowej, powietrza sprężonego oraz w zużyciu węgla kamiennego, gazów palnych i wody pitnej [48, 58, 60].

Zużycie koksu i dmuchu, ilość i energia chemiczna wytwarzanego gazu wielkopiecowego, energia chemiczna gazu spalanego w nagrzewnicach i gazu pozostającego do dyspozycji zewnętrznych odbiorców, odniesione do jednostki surówki, noszą nazwę całkowych wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego. Dla oceny efektów energetycznych podwyższenia temperatury dmuchu stosuje się w praktyce wielkopiecowej różniczkowe (lokalne) wskaźniki energetyczne [45]. Wyrażają one tempo (dynamikę) zmian wskaźników całkowych. W przypadku dwóch zmiennych parametrów (temperatura dmuchu i dodatek paliwa zastępczego) wprowadzono w tej pracy różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne, zdefiniowane następująco:

$$\omega_{Yt} \overset{df}{=} -\frac{1}{Y}\left(\frac{\partial Y}{\partial t_d}\right)_P, \tag{1}$$

$$\omega_{Yp} \overset{df}{=} -\frac{1}{Y}\left(\frac{\partial Y}{\partial P}\right)_{t_d}, \tag{2}$$

gdzie Y oznacza wybrany całkowy wskaźnik energetyczny.

W pracy niniejszej postawiono sobie następujące cele:

a) opracowanie na drodze teoretyczno-doświadczalnej modelu matematycznego umożliwiającego przewidywanie wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego w warunkach wdmuchiwania paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu; część teoretyczna pozostaje słuszna dla każdego z paliw zastępczych, natomiast część empiryczna dotyczy oleju opałowego,
b) analiza wrażliwości wyprowadzonych wzorów na błędy pomiarowe popełnione w części doświadczalnej,
c) sprawdzenie przydatności opracowanych wzorów przez porównanie obliczonych wskaźników z wynikami doświadczeń.

W latach 1965-67 autor niniejszej pracy współpracował z profesorem Szargutem nad zagadnieniem wpływu podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego [46, 47, 56, 57]. W roku 1970, w związku z wdrożeniem wdmuchiwania oleju do wielkich pieców Huty "Pokój", Pan profesor Szargut zaproponował autorowi podjęcie przedstawionego w pracy tematu. Za wieloletnią opiekę naukową składam Panu profesorowi Szargutowi bardzo gorące podziękowania.

Składam również podziękowanie Dyrekcji Huty "Pokój", w szczególności zaś Głównemu Energetykowi dr inż. J. Michnie i Głównemu Technologowi mgr inż. S. Krasowskiemu za udostępnienie wyników pomiarów i finansowanie większości obliczeń na elektronicznej maszynie cyfrowej.

2. OPIS METODY PRZEWIDYWANIA WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH

Zastosowana w pracy metoda przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego w warunkach wdmuchiwania paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu bazuje na informacjach dotyczących "wejścia" i "wyjścia" procesu. Jest to metoda teoretyczno-doświadczalna. Ujęcie wyłącznie teoretyczne jest przy dzisiejszym stanie wiedzy niemożliwe ze względu na złożoność zjawisk przepływu ciepła i substancji w wielkim piecu [4]. Badania wyłącznie eksperymentalne należałoby prowadzić zmieniając jedynie ilość paliwa zastępczego lub temperaturę dmuchu a zachowując na stałym poziomie pozostałe parametry procesu wielkopiecowego. Jest to trudne do zrealizowania. Poza tym zakres zastosowania wyników badań doświadczalnych ogranicza się w zasadzie do przebadanego wielkiego pieca.

Podstawę części teoretycznej zastosowanej metody stanowią zasady zachowania ilości substancji i energii oraz prawa rządzące przepływem ciepła w nagrzewnicach. Dla wielkiego pieca sporządza się bilanse pierwiastków C, S, H, O i N. Część empiryczna dotyczy zbadania wpływu dodatku paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu na stopień wykorzystania CO i H_2 w wielkim piecu oraz na temperaturę gazu wielkopiecowego i stopień zawilżenia dmuchu. Każda z zależności empirycznych opracowanych na podstawie materiału doświadczalnego powinna zawierać jeden nieznany a priori parametr uwzględniający specyfikę badanego procesu wielkopiecowego.Do części doświadczalnej należy również jednorazowy pomiar cieplny badanego procesu wielkopiecowego. Wyniki jednorazowego pomiaru służą do wyznaczenia stałych procesu występujących w równaniach bilansowych oraz do określania nieznanych parametrów w równaniach empirycznych.

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 w procesie wielkopiecowym. Pozostałe parametry procesu wynikają ze zmian P i t_d lub też tworzą kompleksy (stałe procesu), które można przyjąć jako niezależne od zmian dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu.

W celu przeanalizowania wpływu dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne należałoby założyć także stałą wydajność procesu lub równocześnie rozpatrywać wpływ wydajności. Badania, których wyniki wykorzystano do opracowania równań empirycznych były prowa-

dzone przy założeniu ustabilizowanych warunków wsadowych i przy zmiennej wydajności. Zwykle jednak wydajność nie była zmieniana niezależnie od zmian parametrów P i t_d, lecz była utrzymywana na dopuszczalnej górnej granicy dla danych parametrów P i t_d. W związku z tym nie da się oddzielić w przewidywaniu wskaźników energetycznych wpływu zmiennej wydajności od wpływu dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu. Należy zatem przyjąć, że wzory wyprowadzone w pracy odnoszą się do wydajności maksymalnej, jaką dla danych P i t_d dopuszcza technologia [45].

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

a) różnica pomiędzy ilością węgla i siarki w produktach nieenergetycznych a ilością C i S w substratach nieenergetycznych - stała procesu α,
b) wilgoć wsadu (bez wilgoci koksu) - stała procesu β,
c) różnica pomiędzy ilością tlenu w produktach nieenergetycznych a ilością tlenu w substratach nieenergetycznych - stała procesu γ,
d) różnica pomiędzy sumą entalpii produktów nieenergetycznych i strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej a entalpią substratów nieenergetycznych - stała procesu δ.

Równania bilansowe zamieszczone w pracy przystosowano do oleju opałowego i gazu ziemnego, dwóch paliw zastępczych używanych w polskich hutach żelaza. Założono przy tym, że w skład koksu i paliwa zastępczego wchodzą C, S, H i H_2O, a gaz wielkopiecowy zawiera CO, CO_2, H_2, N_2 i H_2O. Można również pominąć wilgoć wnoszoną przez powietrze do rozpylania oleju.

Poprawność przyjętych założeń a), b), c), d) oraz uproszczeń poczynionych w składzie koksu, paliwa zastępczego i gazu wielkopiecowego sprawdzono za pomocą analizy statystycznej (Dodatek). Wynik analizy należy uznać za zadowalający. Stwierdzono bowiem, że z prawdopodobieństwem większym od 0,9 odchylenia stałych procesu od wartości średnich są mniejsze od średnich błędów bezwzględnych wyznaczenia stałych procesu.

Metoda bilansów substancji i energii, wykorzystująca pomocnicze zależności empiryczne oraz wyniki jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca, została po raz pierwszy zastosowana w pracach [46, 47, 49, 56] do badania wpływu podwyższenia temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego, przy czym praca [46] dotyczy wskaźników całkowych. W niniejszej pracy zastosowano tę metodę do badania wpływu dwóch zmiennych w procesie: dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu wprowadzając pojęcie wskaźników różniczkowych cząstkowych. W porównaniu z pracą [46] wyeliminowano hipotetyczny poziom odniesienia dotyczący przypadku bez podgrzewania dmuchu. W ten sposób przy wyznaczaniu wskaźników całkowych uniknięto błędów spowodowanych ekstrapolacją równań empirycznych daleko poza zakres danych pomiarowych. Uwzględniono również zmienność sprawności termicznej nagrzewnic ze zmianą analizowanych parametrów P i t_d. Przeprowadzono analizę statystyczną podstawowych założeń metody bilanso-

wej. Zasadniczą część niniejszej pracy stanowi opracowanie metody analitycznej wyznaczania różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych, co pozwala uniknąć przybliżonych rozwiązań numerycznych [47]. Część teoretyczna pracy jest opracowana dla przypadku wdmuchiwania oleju opałowego i gazu ziemnego. Podane równania teoretyczne można jednak bez trudności przystosować do pozostałych paliw zastępczych uwzględniając zawarty w nich tlen i azot. Część empiryczna pracy, wymagająca żmudnych obliczeń, została podana dla oleju opałowego. Stąd przykład obliczeniowy i porównanie wyników obliczeń z badaniami eksperymentalnymi dotyczą również oleju opałowego.

Spotykane w literaturze prace z tej dziedziny dzielą się na dwie grupy. Większość z nich należy do grupy badań eksperymentalnych. Spis literatury w niniejszej pracy nie ujmuje wszystkich prac doświadczalnych z badanej dziedziny. Zamieszczono jedynie te, które były prowadzone w szerokim zakresie zmian temperatury dmuchu i dodatku paliwa zastępczego (oleju opałowego). Są one cytowane w odpowiednich częściach niniejszej pracy. Z reguły prace te dotyczą zmian tylko temperatury lub dodatku paliwa zastępczego, rzadziej obu parametrów. Wyniki obcych badań doświadczalnych wykorzystano w niniejszej pracy przede wszystkim do wyznaczenia pomocniczych równań empirycznych, do sprawdzenia poprawności założeń metody bilansowej i do porównania wyników obliczeń z eksperymentem. Cytowane prace doświadczalne nie obejmowały pomiarów nagrzewnic wielkopiecowych. Również w wielu z nich nie podano kompletu danych dla określenia wszystkich wskaźników energetycznych wielkiego pieca. Głównym bowiem celem autorów tych prac było badanie tylko całkowego wskaźnika zużycia koksu. Jak już podkreślono zastosowanie wyników badań eksperymentalnych jest w zasadzie ograniczone do przebadanego wielkiego pieca.

Drugą grupę prac badawczych z omawianej dziedziny stanowią badania teoretyczne lub teoretyczno-doświadczalne [4, 5, 11, 12, 24, 28, 29, 35, 41 51, 54]. Większość z tych prac jest poświęcona badaniom wpływu dodatku paliw zastępczych, a przedmiotem rozważań jest z reguły tylko całkowy wskaźnik zużycia koksu. W porównaniu z badaniami innych autorów praca niniejsza nie tylko różni się zakresem rozważań, lecz także metodyką i przyjętymi założeniami. Zastosowana metoda bilansowa typu "input-output" bazuje na informacjach i założeniach dotyczących wejścia i wyjścia procesu. Wykorzystuje się zasadę zachowania ilości substancji i pierwszą zasadę termodynamiki w odniesieniu do całego procesu. Wpływ dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na złożone procesy wymiany ciepła i substancji w wielkim piecu ocenia się przez badanie doświadczalne składu i temperatury gazu wielkopiecowego. Wpływy badanych parametrów na skład i entalpię produktów nieenergetycznych procesu wielkopiecowego a także na straty ciepła do otoczenia i wody chłodzącej, jak wykazała analiza statystyczna, kompensują się wzajemnie w równaniach bilansowych. W odróżnieniu od tej metody autorzy cytowanych prac bazują w mniejszym lub większym stop-

niu na założeniach dotyczących niedostatecznie poznanych procesów zachodzących wewnątrz wielkiego pieca. Przy rozpatrywaniu wpływu samej temperatury dmuchu bazuje się na założeniu autonomiczności cieplnej dolnej strefy pieca. Jak podkreśla Kitajew [24] przy temperaturach dmuchu wynoszących około 1000°C i wyżej założenie to nie jest już spełnione. Podobnie przy analizie wpływu dodatku paliw zastępczych stosowane powszechnie założenie o konieczności zachowania na stałym poziomie temperatury adiabatycznej w strefie dysz nie znalazło potwierdzenia w praktyce [23, 24, 41] Poza tym w pracach tych przeważnie nie uwzględnia się wpływu dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na wykorzystanie CO i H_2. Jak wskazują wyniki badań doświadczalnych wpływ ten nie powinien być pomijany.

Opracowanie metody teoretycznej pozwalającej na dokładne przewidywanie wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego w warunkach wdmuchiwania paliw zastępczych i podwyższania temperatury dmuchu, jak podkreśla Bogdandy [4], jest w obecnej chwili niemożliwe. Możliwe są natomiast metody oparte o znane prawa termodynamiki i wykorzystujące dodatkowe informacje z doświadczeń [4, 13, 37]. Część doświadczalna, ze względu na błędy pomiarowe, winna być ograniczona do niezbędnego minimum. Kryteria te spełnia zastosowana w niniejszej pracy metoda bilansowa "input-output" przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego.

3. CAŁKOWE WSKAŹNIKI ENERGETYCZNE

Całkowe 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), d).

Bilans węgla i siarki:

$$Ka_k + Pa_p = \alpha + G(y + v). \tag{3}$$

Bilans wodoru:

$$K(b_k + e_k) + P(b_p + e_p) + DX_d + \beta = G(u + X_g). \tag{4}$$

Bilans tzw. "wolnego tlenu":

$$0{,}21(D + Pl) - 0{,}5(Kb_k + Pb_p) = \gamma + G\left[0{,}5(y - u) + v\right]. \tag{5}$$

Bilans azotu:

$$0{,}79(D + Pl) = G(1 - y - v - u). \tag{6}$$

Bilans energii:

$$KW_{dk} + P(W_{dp} + i_p + li_l) + D(i_d + X_d i_{xd}) = \delta + G(W_{dg} + i_g + X_g i_{xg}), \tag{7}$$

gdzie:

$W_{dg} = y\,W_{dy} + u\,W_{du}$,

$i_g = y\,i_y + v\,i_v + u\,i_u + n\,i_n$.

Stałe procesu α, β, γ i δ wyznacza się odpowiednio z równań (3), (4), (5) i (7) podług 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:

$$\varphi = \frac{V}{v} \quad , \tag{8}$$

$$\psi = \frac{Gu}{Kb_k + DX_d + P(b_p + e_p)}. \tag{9}$$

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 (3)÷(9) wyznacza się całkowe wskaźniki energetyczne K, D, G oraz skład gazu wielkopiecowego:

$$K = \frac{\Theta\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\,\Omega}{\left[0{,}5(\psi - 1)b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\,\Gamma}, \tag{10}$$

$$D = \frac{\left[0{,}5(\psi - 1)b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Omega - \Theta\Gamma}{\left[0{,}5(\psi - 1)b_k - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_k\right]\Lambda - (0{,}21 + 0{,}5\psi X_d)\,\Gamma}, \tag{11}$$

gdzie:

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

$$\Theta = P\left[\frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,a_p - 0{,}211 - 0{,}5(\psi - 1)b_p - 0{,}5\psi e_p\right] + \gamma - \frac{1 + 0{,}5\varphi}{1 + \varphi}\,\alpha,$$

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

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

$$\left. + 0{,}791\,i_n + (1 - \psi)(b_p + e_p)i_{xg} - W_{dp} - i_p - li_l\right\} -$$

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

Wskaźnik całkowy produkcji gazu wielkopiecowego i udziały poszczególnych składników gazu ujmują równania, do których dla skrócenia zapisu wprowadzono wielkości K i D:

$$G = K(a_k + \psi b_k) + D(0{,}79 + \psi X_d) + P\left[0{,}791 + a_p + \psi(b_p + e_p)\right] - \alpha, \quad (12)$$

$$v = \frac{Ka_k + Pa_p - \alpha}{G(1 + \varphi)}, \quad (13)$$

$$y = \varphi \frac{Ka_k + Pa_p - \alpha}{G(1 + \varphi)}, \quad (14)$$

$$u = \frac{\psi}{G}\left[Kb_k + DX_d + P(b_p + e_p)\right], \quad (15)$$

$$n = 1 - y - v - u, \quad (16)$$

$$X_g = \frac{1}{G}\left\{K\left[(1 - \psi)b_k + b_p\right] + (1 - \psi)DX_d + (1 - \psi)(e_k + e_p)P + \beta\right\}. \quad (17)$$

Całkowy wskaźnik energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego:

$$E = G(yW_{dy} + uW_{du}). \quad (18)$$

Stosunek zastępowania energii chemicznej koksu energią chemiczną paliwa zastępczego oblicza się podług wzoru:

$$z = \frac{(K_o - K)W_{dk}}{P\,W_{dp}}, \quad (19)$$

gdzie:

K_o – oznacza całkowy wskaźnik zużycia koksu w procesie bez dodatku paliwa zastępczego.

Dla praktycznego zastosowania wyprowadzonych wzorów konieczna jest znajomość zależności empirycznych $\varphi(P, t_d)$, $\psi(P, t_d)$, $t_g(P, t_d)$ i $X_d(P, t_d)$.

Stałym odbiorem własnym gazu wielkopiecowego są nagrzewnice dmuchu wielkopiecowego. Pozostała ilość gazu wielkopiecowego jest zużywana do zasilania baterii koksowniczych, pieców grzewczych i kotłowni. Kotłownia jest zazwyczaj odbiornikiem buforowym.

Całkowy wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców wynika z bilansu gazu wielkopiecowego:

$$E_z = \Sigma E - E_N = \Sigma E - \frac{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}{\eta_N}, \quad (20)$$

gdzie:

$\Delta i_d, \Delta i_{xd}$ - oznaczają przyrosty właściwej entalpii fizycznej dmuchu suchego i pary wodnej w nagrzewnicach.

Sprawność termiczna nagrzewnic η_N powinna być wyznaczona dla zadanych P i t_d według modelu matematycznego przepływu ciepła w nagrzewnicy wielkopiecowej [19]. Przy niedużych zmianach temperatury dmuchu (do 100 K) i pełnym zakresie praktycznej zmienności dodatku paliwa zastępczego można z dostateczną dla praktyki przemysłowej dokładnością wyznaczyć zależność uproszczoną $\eta_N(P, t_d)$ zakładając, że następujące wielkości nie zależą od dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu:

e) stosunek współczynnika przenikania ciepła w nagrzewnicach do strumienia surówki - $k/\dot{S}$,

f) względna strata ciepła z nagrzewnic do otoczenia f_{ot}, która uwzględnia bezpośrednie straty ciepła oraz straty gorącego dmuchu przy rewersji.

Za przyjęciem założenia e) przemawia fakt, że kierunek zmian k i $\dot{S}$ pod wpływem dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu jest w zasadzie jednakowy. Powoduje to, że stosunek $k/\dot{S}$ w przypadku zmian temperatury dmuchu do 100 K i zmian dodatku paliwa zastępczego w stosowanych w praktyce granicach utrzymuje się na względnie stałym poziomie (ocenione w Dodatku odchylenie nie przekracza 5%). Założenie f) nie ma istotniejszego wpływu na dokładność przewidywania wskaźników. Analizę założeń e) i f) oraz analizę ich wpływu na dokładność obliczeń wskaźników przeprowadzono w Dodatku.

Na podstawie założenia e) wyznacza się temperaturę spalin wylotowych z nagrzewnic. W tym celu zapisuje się równanie przepływu ciepła dla nagrzewnic traktowanych jako wymiennik przeponowy przeciwprądowy odpowiednio dla zadanych P i t_d oraz dla wyników jednorazowego pomiaru cieplnego nagrzewnic:

$$\dot{S}D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd}) = Ak\Delta t_m, \tag{21}$$

$$\dot{S}_1 D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1} \Delta i_{xd1}) = Ak_1 \Delta t_{m1}, \tag{22}$$

gdzie:

Δt_m - oznacza średnią logarytmiczną różnicę temperatur.

Z równań (21) i (22) otrzymuje się:

$$t_{sp} - t_d - t_s + t_{dp} - \Delta t_{m1} \frac{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}{D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1} \Delta i_{xd1})} \cdot \ln \frac{t_{sp} - t_d}{t_s - t_{dp}} = 0. \tag{23}$$

Temperaturę t_{sp} spalin przy dopływie do powierzchni ogrzewalnych nagrzewnic oblicza się dla zadanych P i t_d z bilansu energii szybu spala-

nia przyjmując, że straty ciepła do otoczenia z szybu spalania stanowią 1% energii chemicznej spalanego gazu wielkopiecowego:

$$0{,}99\ W_{dg} = V_s\ i_{sp}. \tag{24}$$

Uproszczoną zależność $\eta_N = \eta_N(P, t_d)$, po uwzględnieniu założeń e) i f) wyznacza się z bilansu energii nagrzewnic:

$$\eta_N = 1 - \xi_{ot} - \frac{V_s\ i_s}{W_{dg}}. \tag{25}$$

4. RÓŻNICZKOWE WSKAŹNIKI ENERGETYCZNE

4.1. Zastosowanie różniczkowej postaci bilansów substancji i energii

Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne można obliczać według wzorów (1) i (2) znajdując pochodne cząstkowe wskaźników całkowych na drodze analitycznej lub numerycznej. Metoda analityczna poszukiwania pochodnych jest niedogodna ze względu na złożoność wzorów ujmujących wskaźniki całkowe. Metoda numeryczna zastosowana w [47] daje wyniki przybliżone. W niniejszej pracy zastosowano metodę analityczną wyznaczania wskaźników różniczkowych wychodząc z różniczkowej postaci równań bilansów substancji i energii.

Bilans węgla i siarki:

$$a_k\, dk + a_p\, dP = d\left[G(y + v)\right]. \tag{26}$$

Uwzględniając, że wielkości K, G, y, v są funkcjami zmiennych P i t_d oraz wykorzystując równania (1), (2) i (8) otrzymuje się:

$$Ka_k(\omega_{kp}\, dP + \omega_{kt}\, dt_d) - a_p\, dP =$$

$$= Gv\left\{(1 + \varphi)\left[(\omega_{gp} + \omega_{vp})dP + (\omega_{gt} + \omega_{vt})dt_d\right] -\right.$$

$$\left. - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial P}\right)_{t_d} dP - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right\}. \tag{27}$$

Bilans wodoru:

$$(b_k + e_k)dK + (b_p + e_p)dP + d(DX_d) = d\left[G(u + X_g)\right]. \tag{28}$$

Po wykorzystaniu równań (1), (2), (8) i (9) uzyskuje się:

$$K\left[(1 - \psi)b_k + e_k\right](\omega_{kp}\, dP + \omega_{kt}\, dt_d) - (1 - \psi)(b_p + e_p)dP +$$

$$+ DX_d(1 - \psi)(\omega_{dp}\, dP + \omega_{dt}\, dt_d) - D(1 - \psi)\,.$$

$$\cdot\left[\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] = GX_g\left[(\omega_{gp} + \omega_{xp})dP +\right.$$

$$\left. + (\omega_{gt} + \omega_{xt})dt_d\right] - \frac{Gu}{\psi}\left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right]. \qquad (29)$$

Bilans wolnego tlenu:

$$0{,}21(dD + 1\,dP) - 0{,}5(b_k\,dK + b_p\,dP) = d\left\{G\left[0{,}5(y - u) + v\right]\right\}. \qquad (30)$$

Po wprowadzeniu równań (1), (2), (8) i (9) równanie (30) przyjmuje postać:

$$D(0{,}42 + \psi X_d)(\omega_{dp}\,dP + \omega_{dt}\,dt_d) - Kb_k(1 - \psi)(\omega_{kp}\,dP + \omega_{kt}\,dt_d) +$$

$$+ \left[(1 - \psi)b_p - \psi e_p - 0{,}42\ 1\right]dP - \psi D\left[\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] =$$

$$= Gv\left\{(2 + \varphi)\left[(\omega_{gp} + \omega_{vp})dP + (\omega_{gt} + \omega_{vt})dt_d\right] -\right.$$

$$\left. - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial P}\right)_{t_d} dP - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right\} + \frac{Gu}{\psi}\left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right]. \qquad (31)$$

Bilans azotu:

$$0{,}79(dD + 1\,dP) = d\left[G(1 - y - v - u)\right]. \qquad (32)$$

Po zastosowaniu równań (1), (2), (8) i (9) otrzymuje się:

$$K\psi b_k(\omega_{kp}\,dP + \omega_{kt}\,dt_d) + D(0{,}79 + \psi X_d)(\omega_{dp}\,dP + \omega_{dt}\,dt_d) -$$

$$- \left[0{,}79\ 1 + \psi(b_p + e_p)\right]dP - \psi D\left[\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] =$$

$$= G\left\{\omega_{gp}\,dP + \omega_{gt}\,dt_d - v(1 + \varphi)\left[(\omega_{gp} + \omega_{vp})dP + (\omega_{gt} + \omega_{vt})dt_d\right]\right\} +$$

$$+ Gv\left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] + \frac{Gu}{\psi}\left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right]. \qquad (33)$$

Bilans energii:

$$W_{dk}\,dK + (W_{dp} + i_p + li_1)dP + d\left[D(i_d + X_d i_{xd})\right] = d\left[G(W_{dg} + i_g + X_g i_{xg})\right]. \qquad (34)$$

Wprowadzając do (34) równania bilansu substancji i wykorzystując równania (1), (2) uzyskuje się:

$$A(\omega_{kp}\,dP + \omega_{kt}\,dt_d) + B(\omega_{dp}\,dP + \omega_{dt}\,dt_d) -$$

$$-D(c_{pd} + X_d\,c_{pxd})dt_d + C\,dP + F\left[\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] =$$

$$= -H\left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] - Gv(W_{dy} + i_y)\left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial P}\right)_{t_d} dP +\right.$$

$$\left. + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right] - J\left[\left(\frac{\partial t_g}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial t_g}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right], \qquad (35)$$

gdzie:

$$A = K\Big\{W_{dk} + \left[(1-\psi)b_k + a_k\right]\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] -$$
$$- \psi b_k(W_{du} + i_u) - \left[(1-\psi)b_k + e_k\right]i_{xg}\Big\},$$

$$B = D\Big\{i_d + X_d\left[i_{xd} - (1-\psi)i_{xg} - \psi(W_{du} + i_u)\right] -$$
$$- (0{,}42 + \psi X_d)\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] - 0{,}79\,i_n\Big\},$$

$$C = \left[0{,}42\,l - a_p - (1-\psi)b_p + \psi e_p\right]\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] +$$
$$+ 0{,}79\,li_n - W_{dp} - i_p - li_l + (b_p + e_p)\left[\psi(W_{du} + i_u) + (1-\psi)i_{xg}\right],$$

$$F = D\Big\{\psi\left[W_{du} + i_u + \varphi(W_{dy} + i_y) + i_v\right] + (1-\psi)i_{xg} - i_{xd}\Big\},$$

$$H = \frac{Gu}{\psi}\left[\varphi(W_{dy} + i_y) + i_v + W_{du} + i_u - i_{xg}\right],$$

$$J = G\left[y(c_{py} - c_{pn}) + v(c_{pv} - c_{pn}) + u(c_{pu} - c_{pn}) + c_{pn} + X_g\,c_{pxg}\right].$$

Układ równań (27), (29), (31), (33) i (35) zastosowany kolejno dla rozpatrywanych dalej dwóch przypadków t_d = idem oraz P = idem stanowi podstawę do wyznaczenia różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego ω_{kp}, ω_{kt}, ω_{dp}, ω_{dt}, ω_{gp} i ω_{gt}. Występujące w tych równaniach jako niewiadome wskaźniki ω_{vp}, ω_{vt}, ω_{xp} i ω_{xt} odgrywają pomocniczą rolę. Wskaźniki ω_{vp} i ω_{vt} służą do wyznaczenia różniczkowych cząstkowych wskaźników ω_{ep} i ω_{et} energii chemicznej wytwarzanego gazu

wielkopiecowego. Wskaźników ω_{xp} i ω_{xt} nie wyznacza się, a równanie bilansu wodoru, w którym one występują, wykorzystuje się do przekształcenia równania bilansu energii.

Różniczkowe cząstkowe wskaźniki ω_{zp} i ω_{zt} energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców wyznacza się wychodząc z różniczkowej postaci równania (20) ujmującego bilans energii chemicznej gazu wielkopiecowego:

$$dE_z = \Im dE - d\left[\frac{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}{\eta_N}\right]. \tag{36}$$

Po uwzględnieniu równań (1) i (2) otrzymuje się:

$$E_z(\omega_{zp}\, dP + \omega_{zt}\, dt_d) = \Im E(\omega_{ep}\, dP + \omega_{et}\, dt_d) +$$

$$+ (\Im E - E_z)\left[(\omega_{\eta p} - \omega_{Np})dP + (\omega_{\eta t} - \omega_{Nt})dt_d\right], \tag{37}$$

gdzie:

ω_{Np} i ω_{Nt} - oznaczają różniczkowe cząstkowe wskaźniki obciążenia cieplnego nagrzewnic.

Wskaźniki ω_{Np} i ω_{Nt} ujmują wzory:

$$\omega_{Np} = -\frac{1}{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}\left(\frac{\partial\left[D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})\right]}{\partial P}\right)_{t_d}, \tag{38}$$

$$\omega_{Nt} = -\frac{1}{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}\left(\frac{\partial\left[D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})\right]}{\partial t_d}\right)_{p}. \tag{39}$$

Różniczkowe cząstkowe wskaźniki $\omega_{\eta p}$ i $\omega_{\eta t}$ sprawności termicznej nagrzewnic należy wyznaczać w oparciu o model matematyczny przepływu ciepła w nagrzewnicach [19]. Według analizy uproszczonej, opartej o założenia e) i f) (Rozdział 3), wskaźniki $\omega_{\eta p}$ i $\omega_{\eta t}$ wyznacza się na podstawie różniczkowej postaci bilansu energii nagrzewnic:

$$d\eta_N = -d\left(\frac{V_s\, i_s}{W_{dg}}\right). \tag{40}$$

Po uwzględnieniu równań stechiometrycznych spalania oczyszczonego gazu wielkopiecowego w szybie nagrzewnicy i wykorzystaniu równań (1) i (2) otrzymuje się:

$$\omega_{\eta p}\,dP + \omega_{\eta t}\,dt_d = L(\omega_{yp}\,dP + \omega_{yt}\,dt_d) -$$

$$- \frac{v}{W_{dg}\,\eta_N}(i_{vs} - i_{ns})(\omega_{vp}\,dP + \omega_{vt}\,dt_d) + M(\omega_{up}\,dP + \omega_{ut}\,dt_d) +$$

$$+ N\left[\left(\frac{\partial t_s}{\partial P}\right)_{t_d} dP + \left(\frac{\partial t_s}{\partial t_d}\right)_P dt_d\right], \qquad (41)$$

gdzie:

$$L = \frac{y}{W_{dg}\,\eta_N}\left\{\left[(y + v)\frac{W_{dy}}{W_{dg}} - 1\right]i_{vs} + 0{,}5(\lambda - 1)\left[(y + u)\frac{W_{dy}}{W_{dg}} - 1\right]i_{os} + \right.$$

$$\left. + \frac{W_{dy}}{W_{dg}}(u + X_{go})i_{xs} + \left\{\left[n + \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda(y + u)\right]\frac{W_{dy}}{W_{dg}} - \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda + 1\right\}i_{ns}\right\},$$

$$M = \frac{u}{W_{dg}\,\eta_N}\left\{\left[\frac{W_{du}}{W_{dg}}(y + v)i_{vs} + 0{,}5(\lambda - 1)\left[(y + u)\frac{W_{du}}{W_{dg}} - 1\right]i_{os} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \left[(u + X_{go})\frac{W_{du}}{W_{dg}} - 1\right]i_{xs} + \left\{\left[n + \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda(y + u)\right]\frac{W_{du}}{W_{dg}} - \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda\right\}i_{ns}\right\},$$

$$N = \frac{1}{W_{dg}\,\eta_N}\left\{(y + v)c_{pvs} + 0{,}5(\lambda - 1)(y + u)c_{pos} + \right.$$

$$\left. + \left[n + \frac{0{,}79}{0{,}42}\lambda(y + u)\right]c_{pns} + (u + X_{go})c_{pxs}\right\}.$$

Różniczkowe cząstkowe wskaźniki ω_{yp}, ω_{yt}, ω_{up}, ω_{ut} dotyczące składników gazu wielkopiecowego wyznacza się odpowiednio z równań (8) i (9) po zróżniczkowaniu. Pochodne cząstkowe $\left(\frac{\partial t_s}{\partial P}\right)_{t_d}$ i $\left(\frac{\partial t_s}{\partial t_d}\right)_P$ oblicza się według równania (23).

4.2. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy t_d = idem

Z układu równań (27), (31), (33) i (35) przy warunku t_d = idem, wyznacza się ω_{kp}, ω_{dp}, ω_{gp} i ω_{vp}:

$$\omega_{kp} = \frac{RD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) + BT}{AD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) + BK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right]}, \tag{42}$$

$$\omega_{dp} = \frac{RK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right] - AT}{AD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) + BK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right]}, \tag{43}$$

gdzie:

$$R = -C - F\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d} - H\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} - Gv(W_{dy} + i_y)\left(\frac{\partial \varphi}{\partial P}\right)_{t_d} - J\left(\frac{\partial t_g}{\partial P}\right)_{t_d},$$

$$T = (2+\varphi)a_p - Gv\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} - (1+\varphi)\left\{0,42\,l - (1-\psi)b_p + \right.$$

$$\left. + \psi\left[e_p + D\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d}\right] + \frac{Gu}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d}\right\}.$$

$$\omega_{gp} = \frac{1}{G}\left\{K(a_k + \psi b_k)\omega_{kp} + D(0,79 + \psi X_d)\omega_{dp} - 0,79\,l - a_p - \right.$$

$$\left. - \psi\left[b_p + e_p + D\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d}\right]\right\} - \frac{u}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d}, \tag{44}$$

$$\omega_{vp} = \frac{1}{Gv}\left\{K\left[(\psi-1)b_k - a_k\right]\omega_{kp} + D(0,42 + \psi X_d)\omega_{dp} - 0,42\,l + \right.$$

$$\left. + a_p + (1-\psi)b_p - \psi\left[e_p + D\left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d}\right]\right\} - \frac{u}{\psi v}\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} - \omega_{gp}. \tag{45}$$

W równaniach (44) i (45) użyto dla skrócenia zapisu uprzednio wyznaczonych wskaźników ω_{kp} i ω_{dp}.

Po zróżniczkowaniu równań (8) i (9) według zmiennej P oraz po zastosowaniu równania (2) otrzymuje się:

$$\omega_{yp} = \frac{v}{y}\left[\varphi\omega_{vp} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial P}\right)_{t_d}\right], \tag{46}$$

$$\omega_{up} = \frac{v}{Gu}\left\{Kb_k\,\omega_{kp} + D\left[X_d\,\omega_{dp} - \left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d}\right] - b_p - e_p\right\} - \frac{1}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial P}\right)_{t_d} - \omega_{gp}. \tag{47}$$

Różniczkowy cząstkowy wskaźnik ω_{ep} energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego wyznacza się na podstawie różniczkowej postaci równania (19):

$$\omega_{ep} = \omega_{gp} + \frac{1}{W_{dg}} (y W_{dy} \omega_{yp} + u W_{du} \omega_{up}). \tag{48}$$

Po rozwinięciu wzoru (38) uzyskuje się:

$$\omega_{Np} = \omega_{dp} - \frac{\Delta i_{xd}}{\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd}} \left(\frac{\partial X_d}{\partial P}\right)_{t_d}. \tag{49}$$

Na podstawie równań (37) i (41) otrzymuje się:

$$\omega_{zp} = \frac{\partial E}{E_z} \omega_{ep} + \left(\frac{\partial E}{E_z} - 1\right)\left[L\omega_{yp} - \frac{v}{W_{dg}\eta_N}(i_{vs} - i_{ns})\omega_{vp} + \right.$$

$$\left. + M\omega_{up} + N\left(\frac{\partial t_s}{\partial P}\right)_{t_d} - \omega_{Np}\right]. \tag{50}$$

gdzie:

$$\left(\frac{\partial t_s}{\partial P}\right)_{t_d} = \frac{\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial P}\right)_{t_d} - \Delta t_{m1} \frac{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}{D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1}\Delta i_{xd1})}\left[\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial P}\right)_{t_d} \frac{}{t_{sp} - t_d} - \omega_{Np} \ln \frac{t_{sp} - t_d}{t_s - t_{dp}}\right]}{\frac{\Delta t_{m1}}{t_s - t_{dp}} \frac{D(\Delta i_d + X_d \Delta i_{xd})}{D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1}\Delta i_{xd1})} - 1}$$

Pochodną $\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial P}\right)_{t_d}$ oblicza się na podstawie równania (24)

Grupę wyprowadzonych wyżej różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych uzupełnia różniczkowy cząstkowy mnożnik oszczędności energii chemicznej koksu (lokalny stosunek zastępowania) zdefiniowany następująco:

$$\mu_{ep} = -\left[\frac{\partial(KW_{dk})}{\partial(PW_{dp})}\right]_{t_d}. \tag{51}$$

Po zastosowaniu równania (2) otrzymuje się:

$$\mu_{ep} = K\omega_{kp} \frac{W_{dk}}{W_{dp}}. \tag{52}$$

4.3. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy P = idem

Na podstawie równań przytoczonych w 4.1, analogicznie jak w poprzednim punkcie, uzyskuje się wzory określające różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy P = idem:

$$\omega_{kt} = \frac{SD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) - BU}{AD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) + BK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right]}, \tag{53}$$

$$\omega_{dt} = \frac{AU + SK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right]}{AD(1+\varphi)(0,42+\psi X_d) + BK\left[(2+\varphi)a_k + (1+\varphi)(1-\psi)b_k\right]}, \tag{54}$$

gdzie:

$$S = D(c_{pd} + X_d\, c_{pxd}) - F\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P - H\left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P - Gv(W_{dy} + i_y)\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P - J\left(\frac{\partial t_g}{\partial t_d}\right)_P,$$

$$U = Gv\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P + (1+\varphi)\left[\psi D\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P + \frac{Gu}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P\right],$$

$$\omega_{gt} = \frac{1}{G}\left\{K(a_k + \psi b_k)\omega_{kt} + D\left[(0,79+\psi X_d)\omega_{dt} - \psi\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P\right]\right\} - \frac{u}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P, \tag{55}$$

$$\omega_{vt} = \frac{1}{Gv}\left\{K\left[(\psi-1)b_k - a_k\right]\omega_{kt} + D(0,42+\psi X_d)\omega_{dt} - \right.$$

$$\left. - \psi D\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P\right\} - \frac{u}{\psi v}\left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P - \omega_{gt}, \tag{56}$$

$$\omega_{yt} = \frac{v}{y}\left[\varphi\omega_{vt} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t_d}\right)_P\right], \tag{57}$$

$$\omega_{ut} = \frac{\psi}{Gu}\left\{Kb_k\,\omega_{kt} + D\left[X_d\,\omega_{dt} - \left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P\right]\right\} - \frac{1}{\psi}\left(\frac{\partial \psi}{\partial t_d}\right)_P - \omega_{gt}, \tag{58}$$

$$\omega_{et} = \omega_{gt} + \frac{1}{W_{dg}}\left(y\, W_{dy}\,\omega_{yt} + u\, W_{du}\,\omega_{ut}\right), \tag{59}$$

$$\omega_{Nt} = \omega_{dt} - \frac{c_{pd} + X_d\, c_{pxd} + \Delta i_{xd}\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P}{\Delta i_d + X_d\,\Delta i_{xd}}, \tag{60}$$

$$\omega_{zt} = \frac{\zeta E}{E_z}\omega_{et} + \left(\frac{\zeta E}{E_z} - 1\right)\left[L\omega_{yt} - \frac{v}{w_{dg}\eta_N}(i_{vs} - i_{ns})\omega_{vt} + \right.$$

$$\left. + M\omega_{ut} + N\left(\frac{\partial t_s}{\partial t_d}\right)_P - \omega_{Nt}\right], \qquad (61)$$

gdzie:

$$\left(\frac{\partial t_s}{\partial t_d}\right)_P = \frac{\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial t_d}\right)_P - 1 - \Delta t_{m1}\frac{D(\Delta i_d + X_d\Delta i_{xd})}{D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1}\Delta i_{xd1})}\left[\frac{\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial t_d}\right)_P - 1}{t_{sp} - t_d} - \omega_{Nt}\ln\frac{t_{sp} - t_d}{t_s - t_{dp}}\right]}{\frac{\Delta t_{m1}}{t_s - t_{dp}}\frac{D(\Delta i_d + X_d\Delta i_{xd})}{D_1(\Delta i_{d1} + X_{d1}\Delta i_{xd1})} - 1}$$

Pochodną $\left(\frac{\partial t_{sp}}{\partial t_d}\right)_P$ oblicza się na podstawie równania (24).

Różniczkowy cząstkowy mnożnik oszczędności energii chemicznej koksu jest w tym przypadku zdefiniowany następująco:

$$\mu_{et} = -\left(\frac{\partial (KW_{dk})}{\partial\left[D(i_d + X_d i_{xd})\right]}\right)_P. \qquad (62)$$

Po zastosowaniu równania (1) otrzymuje się:

$$\mu_{et} = \frac{KW_{dk}\omega_{kt}}{D\left[c_{pd} + X_d c_{pxd} + i_{xd}\left(\frac{\partial X_d}{\partial t_d}\right)_P - \omega_{dt}(i_d + X_d i_{xd})\right]}. \qquad (63)$$

W celu wykorzystania wyprowadzonych wzorów na różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne należy w pierwszej kolejności obliczyć dla rozpatrywanej pary parametrów P i t_d całkowe wskaźniki energetyczne według wzorów podanych w poprzednim rozdziale. Praktyczne zastosowanie wzorów na całkowe i różniczkowe wskaźniki energetyczne jest możliwe po wyznaczeniu równań empirycznych ujmujących wpływ dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na φ, ψ, t_g i X_d. Należy jednak podkreślić, że wyprowadzone wzory na wskaźniki energetyczne nie zależą od postaci równań empirycznych. Wyprowadzone wzory teoretyczne na wskaźniki są przystosowane do paliw zastępczych nie zawierających tlenu i azotu (olej opałowy i gaz ziemny). W przypadku pozostałych paliw zastępczych w równaniach bilansowych należałoby dodatkowo uwzględnić tlen i azot z paliwa zastępczego.

5. POMOCNICZE RÓWNANIA EMPIRYCZNE

Pomocnicze równania empiryczne ujmują wpływ dodatku paliwa zastępczego i temperatury dmuchu na stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym (funkcja φ) na stosunek ilości wodoru zawartego w gazie wielkopiecowym do ilości wodoru doprowadzonego do strefy dysz (funkcje φ) oraz na temperaturę t_g gazu wielkopiecowego i stopień zawilżenia X_d dmuchu. Każdą z badanych zależności empirycznych należy ująć jako jednoparametrową rodzinę powierzchni. Nieznany a priori parametr w równaniu empirycznym wyznacza się według wyników jednorazowego pomiaru cieplnego. W ten sposób można uwzględnić specyficzne warunki badanego procesu wielkopiecowego. Dla każdego z paliw zastępczych należy wyznaczyć oddzielnie równania empiryczne. Rozważania prowadzone w niniejszym rozdziale dotyczą oleju opałowego zastosowanego jako paliwo zastępcze w wielkim piecu.

Materiał doświadczalny do wyznaczenia zależności empirycznych zebrano w przeważającej większości z literatury zagranicznej. Uzupełniono go trzema seriami pomiarowymi wielkich pieców dwóch polskich hut. Wybrano te serie pomiarowe, w których zmiennymi było zużycie oleju opałowego i temperatura dmuchu, bądź jedna z tych wielkości, przy możliwie stałych warunkach wsadowych i innych parametrach procesu wielkopiecowego.

W celu wyznaczenia uogólnionego równania empirycznego opisującego funkcję φ wykorzystano dane pomiarowe dotyczące dwunastu wielkich pieców [1, 15, 20, 23, 39, 40, 50, 53, 56, 62]. Dla każdej z rozważanych serii pomiarowych wyznaczono za pomocą metody najmniejszych kwadratów indywidualne równanie empiryczne opisujące funkcję φ [61]. Dla każdego równania indywidualnego wyznaczono również estymator wariancji. Zależność empiryczną $\varphi = \varphi(P, t_d)$ ujęto według równania:

$$\varphi = a_1 \exp(a_2 P) + a_3 \exp(a_4 t_d) + a_5. \tag{64}$$

Postać funkcji φ przyjęto na podstawie analizy danych doświadczalnych [61]. Znajduje to także uzasadnienie teoretyczne. Stała równowagi chemicznej dla reakcji redukcji pośredniej, stanowiąca odwrotność funkcji φ, zależy tylko od temperatury i zależność ta jest wykładnicza. Ponieważ zaś dodatek paliwa zastępczego i zmiana temperatury dmuchu wpływają na rozkład temperatur w wielkim piecu, można więc przyjąć, że zależność $\varphi = \varphi(P, t_d)$ ma również charakter funkcji e^x. Za przyjęciem postaci (64)

dla funkcji φ przemawia także fakt, że wiele zjawisk w przyrodzie opisano za pomocą praw, które sformułowano przy użyciu funkcji e^x [42]. Warunki zbliżone do stanu równowagi chemicznej występują w wielkim piecu jedynie w strefie rezerwy chemicznej. Przy wylocie z wielkiego pieca stosunek CO/CO_2 jest znacznie większy niż to wynika ze stałej równowagi chemicznej. Uwzględnia to wyraz wolny w równaniu (64).

W skład CO_2 występującego w funkcji φ wchodzi również dwutlenek węgla pochodzący z rozkładu węglanów. Równanie (64) nie ujmuje jednak wpływu zmiany dodatku topników ze zmianą P i t_d. Ujęcie to jest uzasadnione. Na podstawie bowiem licznych doświadczeń, prowadzonych ze zmienną ilością topników we wsadzie [4] stwierdzono, że w granicach błędów pomiarów stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym nie zależy od dodatku topników we wsadzie.

Na podstawie analizy indywidualnych równań zdecydowano się poszukiwać jednoparametrowej rodziny powierzchni φ w postaci (64) przyjmując wyraz wolny jako parametr. Ze względu na różne warunki pomiarów każdej serii przydano wagę statystyczną, odwrotnie proporcjonalną do estymatora wariancji. W rozpatrywanym przypadku metoda najmniejszych kwadratów sprowadza się do minimalizacji następującej funkcji:

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} w_j \left[\varphi_{ji} - a_1 \exp(a_2 P_{ji}) - a_3 \exp(a_4 t_{dji}) - a_{5j}\right]^2 = \min., \qquad (65)$$

gdzie:

w_j - waga statystyczna j-tej serii pomiarowej,
j - numer serii pomiarowej,
i - numer pomiaru,
m - liczba serii pomiarowych,
n_j - liczba pomiarów w serii.

Równanie jednoparametrowej rodziny powierzchni φ ma postać:

$$\varphi = 0{,}288 \exp(-\,0{,}0111\ P) + 7{,}22 \exp(-\,0{,}0049\ t_d) + \varphi_o, \qquad (66)$$

gdzie parametr φ_o jest wyznaczany na podstawie wyników jednorazowego pomiaru składu gazu, wskaźnika zużycia oleju i temperatury dmuchu. Parametr φ_o uwzględnia specyfikę badanego procesu wielkopiecowego, w szczególności zaś ewidentną zależność funkcji φ od ciężaru wsadu [3, 4, 27].

Estymator odchylenia standardowego obliczony dla rozpatrywanych dwunastu serii pomiarowych wynosi:

$$\sigma_\varphi = 0{,}031 \ ,$$

przy czym wartości φ mieszczą się zasadniczo w przedziale 1,8÷2,5.

Przebieg funkcji φ, malejący ze wzrostem dodatku oleju opałowego i temperatury dmuchu, ma uzasadnienie z punktu widzenia przebiegu procesu redukcji pośredniej w wielkim piecu. Ze wzrostem dodatku oleju zwiększa się udział H_2 w fazie gazowej, co wpływa na poprawę wykorzystania CO (rozszerza się zakres redukcji pośredniej) [3]. Z kolei podwyższenie temperatury dmuchu poprzez zmniejszenie ilości dmuchu i udziału N_2 w gazie, przesuwa stan równowagi chemicznej w kierunku zwiększenia udziału CO_2. Uzyskany przebieg funkcji φ znajduje również potwierdzenie w badaniach doświadczalnych wielu innych autorów [8, 9, 10, 11, 14, 17, 22, 30, 34, 38, 55]. Wyniki badań tych autorów nie zostały wykorzystane do wyznaczenia uogólnionej zależności empirycznej bądź ze względu na małą liczbę punktów pomiarowych, bądź też ze względu na niewielki zakres zmian dodatku oleju i temperatury dmuchu.

Z licznych badań przytoczonych w literaturze [2, 3, 4, 5, 16, 32, 41, 44, 54] wynika, że istnieje korelacja między stopniami wykorzystania tlenku węgla η_{CO} i wodoru η_{H_2}. Współzależność ta wynika z przesłanek teoretycznych przy założeniu stanu równowagi chemicznej dla reakcji gazu wodnego. Potwierdzają to wyniki pomiarów świadczące, że w temperaturze odpowiadającej strefie rezerwy cieplnej w wielkim piecu udziały CO, CO_2, H_2 i H_2O są bardzo bliskie równowagowym. Przy wylocie z wielkiego pieca skład gazu odbiega oczywiście od składu równowagowego, lecz związek między η_{CO} i η_{H_2} nadal istnieje [16]. Pomiędzy stopniami wykorzystania η_{CO} i η_{H_2} a funkcjami φ i ψ występują zależności:

$$\varphi = \frac{1 - \eta_{CO}}{\eta_{CO}}, \tag{67}$$

$$\psi = 1 - \eta_{H_2}. \tag{68}$$

Autorzy prac [2, 5, 41, 54] przytaczają równania empiryczne lub wykresy, z których po wykorzystaniu związków (67) i (68) otrzymano cztery zależności wiążące funkcje φ i ψ [61]. Na tej podstawie wyznaczono za pomocą metody najmniejszych kwadratów uśrednioną zależność liniową w interesującym zakresie zmian funkcji φ. W tym przypadku minimalizowana funkcja ma postać:

$$\int_{1,8}^{2,5} \left[\sum_{l=1}^{4} (\psi_l - b_l - b_2\varphi)^2 \right] d\varphi = \min., \tag{69}$$

gdzie l oznacza numer równania empirycznego. Granice całkowania wynikają z przesłanek praktycznych.

Do dalszych rozważań przyjęto uśredniony współczynnik b_2 i zależność empiryczną $\psi(\varphi)$ ujęto w postaci:

$$\psi = 0{,}126\,\varphi + \psi_o, \tag{70}$$

gdzie parametr ψ_o wyznacza się według wyników jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca.

Estymator odchylenia standardowego obliczony dla rozpatrywanych czterech zależności indywidualnych wynosi:

$$\sigma\psi = 0{,}028,$$

przy czym wartości ψ mieszczą się w granicach $0{,}55 \div 0{,}70$.

Sposób postępowania przy wyznaczaniu uogólnionego równania empirycznego ujmującego zależność temperatury gazu wielkopiecowego od dodatku oleju i temperatury dmuchu był podobny jak w przypadku funkcji φ. Dla jedenastu serii pomiarowych, którymi dysponowano [1, 15, 20, 23, 25, 31, 40, 56 62], wyznaczono indywidualne równania empiryczne przyjmując na podstawie analizy danych pomiarowych zależność liniową [61]. Dla każdego równania indywidualnego wyznaczono również estymator wariancji. Postać równania empirycznego jednoparametrowej rodziny powierzchni $t_g = t_g(P, t_d)$ dobrano metodą prób uzyskując w kolejnych wersjach poprawę estymatora wariancji [61]. Dla każdej serii pomiarowej uwzględniono wagę statystyczną. Warunek metody najmniejszych kwadratów dla wyznaczenia jednoparametrowej rodziny powierzchni t_g jest taki sam jak (67). W wyniku obliczeń uzyskano:

$$t_g = (0{,}0028\ t_{go} - 0{,}410)P - (0{,}0001\ t_{go} + 0{,}115)t_d + t_{go}, \tag{71}$$

gdzie parametr t_{go} wyznacza się według wyników jednorazowego pomiaru temperatury gazu wielkopiecowego, wskaźnika zużycia oleju oraz temperatury dmuchu.

Estymator odchylenia standardowego obliczony dla rozpatrywanych jedenastu serii pomiarowych wynosi:

$$\sigma_{t_g} = 11\ \mathrm{K},$$

przy czym t_g zmienia się w granicach $150 \div 450^{\circ}\mathrm{C}$.

Przebieg zależności empirycznej t_g ujęty równaniem (71) znajduje również potwierdzenie teoretyczne. Z analizy przeprowadzonej według modelu przepływu ciepła w wielkim piecu zaproponowanego przez Kitajewa [24] wynika, że dodatek paliwa zastępczego wpływa na podwyższenie temperatury gazu wielkopiecowego, zaś podwyższenie temperatury dmuchu wywołuje obniżenie jego temperatury. Znajduje to także potwierdzenie w licznych badaniach

doświadczalnych nie wykorzystanych z podanych uprzednio przyczyn przy opracowywaniu uogólnionego równania empirycznego [8, 11, 14, 18, 22, 33, 36, 52].

Większość eksperymentów ze stosowaniem dodatku oleju opałowego w wielkim piecu była wykonywana przy stałym zawilżeniu dmuchu, wyższym od maksymalnego w powietrzu atmosferycznym. Dlatego nie poszukiwano uogólnionego równania empirycznego $X_d = X_d(P, t_d)$. W przypadku każdego badanego wielkiego pieca zależność tę należy traktować indywidualnie. Najczęściej będzie to polegało na przyjęciu stałego zawilżenia dmuchu. Podwyższenie temperatury dmuchu przy jednoczesnym dodatku paliwa zastępczego nie wymaga podwyższenia zawartości wilgoci w dmuchu. Jeżeli rozpatruje się tylko wpływ samej temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne, bez wdmuchiwania paliw zastępczych, można posłużyć się uogólnioną zależnością empiryczną podaną w [49].

6. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Wyprowadzone w rozdziałach 3 i 4 wzory na całkowe i różniczkowe wskaźniki energetyczne wraz z równaniami empirycznymi podanymi w rozdziale 5 tworzą algorytm służący do obliczeń przewidywanych efektów energetycznych wdmuchiwania oleju opałowego i podwyższenia temperatury dmuchu. Prognozowanie jest oparte na informacjach uzyskanych z jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca. Z uwagi na dużą pracochłonność obliczenia wykonuje się przy użyciu elektronicznej techniki obliczeniowej.

Pełny przykład obliczeniowy sporządzono dla wielkiego pieca jednej z polskich hut [43]. Wyniki jednorazowego pomiaru cieplnego dla tego pieca umieszczono w tablicy 1 pod pozycją wielki piec A. W kolumnie A tej tablicy podano również średnie błędy bezwzględne wielkości mierzonych dla wielkiego pieca A. Zostały one wykorzystane w rozdziale 7 do analizy wpływu błędów pomiaru jednorazowego i niedokładności równań empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych.

Wielki piec A posiada objętość użyteczną 490 m^3. Wsad rudny stanowią w 70% rudy zagraniczne; pozostałe 30% to syderyt prażony. Ciężar wsadu wynosi około 2350 kg/t sur. Temperatura dmuchu jest utrzymywana w granicach 950÷1000°C. W kolumnach B i C zamieszczono wyniki pomiarów jednorazowych z badań zagranicznych [20, 23]. Zostały one wykorzystane w rozdziale 8 do porównania wyników obliczeń przewidywania wskaźników energetycznych z wynikami doświadczeń. Autorzy pozycji [20, 23] nie podają wyników pomiarów nagrzewnic. Dla wielkiego pieca A podano wartości średnie dla zespołu trzech nagrzewnic.

W przypadku wielkiego pieca A posłużono się również w przykładzie indywidualnym równaniem empirycznym $X_d = X_d(P, t_d)$. Przyjęto zależność liniową. Podług pomiarów tego pieca [50] otrzymano:

$$X_d = 0{,}0197 - 0{,}000084\ P + 0{,}000003\ t_d. \tag{72}$$

W gazie wielkopiecowym wielkiego pieca A wykrywa się wyjątkowo duże udziały CH_4 (nawet $\sim 1\%$). Jest to przypadek odosobniony, nie znajdujący potwierdzenia w licznych wynikach badań przytoczonych w literaturze. Powszechnie przyjęto bowiem, że wykrywane niekiedy śladowe ilości CH_4 należy przypisać błędom analizy chemicznej. W rozważanym przypadku błędy analizy należy wykluczyć, gdyż sprawdzono ją niezależnie w dwóch laborato-

Wyniki jednorazowych pomiarów cieplnych badanych wielkich pieców

Nośnik energii	Wielkość mierzona	Wielkie piece		
		A	B	C
Koks	Zużycie koksu suchego K_1, kg/t sur.	699,2 ± 9	544,6	552
	Wartość opałowa koksu suchego W_{dk}, kJ/kg	29960 ± 120	30 030	30 430
	Udziały gramowe w koksie suchym:			
	węgiel c_k	0,8691 ± 0,005	0,8855	0,8830
	siarka s_k	0,0096 ± 0,0027	0,0102	0,0104
	wodór h_k	0,0062 ± 0,00075	0,0030	0,0037
	wilgoć w_k	0,0757 ± 0,0075	0,0564	0,022
Olej opałowy	Zużycie oleju P_1, kg/t sur.	71,6 ± 0,8	69,7	45
	Wartość opałowa W_{dp}, kJ/kg	40 150 ± 80	41 240	40 660
	Udziały gramowe:			
	węgiel c_p	0,8329 ± 0,0015	0,8627	0,855
	siarka s_p	0,0257 ± 0,00125	0,0083	0,0245
	wodór h_p	0,1107 ± 0,00075	0,1198	0,115
	wilgoć w_p	0,012 ± 0,001	0,002	0,0
	Temperatura t_p, °C	85 ± 2	90	100
Powietrze do rozpylania oleju	Zużycie powietrza l, m_n^3/kg	1,0 ± 0,05	0	0
	Temperatura t_1, °C	10 ± 2	-	-
Dmuch	Zużycie dmuchu suchego D_1, m_n^3/t sur.	2019 ± 45	1609	1538
	Zawilżenie X_{d1}, $m_n^3 H_2O/m_n^3$ d.s.	0,0153 ± 0,0015	0,0264	0,0249
	Temperatura t_{d1}, °C	994 ± 15	931	1010
Gaz wielkopiecowy	Ilość gazu suchego G_1, m_n^3/t sur.	3061 ± 53	2331	2201
	Udziały objętościowe w gazie suchym:			
	CO	0,277 ± 0,003	0,2707	0,280
	CO_2	0,139 ± 0,002	0,1417	0,131
	H_2	0,033 ± 0,002	0,0412	0,031
	CH_4	0,006 ± 0,002	0,0	0,003
	O_2	0,005 ± 0,002	0,0	0,0
	N_2	0,540 ± 0,005	0,5458	0,555

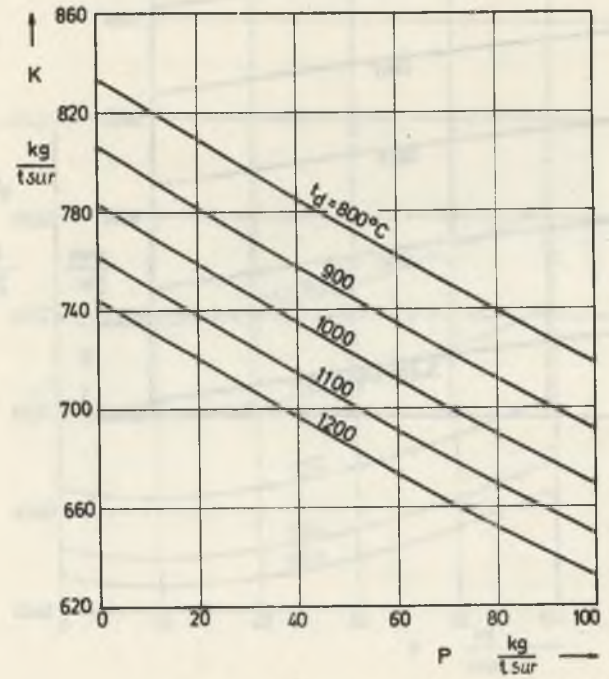
od. tablicy 1

Nośnik energii	Wielkość mierzona	Wielkie piece		
		A	B	C
Gaz wielkopiecowy	Stopień zawilżenia X_{g1}, $m_n^3 H_2O/m_n^3$ g.s.	0,067	0,045	0,037
	Wartość opałowa gazu suchego, W_{dg1}, kJ/m_n^3	4074 ± 40	3860	3980
	Temperatura t_{g1}, °C	144 ± 10	318	236
	Mnożnik uwzględniający straty gazu wielkopiecowego ζ	0,92	-	-
Nagrzewnice dmuchu	Stosunek nadmiaru powietrza λ	1,2 ± 0,05	-	-
	Zawilżenie gazu oczyszczonego X_{go} $m_n^3 H_2O/m_n^3$ g.s.	0,02 ± 0,001	-	-
	Temperatura dmuchu przy dopływie do nagrzewnic t_{dp}, °C	80 ± 2	-	-
	Temperatura spalin wylotowych z nagrzewnic t_{s1}, °C	250 ± 10	-	-
	Względne straty do otoczenia ξ_{ot}	0,04	-	-

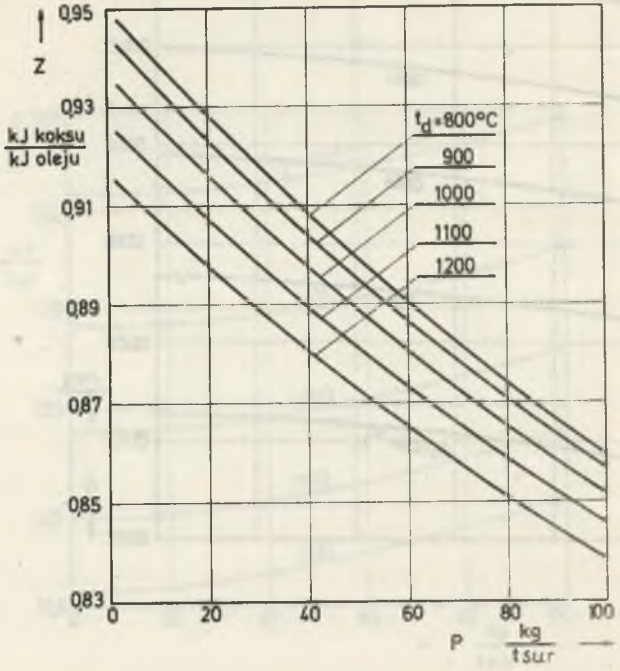
riach. Przyczynami tego zjawiska jest najprawdopodobniej używanie zimnego powietrza sprężonego do rozpylania mazutu oraz nie przygotowany wsad. Użycie zimnego powietrza pogarsza warunki rozkładu węglowodorów w strefie dysz a nie przygotowany wsad może powodować kanałowy bieg pieca, skutkiem czego w wyższych partiach pieca CH_4 nie rozkłada się i nie jest wykorzystany w procesie redukcji.

Ujęcie ilościowe wpływu dodatku oleju i temperatury dmuchu na udział CH_4 w gazie wielkopiecowym jest na drodze teoretycznej nierozwiązalne. Ujęcie empiryczne w formie równania uogólnionego, ze względu na odosobniony przypadek, jest też niemożliwe. W tej sytuacji uzasadnione jest przyjęcie, że udział CH_4 w gazie wielkopiecowym jest wprost proporcjonalny do udziału H_2 w gazie, a współczynnik proporcjonalności wyznacza się na podstawie wyników jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca.

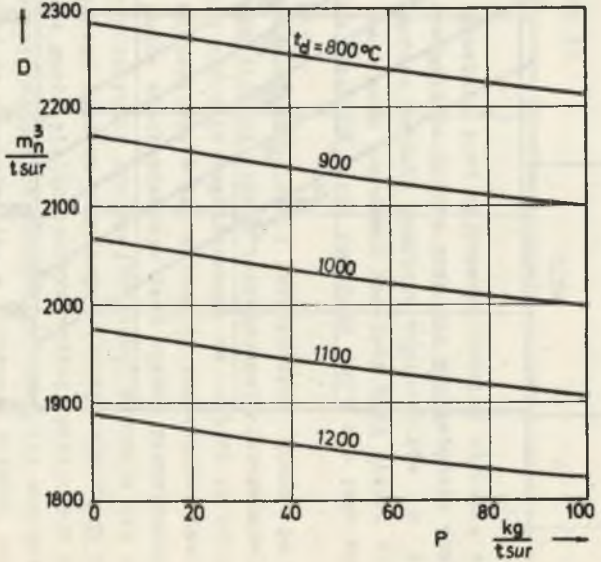
Uwzględnienie metanu w gazie wielkopiecowym według przyjętego rozwiązania powoduje zmiany w wyprowadzonych wzorach na wskaźniki energetyczne. Zmiany te są bardzo proste do wprowadzenia, a ponieważ dotyczą przypadku odosobnionego nie przytoczono ich w niniejszej pracy. Wzory z uwzględnieniem CH_4 w gazie znajdują się w pracy [59]. Niniejszy przykład sporządzono z uwzględnieniem CH_4 w gazie wielkopiecowym.



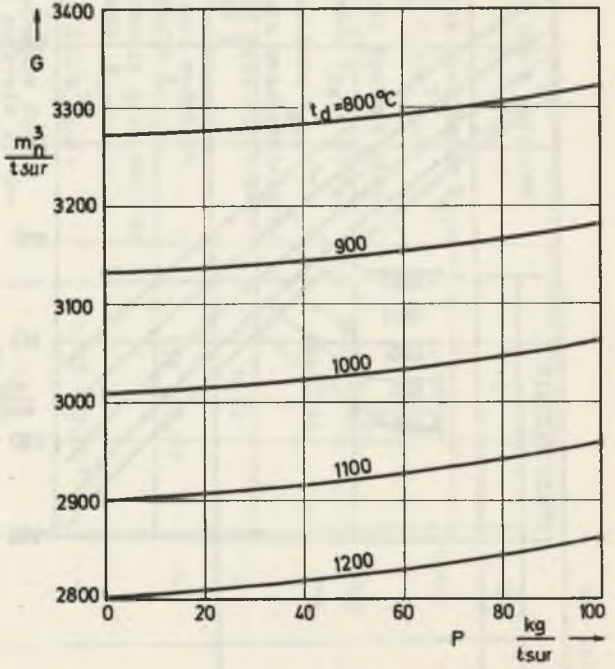
Rys. 1. Całkowy wskaźnik zużycia koksu



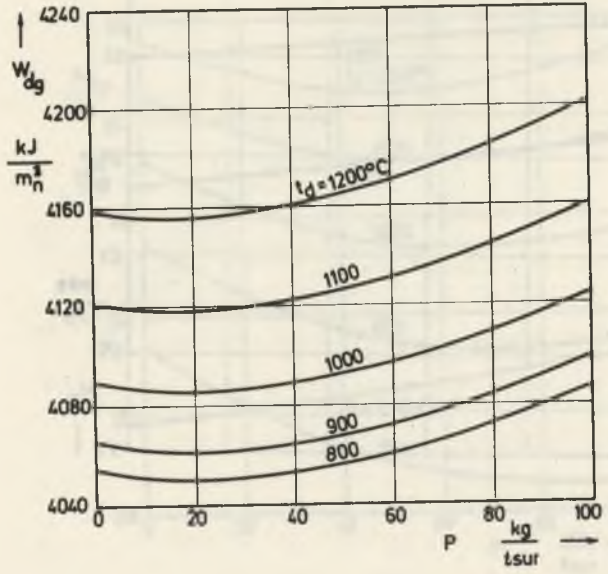
Rys. 2. Stosunek zastępowania energii chemicznej koksu energią chemiczną oleju



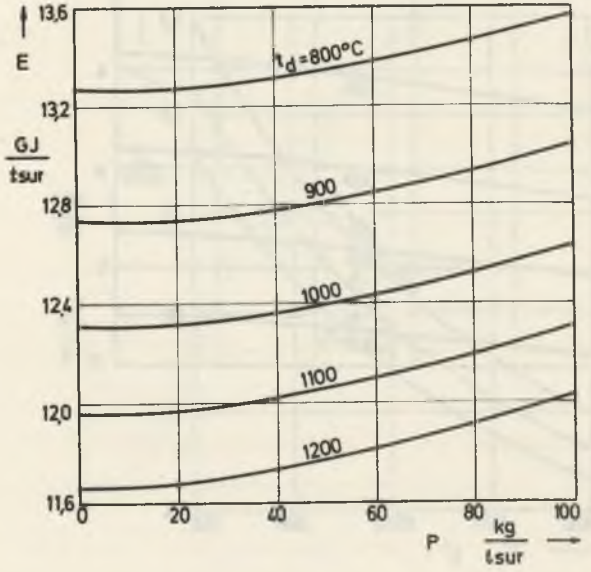
Rys. 3. Całkowy wskaźnik zużycia suchego dmuchu



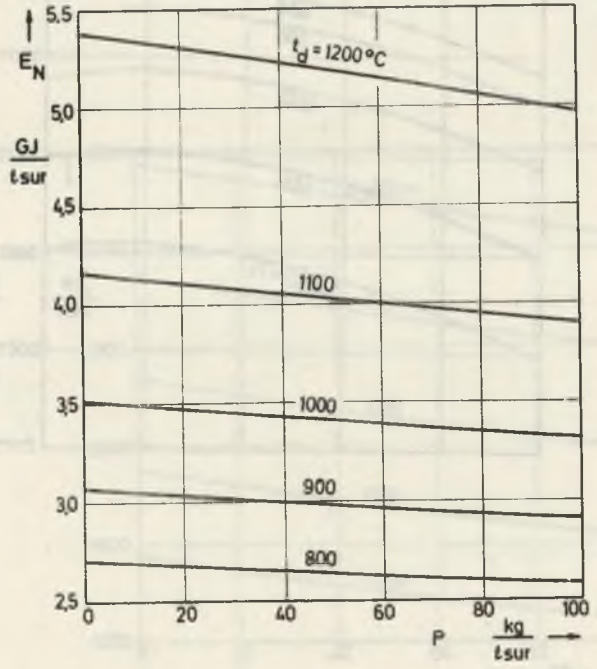
Rys. 4. Całkowy wskaźnik produkcji gazu wielkopiecowego



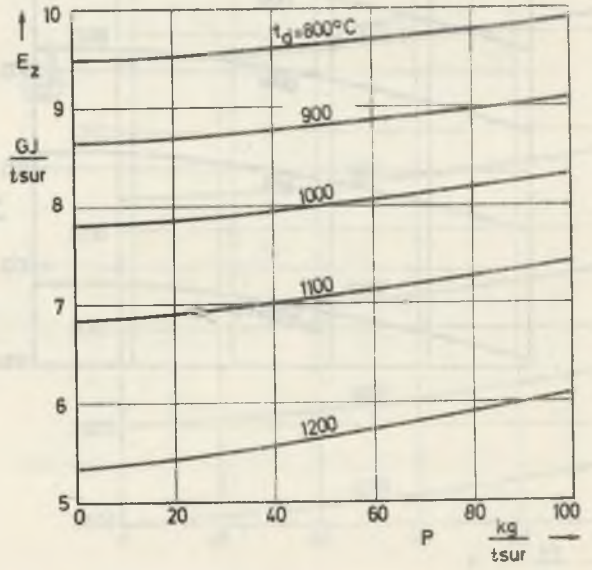
Rys. 5. Wartość opałowa gazu wielkopiecowego



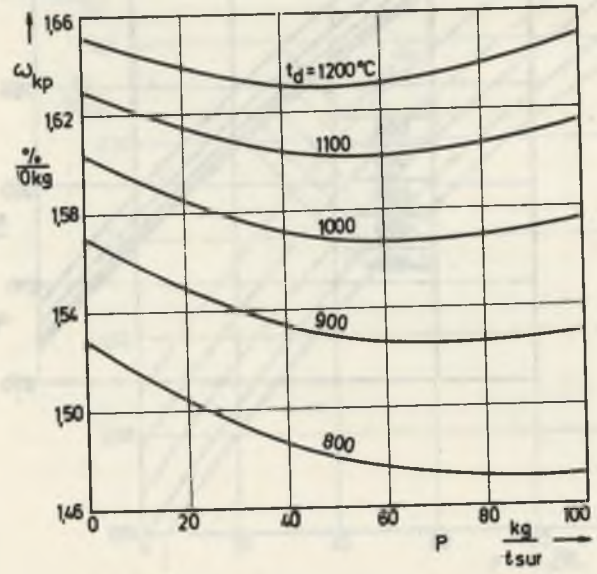
Rys. 6. Całkowy wskaźnik energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego



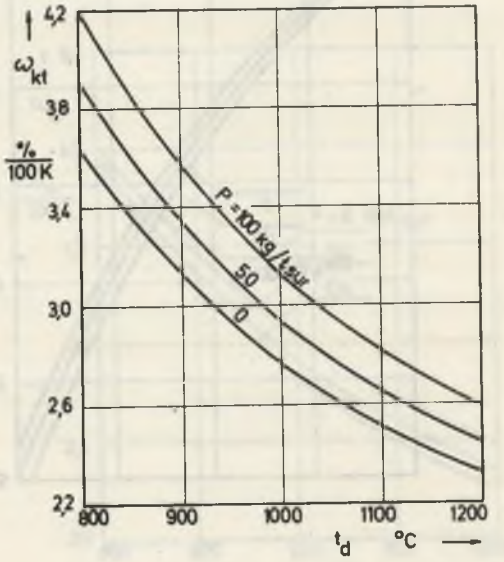
Rys. 7. Całkowy wskaźnik zużycia energii chemicznej gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach



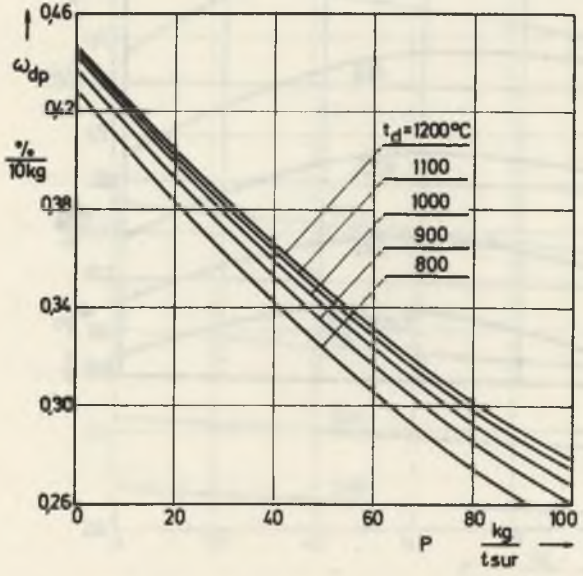
Rys. 8. Całkowy wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców



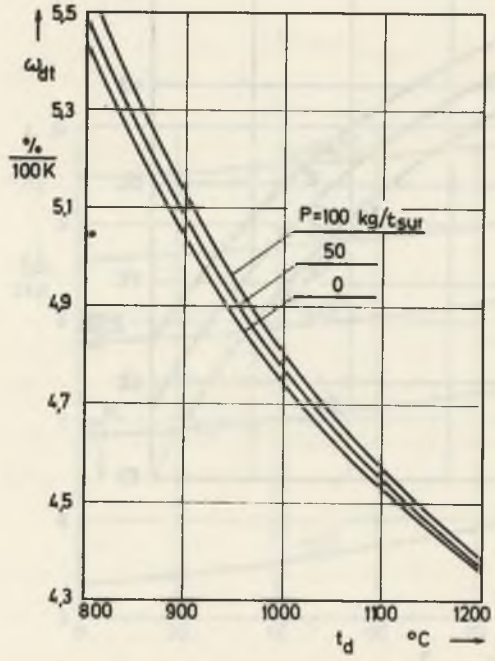
Rys. 9. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik oszczędności koksu przy t_d = idem



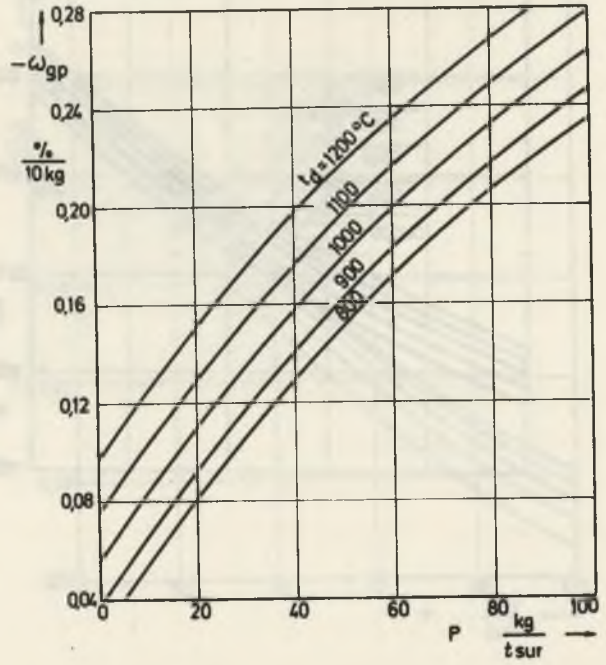
Rys. 10. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik oszczędności koksu przy P = idem



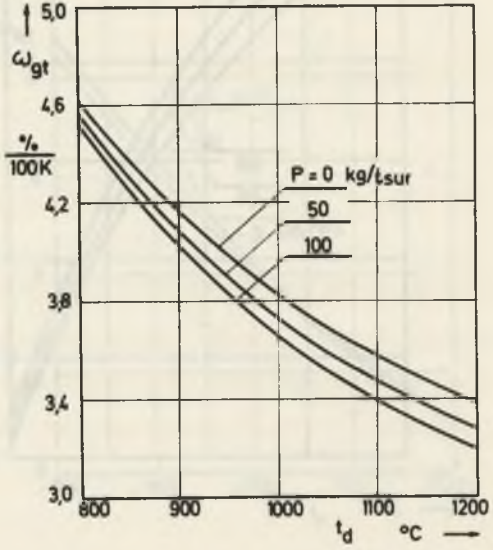
Rys. 11. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik oszczędności dmuchu przy t_d = idem



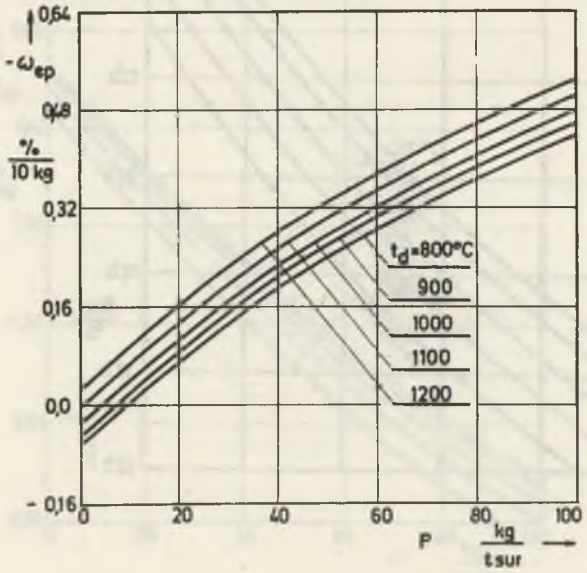
Rys. 12. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik oszczędności dmuchu przy P = idem



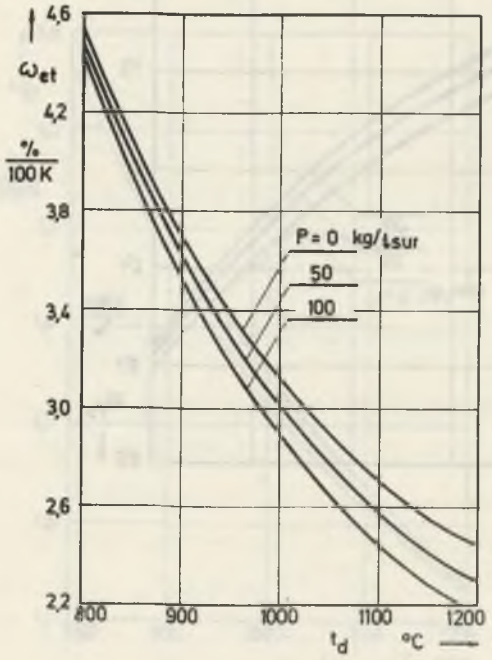
Rys. 13. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zwiększenia produkcji gazu wielkopiecowego przy t_d = idem



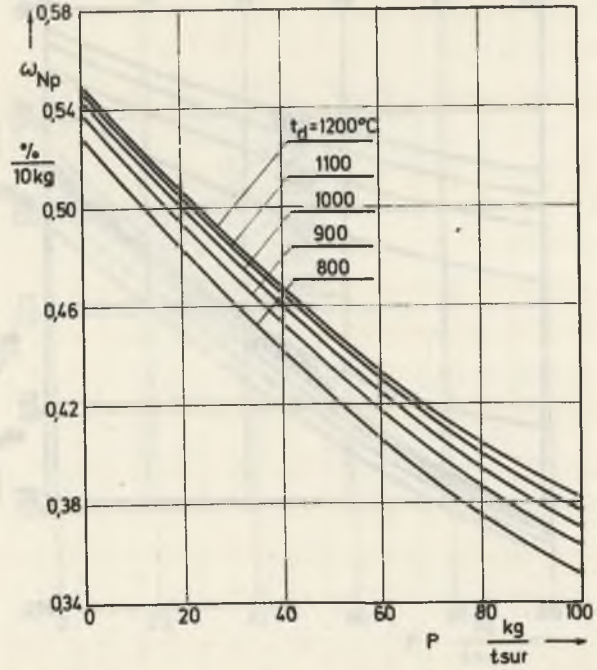
Rys. 14. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zmniejszenia produkcji gazu wielkopiecowego przy P = idem



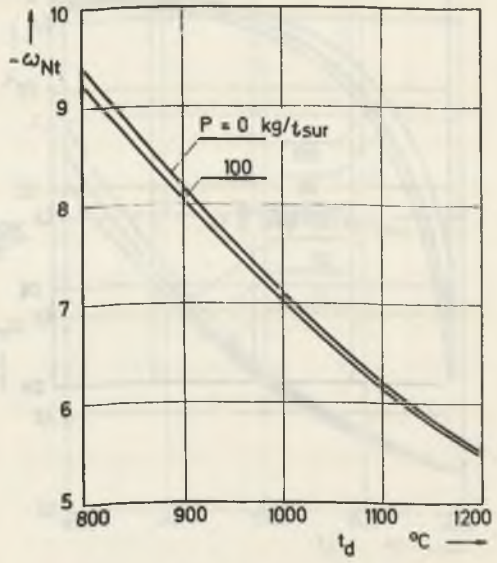
Rys. 15. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zwiększenia energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego przy t_d = idem



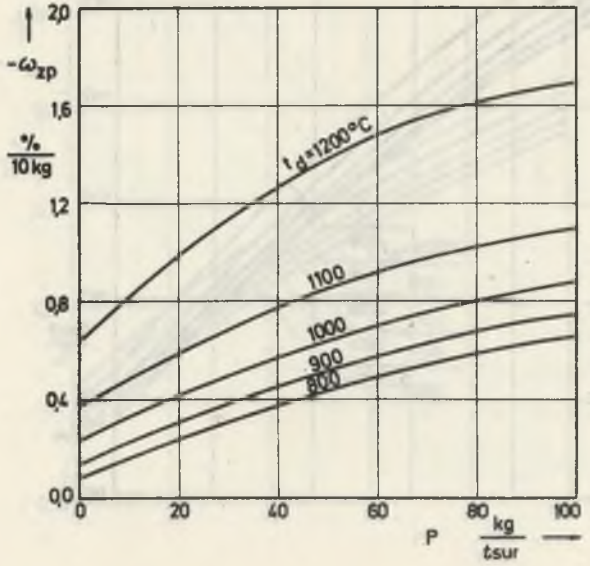
Rys. 16. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zmniejszenia energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego przy P = idem



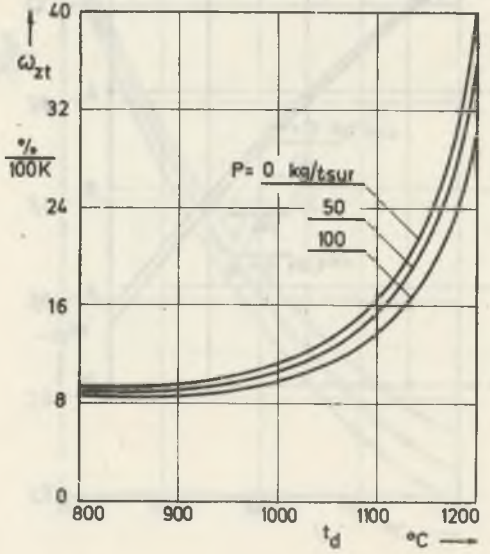
Rys. 17. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zmniejszenia obciążenia cieplnego nagrzewnic przy t_d = idem



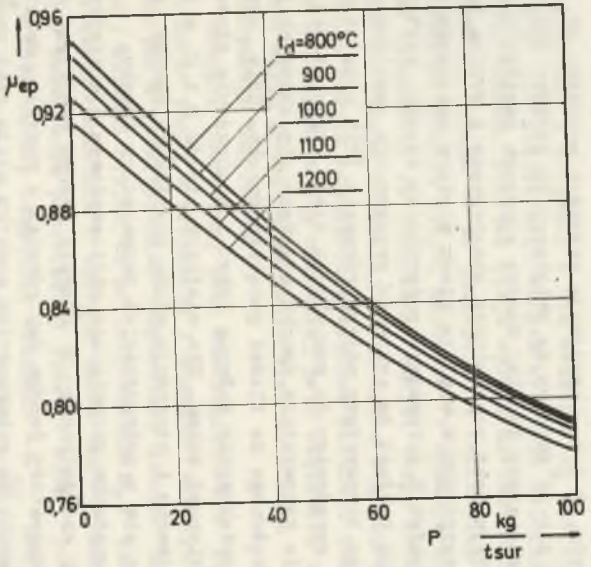
Rys. 18. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic przy P = idem



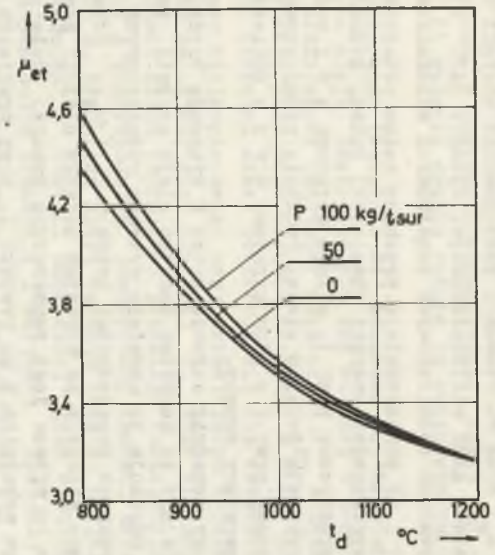
Rys. 19. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zwiększenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców przy t_d = idem



Rys. 20. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik zmniejszenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców przy P = idem



Rys. 21. Lokalny stosunek zastępowania energii chemicznej koksu



Rys. 22. Różniczkowy cząstkowy mnożnik oszczędności energii chemicznej koksu przy P = idem

Na rysunkach 1÷8 przedstawiono wyniki obliczeń wpływu dodatku oleju opałowego i temperatury dmuchu na całkowe wskaźniki energetyczne K, D, G, E, E_N i E_z oraz na stosunek zastępowania energii chemicznej koksu i wartość opałową gazu wielkopiecowego. Rysunki 9÷20 ujmują wyniki obliczeń przewidywanych różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych. Rysunki 21 i 22 przedstawiają przebieg zmian różniczkowych cząstkowych mnożników oszczędności energii chemicznej koksu. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy t_d = idem wyrażono w % i podano w odniesieniu do 10 kg przyrostu dodatku oleju. Podobnie różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne przy P = idem wyrażono w % i w odniesieniu do 100 K przyrostu temperatury dmuchu.

Całkowy wskaźnik zużycia koksu K wykazuje bardziej równomierny przebieg malejący ze wzrostem dodatku oleju aniżeli ze wzrostem temperatury dmuchu. Obrazują to wyraźnie wykresy różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych oszczędności koksu ω_{kp} i ω_{kt}. Wskaźnik ω_{kp} zmienia się stosunkowo niewiele ze wzrostem dodatku oleju, przy czym zmiany są tym mniejsze im wyższa jest temperatura dmuchu. Świadczy to o wykładniczym przebiegu wskaźnika K na rysunku 1, przy przyjęciu t_d jako parametru. Natomiast różniczkowy cząstkowy wskaźnik oszczędności koksu ω_{kt} zmniejsza się bardzo wyraźnie z podwyższeniem temperatury dmuchu, przy czym dodatek oleju podwyższa efekt energetyczny oszczędności koksu na skutek podgrzania dmuchu.

Stosunek zastępowania energii chemicznej koksu w badanym zakresie zmian parametrów P i t_d przyjmuje wartości mniejsze od jedności, przy czym zmniejsza się on zarówno ze zwiększeniem dodatku oleju jak i z podwyższeniem temperatury dmuchu. Spadek stosunku zastępowania ze zwiększeniem dodatku oleju jest powszechnie obserwowany i wynika to z rosnącego zakłócenia przeciwprądu w wielkim piecu w miarę zwiększania dodatku oleju. Natomiast spadek Z z rosnącym podgrzaniem dmuchu występuje wyjątkowo w wielkim piecu A. Jest to wynikiem zwiększenia zawilżenia dmuchu z podwyższeniem jego temperatury według równania (72) oraz stosowaniem zimnego powietrza sprężonego do rozpylania oleju. Przy stałej ilości oleju przy podwyższeniu temperatury dmuchu zwiększa się stosunek ilości zimnego powietrza sprężonego do ilości gorącego dmuchu. Obie wymienione przyczyny wywołują zwiększenie zużycia koksu i pogorszenie stosunku zastępowania energii chemicznej koksu. Dla wielkich pieców B i C, w których olej wtryskuje się do dmuchu i utrzymuje stałe zawilżenie dmuchu, stosunek zastępowania zwiększa się z podwyższeniem temperatury dmuchu.

W rozważanym przykładzie obliczeniowym dla wielkiego pieca A całkowy wskaźnik energetyczny D zużycia dmuchu zmniejsza się zarówno z przyrostem temperatury dmuchu jak również z rosnącym dodatkiem oleju. Spadek zużycia dmuchu ze zwiększeniem dodatku oleju jest spowodowany użyciem powietrza sprężonego do rozpylania mazutu. Tempo zmian zużycia dmuchu obrazują różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne ω_{dp} i ω_{dt}. Podwyższaniu

temperatury dmuchu sprzyja zwiększenie wskaźnika ω_{dp}, przy czym efekt ten jest wyraźniejszy przy większych dodatkach oleju. Podobnie zwiększaniu dodatku paliwa zastępczego towarzyszy przyrost ω_{dt}, wyraźniejszy przy niższych temperaturach dmuchu. W przypadku wdmuchiwania oleju za pomocą dmuchu (wielkie piece B i C) zużycie dmuchu rośnie ze zwiększeniem dodatku oleju opałowego.

Produkcja gazu wielkopiecowego (wskaźnik G) zwiększa się intensywniej w miarę zwiększania zużycia oleju, zmniejsza się zaś wolniej z podwyższaniem temperatury dmuchu. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik $-\omega_{gp}$ zwiększenia produkcji gazu wielkopiecowego przyjmuje większe wartości w miarę podwyższania temperatury dmuchu. Odwrotny efekt obserwuje się dla wskaźnika ω_{gt} zmniejszenia produkcji gazu wielkopiecowego przy wzrastającym dodatku paliwa zastępczego. Przebieg zmian wartości opałowej W_{dg} gazu wielkopiecowego jest wypadkową działania kilku czynników: przebiegu funkcji φ, zmniejszeniem udziału N_2 w gazie z podwyższeniem temperatury dmuchu, zwiększeniem ilości gazu i udziału H_2 w gazie w miarę wzrostu dodatku oleju.

Przebieg całkowego wskaźnika E energii chemicznej gazu wielkopiecowego jest wynikiem omówionych zmian produkcji i wartości opałowej gazu wielkopiecowego. Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne $-\omega_{ep}$ i ω_{et} wykazują te same prawidłowości przebiegu co wskaźniki $-\omega_{gp}$ i ω_{gt}. W zakresie temperatur 800÷1000°C i dodatku oleju 0÷10 kg/t sur. obserwuje się zmniejszanie energii chemicznej gazu wielkopiecowego ze zwiększeniem dodatku oleju. Powyżej tego zakresu wskaźnik $-\omega_{ep}$ przyjmuje wartości dodatnie.

Obciążenie cieplne nagrzewnic i związany z nim wskaźnik E_N zużycia własnego energii chemicznej gazu wielkopiecowego bardzo wyraźnie zwiększa się z podwyższaniem temperatury dmuchu. Dodatek oleju wpływa na obniżenie obciążenia cieplnego nagrzewnic. Wynika to ze zmniejszenia wskaźnika zużycia dmuchu w miarę zwiększania dodatku oleju, ponieważ w badanym wielkim piecu używa się powietrza sprężonego do rozpylania oleju. Tempo zmian obciążenia cieplnego nagrzewnic ujmują wskaźniki różniczkowe cząstkowe ω_{Np} i ω_{Nt}. Wyższym temperaturom dmuchu odpowiadają większe wartości wskaźnika ω_{Np}, przy czym wpływ ten zaznacza się wyraźniej przy większych dodatkach oleju. Wzrost dodatku oleju powoduje zmniejszenie wskaźnika $-\omega_{Nt}$ zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic.

Całkowy wskaźnik E_z energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców wynika ze zmian w produkcji i zużyciu własnym gazu wielkopiecowego. Wskaźnik ten z podwyższeniem temperatury dmuchu zmniejsza się jeszcze wyraźniej, aniżeli wynika to ze zwiększenia E_N, ponieważ jednocześnie ulega zmniejszeniu wskaźnik E energii chemicznej wytwarzanego gazu wielkopiecowego. W rozważanym przykładzie dodatek oleju powoduje zwiększenie wskaźnika E_z. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik $-\omega_{zp}$ zwiększenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców zwiększa się intensywniej z podwyższaniem temperatury dmuchu aniżeli z

dodatkiem oleju. Różniczkowy cząstkowy wskaźnik ω_{zt} zmniejszenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców, po stosunkowo ustabilizowanym przebiegu w zakresie 800÷1000°C, dla wyższych temperatur wykazuje radykalną tendencję rosnącą. Dodatek oleju sprzyja zmniejszeniu wskaźnika ω_{zt}.

Na rysunkach 21 i 22 przedstawiono przebieg różniczkowych cząstkowych mnożników oszczędności energii chemicznej koksu μ_{ep} i μ_{et}. Mnożnik μ_{ep} (lokalny stosunek zastępowania energii chemicznej koksu) przybiera w rozpatrywanym zakresie zmian parametrów P i t_d wartości mniejsze od jedności przy czym maleje on ze wzrostem P i t_d. Przyczyny spadku μ_{ep} z podwyższaniem temperatury dmuchu są te same co w przypadku stosunku zastępowania Z. Wpływ temperatury dmuchu na przebieg wskaźnika μ_{ep} zmniejsza się z dodatkiem oleju. Różniczkowy cząstkowy mnożnik μ_{et} przyjmuje wartości kilkakrotnie większe od jedności, przy czym zmniejsza się z podwyższeniem temperatury dmuchu, a korzystny wpływ dodatku oleju zanika przy wysokich temperaturach dmuchu. Uzyskany rezultat obliczeń jest wynikiem multiplikacji użytecznych efektów zastosowania wyższej temperatury dmuchu. Podwyższenie temperatury dmuchu powoduje bowiem nie tylko zastąpienie pewnej ilości energii chemicznej koksu przyrostem entalpii fizycznej dmuchu lecz także poprawia wykorzystanie tlenku węgla i sprawność termiczną procesu wielkopiecowego (zmniejszenie ilości i temperatury gazu wielkopiecowego), które wpływają na oszczędność koksu. Wdmuchiwanie paliw zastępczych w mniejszym stopniu poprawia wykorzystanie CO, ale jednocześnie rośnie ilość i temperatura gazu wielkopiecowego, co pogarsza sprawność termiczną pieca. W efekcie mnożnik μ_{ep} przyjmuje w rozpatrywanym przykładzie wartości mniejsze od jedności. Uzyskane w przykładzie rezultaty obliczeń μ_{ep} i μ_{et} świadczą, że podwyższenie temperatury dmuchu jest bardziej efektywnym energetycznie sposobem obniżenia zużycia koksu w wielkim piecu.

W zakończeniu opisu przykładu należy dodać, że całkowe i różniczkowe wskaźniki energetyczne dotyczące nagrzewnic obliczono za pomocą analizy uproszczonej.

7. WPŁYW BŁĘDÓW POMIARÓW I NIEDOKŁADNOŚCI RÓWNAŃ EMPIRYCZNYCH NA DOKŁADNOŚĆ PRZEWIDYWANIA WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH

Na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników całkowych i różniczkowych zespołu wielkopiecowego wpływają błędy jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca oraz niedokładność pomocniczych równań empirycznych. Dla praktycznego zastosowania wyprowadzonych wzorów na wskaźniki energetyczne niezbędna jest analiza wpływu błędów poszczególnych wielkości mierzonych i niedokładności zastosowanych równań empirycznych na dokładność obliczeń wskaźników. Informacje uzyskane z tej analizy posłużą do wyciągnięcia wniosków, które z wielkości mierzonych i które z równań empirycznych należy szczególnie dokładnie wyznaczać.

Błędy wskaźników energetycznych oblicza się na podstawie wyprowadzonych wzorów w oparciu o prawo przenoszenia błędów. Ze względu na złożoną budowę tych wzorów sposób analityczny obliczenia tych błędów jest bardzo żmudny i narażony na popełnienie pomyłki. Dlatego w niniejszej pracy zastosowano metodę różnicową obliczania błędów wskaźników energetycznych [57]

Niech wybrany wskaźnik energetyczny Y opisuje równanie:

$$Y = f(x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n), \tag{73}$$

gdzie x_i oznacza i-tą wielkość mierzoną lub równanie empiryczne.

Średni błąd bezwzględny wskaźnika energetycznego oblicza się według prawa przenoszenia błędów:

$$m_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} m_{xi}\right)^2}, \tag{74}$$

gdzie:

m_Y - średni błąd bezwzględny j-tego wskaźnika energetycznego,

m_{xi} - średni błąd bezwzględny i-tej wielkości, mierzonej lub niedokładność równania empirycznego,

n - liczba wielkości mierzonych i równań empirycznych.

Przy stosowaniu metody różnicowej pochodne cząstkowe we wzorze (74) zastępuje się ilorazami różnicowymi. Dla zadanych parametrów P i t_d obli-

Tablica 2

Wpływ błędów jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca
i niedokładności równań empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych

Wskaźnik energetyczny Y	Przeważający i duży		Mały	Nieznaczny
	$\frac{m_Y(x_i)}{m_Y} > 0{,}5$	$0{,}1 \leqslant \frac{m_Y(x_i)}{m_Y} \leqslant 0{,}5$	$0{,}01 \leqslant \frac{m_Y(x_i)}{m_Y} < 0{,}1$	$\frac{m_Y(x_i)}{m_Y} < 0{,}01$
1	2	3	4	5
K	K_1,	h_k, D_1, t_d, G_1, y_1, v_1, u_1, t_{g1}, φ, ψ, t_g, X_d,	W_{dk}, P_1, h_p, X_{d1}, n_1,	c_k, s_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, w_p, t_c, l, X_{g1},
D	D_1,	t_{d1}, v_1, u_1, t_{g1}, φ, t_g,	W_{dk}, c_k, P_1, h_p, l, X_{d1}, G_1, y_1, n_1, ψ, X_d,	K_1, s_k, h_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, w_p, t_p, X_{g1},
G	D_1,	t_{d1}, G_1, v_1, u_1, t_{g1}, φ, ψ, t_g,	K_1, W_{dk}, c_k, h_k, P_1, h_p, l, X_{d1}, y_1, n_1, X_d,	s_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, w_p, t_p, X_{g1},
E	G_1,	t_{d1}, y_1, v_1, u_1, t_{g1}, φ, ψ, t_g, X_d,	K_1, W_{dk}, c_k, h_k, P_1, h_p, D_1, X_{d1}, n_1,	s_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, w_p, t_p, l, X_{g1},
E_N	D_1,	t_{d1}, G_1, y_1, u_1, t_{g1}, t_{s1}, t_g,	W_{dk}, c_k, P_1, v_1, n_1, φ, t_{dp}, ψ, λ, X_d, ε_{ot},	K_1, s_k, h_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, l, X_{d1}, X_{g1}, X_{go}, t_p,
E_z	G_1,	D_1, t_{d1}, y_1, v_1, u_1, φ, ψ, X_d,	K_1, h_k, P_1, h_p, n_1, t_{g1}, t_{dp}, t_{s1}, t_g, ε_{ot}, λ,	W_{dk}, c_k, s_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, w_p, t_p, l, X_{d1}, X_{g1}, X_{go},
ω_{kp}	ψ,	K_1, W_{dk}, W_{dp}, h_p, G_1, y_1, u_1, φ, t_g,	c_k, s_k, P_1, c_p, l, t_{d1}, v_1, t_{g1}, X_d,	h_k, w_k, s_p, w_p, t_p, D_1, X_{d1}, n_1, X_{g1},
ω_{kt}	K_1, D_1,	W_{dk}, G_1, y_1, t_g, X_d,	c_k, s_k, P_1, l, t_{d1}, u_1, t_{g1}, φ, ψ,	h_k, w_k, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, X_{d1}, v_1, n_1, X_{g1},
ω_{dp}		W_{dk}, c_k, s_k, W_{dp}, c_p, h_p, l, D_1, φ, ψ, t_g,	h_k, s_p, t_{d1}, G_1, y_1, v_1, t_{g1},	K_1, w_k, P_1, w_p, t_p, X_{d1}, u_1, n_1, X_{g1}, X_d,

1	2	3	4	5
ω_{dt}	c_k,	W_{dk}, s_k, D_1, G_1, t_g, X_d,	h_k, X_{d1}, t_{d1}, y_1, v_1, t_{g1}, φ, ψ,	K_1, w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, l, u_1, n_1, X_{g1},
ω_{gp}	ψ,	W_{dk}, c_k, W_{dp}, c_p, h_p, l, φ, t_g,	s_k, h_k, s_p, D_1, t_{d1}, G_1, y_1, v_1, u_1, t_{g1}, X_d,	K_1, w_k, P_1, w_p, t_p, X_{d1}, n_1, X_{g1},
ω_{gt}	c_k,	W_{dk}, s_k, D_1, G_1, y_1, v_1, t_g, X_d,	h_k, l, t_{d1}, u_1, t_{g1}, φ,	K_1, w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, X_{d1}, n_1, X_{g1}, ψ,
ω_{ep}	ψ,	W_{dk}, c_k, h_p, G_1, v_1, ψ, t_g,	K_1, s_k, h_k, P_1, W_{dp}, c_p, l, D_1, t_{d1}, y_1, u_1, t_{g1}, X_d,	w_k, w_p, t_p, X_{d1}, n_1, X_{g1},
ω_{et}	D_1,	W_{dk}, c_k, G_1, y_1, v_1, φ, t_g, X_d,	K_1, s_k, h_k, t_{d1}, u_1, t_{g1},	w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, l, X_{d1}, n_1, X_{g1},
ω_{Np}		W_{dk}, c_k, s_k, W_{dp}, c_p, h_p, l, D_1, φ, ψ, t_g,	h_k, s_p, t_{d1}, G_1, y_1, v_1, t_{g1},	K_1, w_k, P_1, w_p, t_p, X_{d1}, u_1, n_1, X_{g1}, X_d,
ω_{Nt}	c_k,	W_{dk}, s_k, D_1, G_1, t_g, X_d,	h_k, X_{d1}, t_{d1}, y_1, v_1, t_{g1}, φ, ψ,	K_1, w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, l, u_1, n_1, X_{g1},
ω_{zp}	G_1,	h_p, l, t_{d1}, y_1, v_1, u_1, t_{s1}, φ, ψ, X_d,	K_1, W_{dk}, c_k, s_k, h_k, P_1, W_{dp}, c_p, D_1, X_{d1}, t_{g1}, t_{dp}, ε_{ot}, λ,	w_k, s_p, w_p, t_p, n_1, X_{g1}, X_{go}, t_g,
ω_{zt}	D_1,	t_{d1}, G_1, y_1, v_1, t_{g1}, t_{s1}, φ, t_g,	K_1, h_k, u_1, n_1, t_{dp}, ψ, λ, ε_{ot},	W_{dk}, c_k, s_k, w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, t_p, l, X_{d1}, X_{g1}, X_{go}, X_d,
μ_{ep}	ψ,	c_k, h_p, l, φ, t_g,	W_{dk}, s_k, h_k, W_{dp}, c_p, D_1, t_{d1}, G_1, y_1, v_1, u_1, t_{g1}, X_d,	K_1, w_k, P_1, s_p, w_p, t_p, X_{d1}, n_1, X_{g1},
μ_{et}		W_{dk}, c_k, s_k, D_1, G_1, y_1, ψ, t_g, X_d,	h_k, X_{d1}, t_{d1}, v_1, tg_1, φ,	K_1, w_k, P_1, W_{dp}, c_p, s_p, h_p, w_p, l, u_1, n_1, X_{g1}.

cza się wartość wskaźnika Y. Następnie powtarza się obliczenia zmieniając każdorazowo jedną z wielkości x_i o dostatecznie mały przyrost δx_i. Otrzymuje się wówczas dla każdego wskaźnika Y ciąg n wyrażeń w postaci:

$$\delta Y(x_i) = f(x_1, x_2, \ldots, x_i + \delta x_i, \ldots, x_n) - f(x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n). \quad (75)$$

W przybliżeniu zaś można napisać:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \cong \frac{\delta Y(x_i)}{\delta x_i}. \quad (76)$$

Cząstkowy średni błąd bezwzględny oblicza się z równości przybliżonej:

$$m_Y(x_i) \cong \frac{\delta Y(x_i)}{\delta x_i} m_{xi}. \quad (77)$$

W sumie wykonuje się (n+1) indywidualnych obliczeń wskaźników energetycznych dla wybranej pary parametrów P i t_d.

Obliczenie wpływu błędów wielkości mierzonych i niedokładności równań empirycznych na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych przeprowadzono dla wielkiego pieca A. Średnie błędy bezwzględne wielkości mierzonych zamieszczono w tablicy 1. Odchylenia standardowe, przyjęte jako miara niedokładności równań empirycznych, podano w rozdziale 5. Wyniki analizy ujęto w tablicy 2.

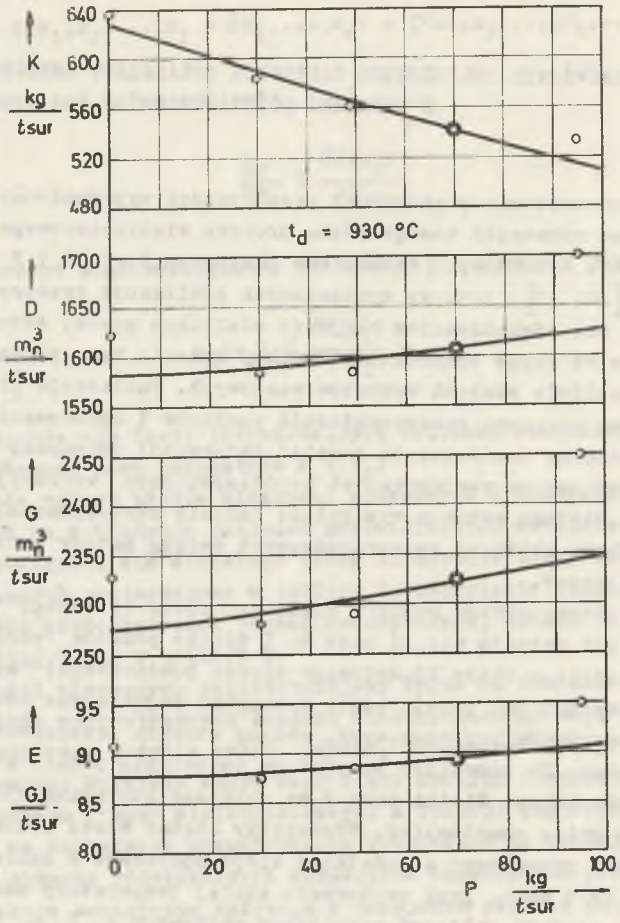
Z wielkości mierzonych najistotniejszy wpływ na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego mają pomiary wskaźnika jednostkowego zużycia koksu, dmuchu, jednostkowej produkcji gazu wielkopiecowego. Mniejszy wpływ mają błędy analizy chemicznej koksu, paliwa zastępczego i gazu wielkopiecowego. Z funkcji empirycznych największy wpływ na dokładność przewidywania wskaźników ma funkcja Ψ, przy czym dotyczy to głównie różniczkowych wskaźników cząstkowych przy t_d = idem. Pozostałe funkcje empiryczne wpływają w mniejszym stopniu na dokładność obliczeń wskaźników.

8. PORÓWNANIE OBLICZONYCH CAŁKOWYCH WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH Z WYNIKAMI DOŚWIADCZEŃ

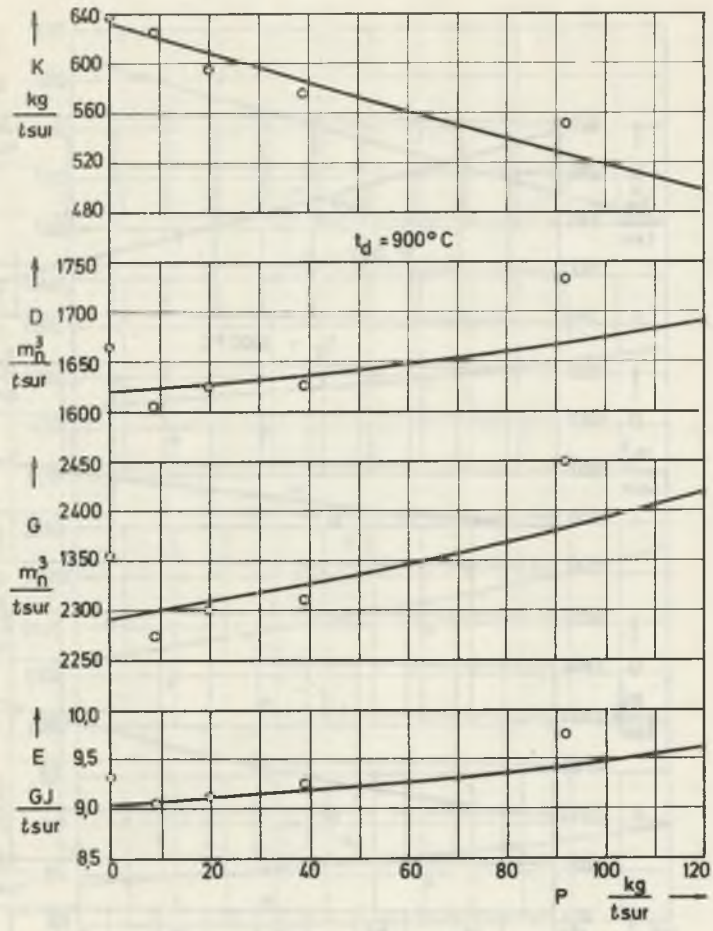
W celu sprawdzenia praktycznej przydatności wyprowadzonych wzorów na przewidywane wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego przeprowadzono porównanie obliczonych wskaźników całkowych K, D, G i E z wynikami doświadczeń [20, 23]. Autorzy wymienionych publikacji przeprowadzili obszerne badania nad wdmuchiwaniem oleju do wielkiego pieca. Autorzy pracy [23] badali również wpływ temperatury dmuchu. Badania były prowadzone przy zachowaniu możliwie stałych warunków wsadowych. Publikacje [20, 23] wskazują na bardzo staranne przeprowadzenie pomiarów i opracowanie ich wyników. Poza tym autorzy zamieszczają komplet informacji począwszy od analizy wsadu a skończywszy na zastosowanych współczynnikach korekcyjnych dla zużycia koksu. Dlatego wybrano wymienione badania eksperymentalne do porównania z wynikami obliczeń przeprowadzonych według metody przedstawionej w niniejszej pracy.

Wyniki jednorazowego pomiaru wielkiego pieca opisanego w [20] ujmuje tablica 1 pod pozycją wielki piec B. Z pięciu punktów pomiarowych (każdy jest średnią z około 20-dniowego okresu pomiarowego) wybrano jako pomiar jednorazowy ten punkt, który wykazywał najmniejsze odchylenia od narzuconych warunków porównawczych, według których przeprowadzono korekcję zużycia koksu. To pozwoliło przyjąć do porównania podane w [20] skorygowane zużycie koksu. Wielki piec B ma objętość użyteczną 838 m^3. Wsad stanowi w 80% spiek samotopliwy. Przeciętny ciężar wsadu netto 1950 kg/t sur. Eksperymenty prowadzono z dodatkiem oleju opałowego w zakresie od 0 do około 100 kg/t sur., przy zachowaniu stałej temperatury dmuchu około 930°C. Porównanie wyników obliczeń wskaźników całkowych K, D, G, E z wynikami pomiarów ujmuje rysunek 23. Autorzy publikacji [20] nie przeprowadzali pomiarów zużycia gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach.

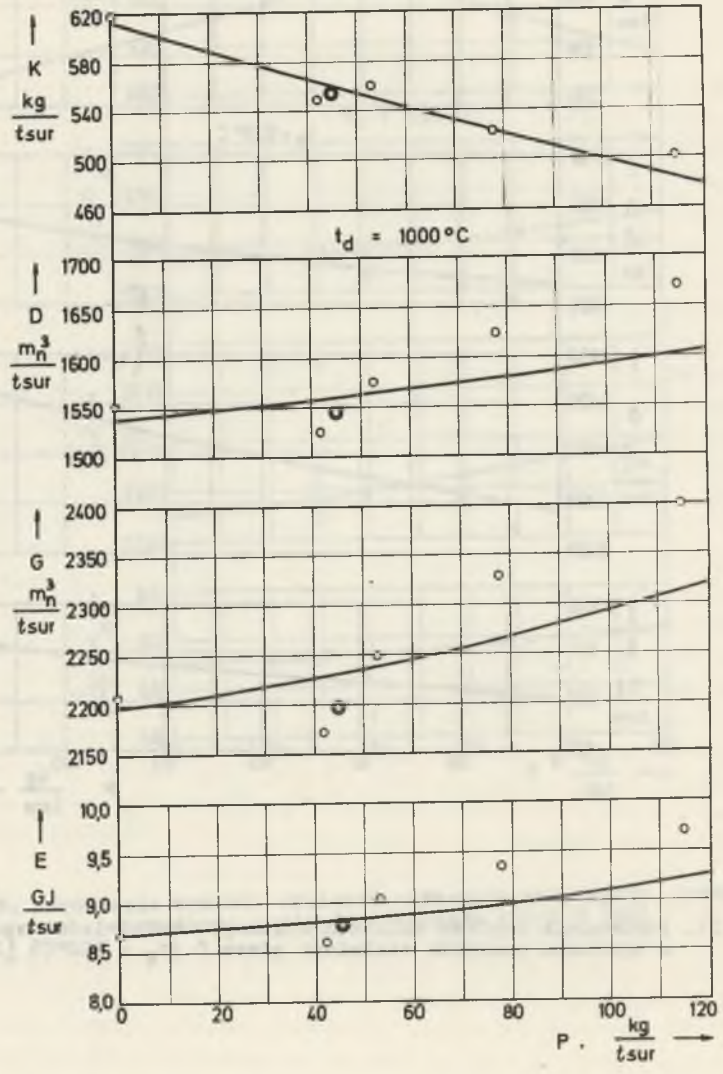
Pod pozycją wielki piec C umieszczono w tablicy 1 wyniki jednorazowego pomiaru wielkiego pieca zakładów w Ruhrort (RFN) [23]. Badania wielkiego pieca C były prowadzone przy zmianie dodatku oleju w zakresie od 0 do 115 kg/t sur. oraz przy jednoczesnej zmianie temperatury dmuchu w granicach 900–1150°C. Wyniki badań ujmują piętnaście punktów pomiarowych (każdy punkt stanowi średnią z około 10-dniowego okresu pomiarowego). Wielki piec C ma objętość użyteczną 963 m^3. Wsad składa się w równych ilościach ze spieku i rud sortowanych. Przeciętny ciężar wsadu netto 1870 kg/t sur. Po-



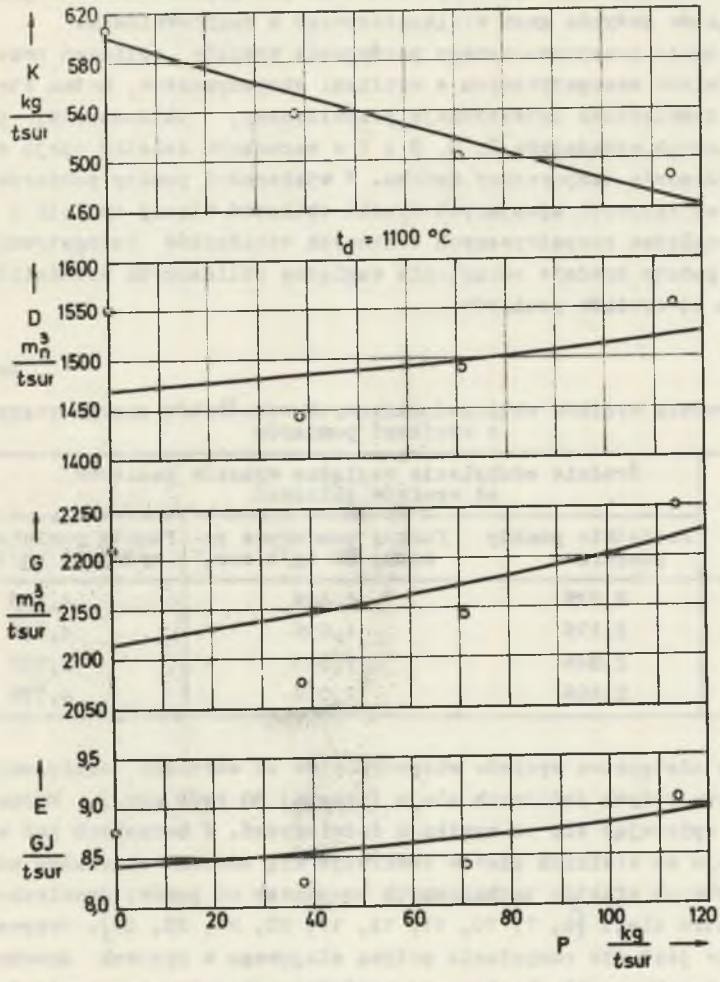
Rys. 23. Porównanie wyników obliczeń całkowych wskaźników energetycznych z wynikami pomiarów wielkiego pieca B [20]



Rys. 24. Porównanie wyników obliczeń całkowych wskaźników energetycznych z wynikami pomiarów wielkiego pieca C (t_d = 900°C) [23]



Rys. 25. Porównanie wyników obliczeń całkowych wskaźników energetycznych z wynikami pomiarów wielkiego pieca C (t_d = 1000°C) [23]



Rys. 26. Porównanie wyników obliczeń całkowych wskaźników energetycznych z wynikami pomiarów wielkiego pieca C (t_d = 1100°C) [23]

równanie wyników obliczeń wskaźników całkowych K, D, G, E z wynikami pomiarów przedstawiono na rysunkach 24÷26. Kolejne rysunki dotyczą serii pomiarowych dla t_d = 900, 1000, 1100°C. Zasady korekcji zużycia koksu przyjęto za autorami publikacji [23]. Podobnie jak poprzednio nie przeprowadzono pomiarów zużycia gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach.

Na podstawie przeprowadzonego porównania wyników obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych z wynikami eksperymentów, można stwierdzić że wyniki doświadczeń potwierdzają przewidywany, obliczeniowy przebieg zmian całkowych wskaźników K, D, G i E w warunkach dodatku oleju opałowego i podwyższenia temperatury dmuchu. W większości punkty pomiarowe nie odbiegają od krzywych ujmujących wyniki obliczeń więcej aniżeli o średnie błędy bezwzględne rozpatrywanych całkowych wskaźników energetycznych. W tablicy 3 podano średnie odchylenia względne obliczonych wskaźników energetycznych od wyników pomiarów.

Tablica 3

Porównanie wyników obliczeń całkowych wskaźników energetycznych z wynikami pomiarów

Całkowy wskaźnik energetyczny	Średnie odchylenie względne wyników pomiarów od wyników obliczeń		
	Wszystkie punkty pomiarowe	Punkty pomiarowe poniżej 80 kg/t sur.	Punkty pomiarowe powyżej 80 kg/t sur.
K	2,01%	1,40%	4,45%
D	2,13%	1,65%	4,05%
G	2,04%	1,66%	3,53%
E	2,56%	2,01%	4,77%

Większe odstępstwa wyników eksperymentów od wartości obliczonych występują przy dużych dodatkach oleju (powyżej 80 kg/t sur.). Można to wytłumaczyć opierając się na wynikach doświadczeń. W badaniach nad wdmuchiwaniem oleju do wielkich pieców obserwuje się bowiem radykalne pogorszenie korzystnych efektów technicznych począwszy od pewnej granicznej wartości dodatku oleju [6, 7, 10, 11, 12, 17, 20, 21, 23, 53]. Przyczyną tego zjawiska jest złe rozpylenie paliwa olejowego w dyszach dmuchu występujące po przekroczeniu krytycznej wartości stosunku strumienia dmuchu do strumienia oleju. Potwierdza to obecność sadzy w gazie wielkopiecowym obserwowana w przypadkach wdmuchiwania dużych ilości oleju opałowego. Obserwowane w praktyce graniczne wartości dodatku oleju odpowiadają w przybliżeniu granicy na wykresach 23÷26, powyżej której występują większe rozbieżności między wynikami eksperymentów a obliczonymi wskaźnikami. W celu zwiększenia dodatku oleju powyżej wartości granicznych proponowane jest zgazowanie tych paliw poza wielkim piecem lub przekształcenie dysz dmuchu w palniki przystosowane do spalania dużych ilości oleju opałowego [6,7,12]

Podany w pracy model matematyczny przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego obowiązuje w zakresie zmian dodatku paliwa zastępczego do wartości granicznych. W tym zaś zakresie można przyjąć, że zgodność wyników obliczeń z wynikami eksperymentów jest zadowalająca.

9. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona w pracy metoda teoretyczno-doświadczalna przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego służy do analizy wpływu dodatku paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu na gospodarkę cieplną wydziału wielkopiecowego. Całkowe wskaźniki energetyczne zużycia koksu i dmuchu, produkcji gazu wielkopiecowego i jego zużycia w nagrzewnicach stanowią mierniki oceny efektów energetycznych wdmuchiwania paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu uzyskane bezpośrednio w zespole wielkopiecowym. Całkowy wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców służy do planowania bilansu gazów palnych oraz do ustalenia wielkości odbiorników buforowych gazu wielkopiecowego w celu zmniejszenia jego strat w warunkach planowanego użycia paliwa zastępczego i podwyższenia temperatury dmuchu. Dla oceny wpływu tych wielkości na całokształt gospodarki energetycznej huty żelaza należy zastosować model matematyczny bilansu materiałowo-energetycznego huty żelaza [48, 58, 60].

Różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne obrazują dynamikę zmian wskaźników całkowych. Stanowią one podstawę do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych takich jak wyznaczenie optymalnego dodatku paliwa zastępczego, optymalnej temperatury podgrzania dmuchu czy też optymalnej częstości rewersji. Służą one także do porównywania efektów energetycznych wdmuchiwania paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu uzyskanych w różnych wielkich piecach oraz do ustalenia uogólnionych równań na różniczkowe wskaźniki energetyczne [47].

Zastosowana w pracy metoda przewidywania wielkopiecowych wskaźników energetycznych jest metodą bilansową typu "input-output". Bazuje bowiem na informacjach dotyczących wejścia i wyjścia procesu. Jest to podejście odmienne od powszechnie spotykanych w literaturze. Pozwoliło ono jednak na uniknięcie założeń dotyczących niedostatecznie poznanych złożonych zjawisk przepływu ciepła i substancji w wielkim piecu. Główne założenia metody bilansowej "input-output" dotyczą stałych procesu utworzonych z łatwo mierzalnych wielkości wejściowych i wyjściowych. Poprawność tych założeń sprawdzono za pomocą analizy statystycznej. Prawdopodobieństwo, że odchylenie stałych procesu od wartości średnich jest mniejsze od błędu wyznaczenia stałych wynosi ponad 0,9, co potwierdza słuszność przyjętych założeń. Wykazano również, że przy zmianach temperatury dmuchu w grani-

cach ± 100 K i w całym zakresie stosowanej zmienności dodatku oleju opałowego, można się posługiwać, z dostateczną dla praktyki dokładnością, uproszczoną metodą wyznaczania zależności $\eta_N = \eta_N(P, t_d)$.

Przeprowadzona analiza wpływu błędów pomiarów i niedokładności równań empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych jest podstawą do wyciągnięcia wniosków, które wielkości należy szczególnie dokładnie mierzyć. Dokładność równań empirycznych można poprawić przez zastosowanie dodatkowych wiarygodnych serii pomiarowych.

Praktyczną przydatność wyprowadzonych w pracy wzorów sprawdzono porównując obliczone wskaźniki z wynikami doświadczeń [20, 23]. W zakresie praktycznie stosowanych dodatków oleju 30÷70 kg/t sur. odstępstwa wyników pomiarów od krzywych obrazujących przebieg wskaźników obliczeniowych mieszczą się w granicach błędów średnich. Większe odstępstwa przy dużych dodatkach oleju wynikają z nieprzystosowania dysz dmuchu do całkowitego zgazowania dużych ilości oleju. Przeprowadzone porównanie potwierdza przydatność opracowanej metody do zastosowań praktycznych.

Podana w pracy metoda przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego posiada następujące zalety w porównaniu z najczęściej stosowaną w praktyce metodą bezpośrednich pomiarów:

a) eliminuje konieczność długotrwałych i trudnych do zrealizowania pomiarów wielkich pieców, przy których byłoby konieczne zastosowanie stałych warunków wsadowych,

b) zapewnia, że błędy wyznaczania wskaźników różniczkowych są kilka do kilkudziesięciu razy mniejsze w porównaniu z metodą pomiarów bezpośrednich.

W odróżnieniu od innych prac teoretyczno-doświadczalnych (za wyjątkiem [46]), w niniejszej pracy podano metodykę obliczania większej liczby praktycznie użytecznych całkowych wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego. Najistotniejszą zaś różnicę stanowi opracowanie analitycznej metody wyznaczania różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych.

10. DODATEK

Sprawdzenie poprawności założeń metody przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego

Z przyjętych w pracy założeń upraszczających najbardziej istotne znaczenie mają założenia a), b), c), d) (rozdział 2) dotyczące stałych procesu wielkopiecowego α, β, γ, δ. Stałe procesu oblicza się z równań (3), (4), (5) i (7) według wyników jednorazowego pomiaru badanego procesu wielkopiecowego:

$$\alpha = K_1 a_k + P_1 a_p - G_1(y_1 + v_1), \tag{78}$$

$$\beta = G_1(u_1 + X_{g1}) - K_1(b_k + e_k) - P_1(b_p + e_p), \tag{79}$$

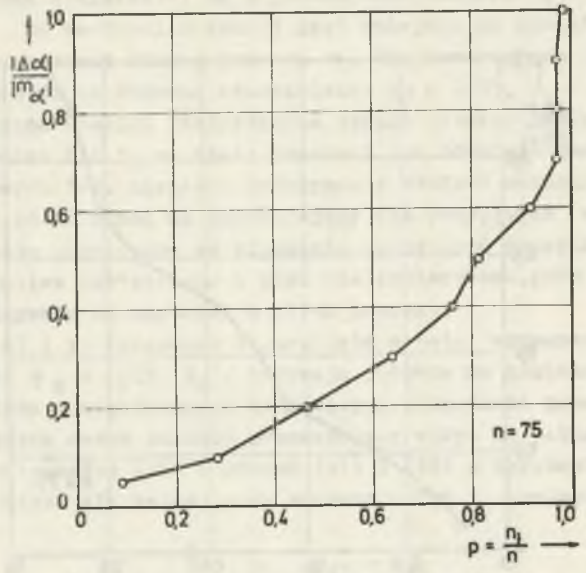
$$\gamma = 0{,}21(D_1 + P_1\, l) - 0{,}5(K_1 b_k + P_1 b_p) - \left[G_1\, 0{,}5(y_1 - u_1) + v_1\right], \tag{80}$$

$$\delta = K_1 W_{dk} + P_1(W_{dp} + i_p + l\, i_1) + D_1(i_{d1} + X_{d1} i_{xd1}) -$$

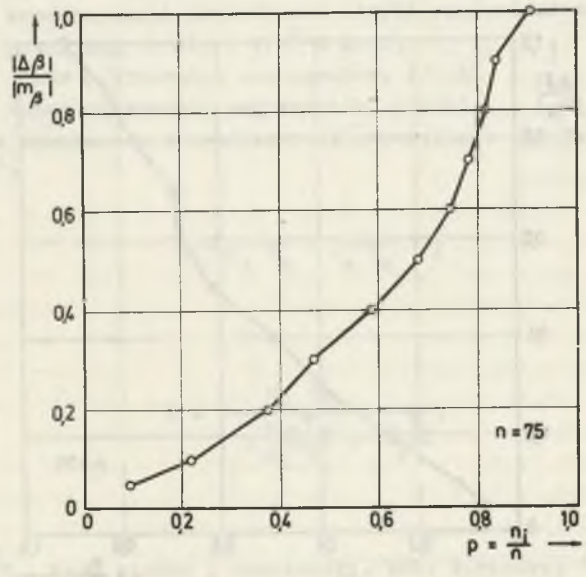
$$- G_1(W_{dg1} + i_{g1} + X_{g1} i_{xg1}). \tag{81}$$

Poprawność przyjętych założeń a), b), c) i d) sprawdzono za pomocą analizy statystycznej wykorzystując materiał doświadczalny zamieszczony w [10, 20, 23, 40, 43, 53]. Dane doświadczalne uzyskano przy stałych warunkach wsadowych i przy przyjęciu, że zmiennymi niezależnymi w procesie były P i t_d. Jako paliwo zastępcze stosowano w tych piecach olej opałowy.

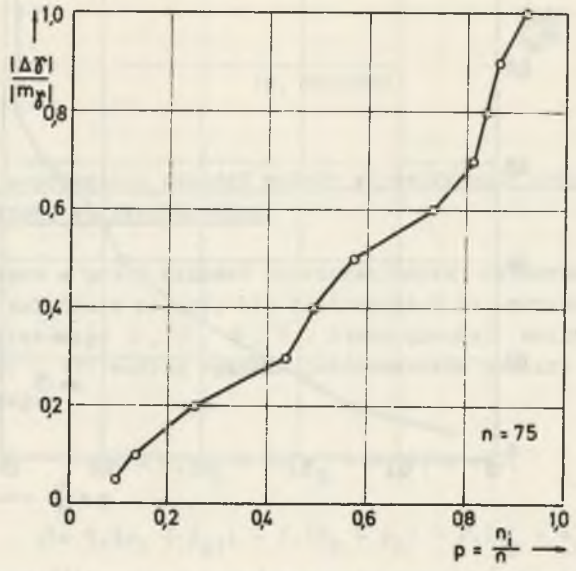
Rozpatrzono 75 pomiarów siedmiu wielkich pieców wybranych w sposób przypadkowy. Według wyników każdego pomiaru wyznaczono z równań (78), (79 (80) i (81) stałe procesu oraz ich średnie błędy bezwzględne. Dla każdej serii pomiarowej, ujmującej pomiary badanego wielkiego pieca, obliczono średnie wartości stałych procesu. Z kolei dla każdego pomiaru i dla każdej ze stałych procesu obliczono stosunek Δ / m odchylenia stałej od wartości średniej do średniego błędu bezwzględnego wyznaczenia stałej procesu. Dla tak utworzonych zmiennych losowych $|\Delta\alpha|/|m_\alpha|$, $|\Delta\beta|/|m_\beta|$, $|\Delta\gamma|/|m_\gamma|$ i $|\Delta\delta|/|m_\delta|$ wykreślano dystrybuanty empiryczne przedstawione na rysunkach 27÷30.



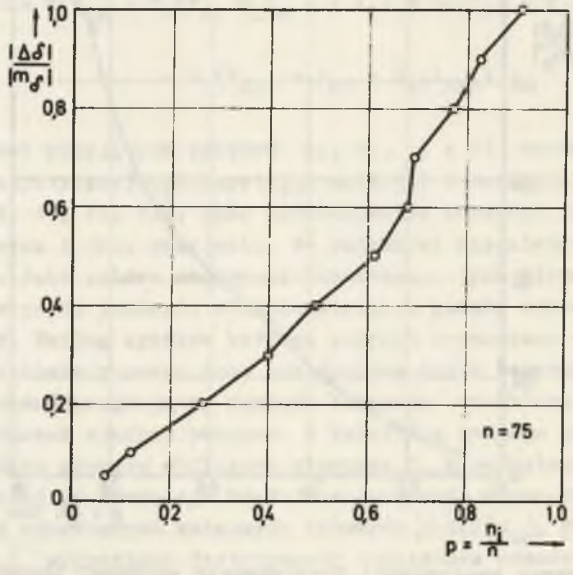
Rys. 27. Wykres empirycznej dystrybuanty zmiennej losowej $|\Delta\alpha|/|m_\alpha|$



Rys. 28. Wykres empirycznej dystrybuanty zmiennej losowej $|\Delta\beta|/|m_\beta|$



Rys. 29. Wykres empirycznej dystrybuanty zmiennej losowej $|\Delta\gamma| / |m_\gamma|$



Rys. 30. Wykres empirycznej dystrybuanty zmiennej losowej $|\Delta\delta| / |m_\delta|$

Dostateczna liczebność i przypadkowy wybór pozwalają traktować rozpatrzoną próbę losową jako reprezentatywną dla zbiorowości generalnej. Wówczas względna częstość n_1/n jest prawdopodobieństwem. Na podstawie np. rysunku 27 można stwierdzić, że z prawdopodobieństwem $p_\alpha = 0{,}99$ odchylenie stałej α od wartości średniej jest mniejsze od średniego błędu bezwzględnego wyznaczenia stałej procesu α. Dla pozostałych stałych procesu prawdopodobieństwa te wynoszą odpowiednio: $p_\rho = 0{,}91$, $p_\gamma = 0{,}92$, $p_\delta = 0{,}91$

Przeprowadzona analiza statystyczna ujmuje zarówno wpływy zdeterminowane (wpływ zmian P i t_d na stałe procesu) jak również działanie czynników przypadkowych (np. niepełne dotrzymanie stałych warunków wsadowych). Wynik analizy można uznać za zadowalający dla przyjętych założeń a), b), c) i d). Ponadto potwierdza on słuszność uproszczeń poczynionych w składzie koksu, paliwa zastępczego i gazu wielkopiecowego, gdyż parametry składu również wpływają na wartości stałych procesu.

Założenia e) i f) (rozdział 3), przyjęte w celu wyznaczenia uproszczonej zależności $\eta_N = \eta_N(P, t_d)$, wpływają jedynie na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych dotyczących gospodarki gazem wielkopiecowym. Z przyjętych dwóch założeń przeważający wpływ ma założenie e). Przy wyznaczaniu zależności (23) z równań (21) i (22) z założenia e) wynika wymaganie spełnienia dla każdej pary zmiennych P i t_d następującej równości:

$$\chi = \frac{\dot{S}_1}{\dot{S}} \cdot \frac{\bar{k}}{\bar{k}_1} \cdot \frac{\tau_{d1} + \tau_{s1}}{\tau_d + \tau_s} = 1 \,, \tag{82}$$

gdzie:

$\bar{k}$, $\bar{k}_1$ – współczynniki przenikania ciepła odniesione do jednego cyklu pracy nagrzewnicy, J/m^2 K cykl,

τ_d, τ_{d1} – czasy ochładzania nagrzewnicy, s/cykl,

τ_s, τ_{s1} – czasy ogrzewania nagrzewnicy, s/cykl.

W analizie uproszczonej współczynnik przenikania ciepła $\bar{k}$ i $\bar{k}_1$ można ująć wzorem[x]:

$$\frac{1}{\bar{k}} = \frac{1}{\alpha_d \tau_d} + \frac{1}{\alpha_s \tau_s} + \frac{1}{\xi} \tag{83}$$

lub

$$\bar{k} = \frac{\alpha_d \tau_d}{1 + \frac{\alpha_d \tau_d}{\alpha_s \tau_s} + \frac{\alpha_d \tau_d}{\xi}}, \tag{83a}$$

[x] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa, 1971.

gdzie:

α_d, α_s - współczynniki wnikania ciepła dla dmuchu i spalin, $W/m^2 K$,

ε - poprawka uwzględniająca opór cieplny przewodzenia w elemencie wypełnienia nagrzewnicy, $J/m^2 K$ cykl.

Po wprowadzeniu równania (83) do (82) i po uwzględnieniu, że strumień dmuchu $\dot{V}_d = \dot{S} D$ a współczynnik wnikania ciepła dla dmuchu jest proporcjonalny do $w_n^{0,8}$ (gdzie w_n oznacza prędkość normalną), otrzymuje się:

$$\chi = \frac{D}{D_1} \left(\frac{\dot{V}_{d1}}{\dot{V}_d}\right)^{0,2} \frac{\vartheta}{\vartheta_1} \cdot \frac{\tau_d}{\tau_{d1}} \cdot \frac{\tau_{d1} + \tau_{s1}}{\tau_d + \tau_s}, \tag{84}$$

gdzie:

$$\vartheta = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_d \tau_d}{\alpha_s \tau_s} + \frac{\alpha_d \tau_d}{\varepsilon}}. \tag{85}$$

Według opublikowanych w [23] wyników badań, prowadzonych w szerokim zakresie zmian temperatury dmuchu i dodatku oleju opałowego, strumień dmuchu zmieniał się na ogół nie więcej jak o 5%. Zmiana $\dot{V}_{d1}/\dot{V}_d$ o 5% powoduje zmianę $(\dot{V}_{d1}/\dot{V}_d)^{0,2}$ o około 1%. Zatem wpływ $(\dot{V}_{d1}/\dot{V}_d)^{0,2}$ na stosunek χ, przy zmianie temperatury dmuchu o 100 K a dodatku oleju w granicach stosowanych w praktyce, jest niewielki.

Zwiększenie temperatury dmuchu o 100 K w zakresie $t_d = 800 \div 1200^{\circ}C$ powoduje, że stosunek D/D_1 zmniejsza się do wartości 0,95 (rys. 3). Równocześnie jednak podwyższenie temperatury dmuchu wpływa na pewne zwiększenie iloczynu stosunków ϑ/ϑ_1, τ_d/τ_{d1}, $(\tau_{d1} + \tau_{s1})/(\tau_d + \tau_s)$. Wynika to przede wszystkim ze zwiększenia α_s. W rezultacie przyjęcie, że zwiększenie temperatury dmuchu o 100 K powoduje zmniejszenie stosunku χ o 5% jest oceną raczej zawyżoną.

Wpływ zmiany dodatku oleju opałowego na stosunek χ należy rozpatrywać oddzielnie dla niewielkich dodatków, przy których obserwuje się zwiększenie wydajności procesu oraz przy dużych ilościach paliwa zastępczego kiedy następuje spadek wydajności. Dodatek paliwa zastępczego nie ma istotnego wpływu na iloczyn stosunków τ_d/τ_{d1} i $(\tau_{d1} + \tau_{s1})/(\tau_d + \tau_s)$. W zakresie zmian dodatku oleju opałowego do 50 kg/t sur. stosunek D/D_1 zmniejsza się do około 0,98 (rys. 3). Zwiększenie strumienia dmuchu w tym zakresie dodatku oleju wpływa na zmniejszenie ϑ/ϑ_1 głównie poprzez zwiększenie α_d. Przy dodatkach oleju $\sim$ 100 kg/t sur. stosunek $D/D_1 \approx 0,95$ (rys. 3), ale z kolei zwiększa się ϑ/ϑ_1 z powodu zmniejszenia wydajności. Stąd przyjęcie, że zmiana dodatku oleju opałowego w granicach wynikających z praktyki wdmuchiwania powoduje odchylenie stosunku χ od jedności o 5%, jest również oceną zawyżoną.

Za pomocą przedstawionej w rozdziale 7 analizy błędów oceniono, że odchylenie wielkości χ o około 8% w stosunku do $\chi = 1$, w zakresie stosowanych w praktyce dodatków oleju i temperatur dmuchu powoduje tego samego rzędu błąd wskaźników E_N, E_z i ω_{zp} co błąd pomiaru wskaźników D_1 lub G_1. Jedynie w przypadku wskaźnika ω_{zt} wpływ odchylenia χ o 8% jest większy niż wpływ błędów jednorazowego pomiaru.

Sprawdzono również wrażliwość wzorów na założenie f), mówiące o stałości współczynnika ε_{ot} względnych strat ciepła z nagrzewnicy do otoczenia. Według analizy błędów (rozdział 7) cząstkowe błędy względne wskaźników E_N, E_z, ω_{zp} i ω_{zt} są mniejsze od 0,1, jeżeli względna zmiana ε_{ot} wynosi 5%.

LITERATURA

1. BABARYKIN N.N., JUSZIN F.A.: Wlijanije nagriewa dutja na rabotu domiennoj pieczi. Stal 1960, nr 5, str. 391.
2. BABARYKIN N.N., JUSZIN F.A.: Opriedielenije stiepieni ispolzowanija wodoroda w domiennoj pieczi. Stal 1966, nr 1, str. 10.
3. BENESCH R., JANOWSKI J., MAZANEK E.: Proces wielkopiecowy. Katowice 1972, "Śląsk".
4. BOGDANDY L., ENGELL H.: Die Reduktion der Eisenerze. Verlag Stahleisen mbH/Düsseldorf, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1967.
5. BOGDANDY L., SCHAEFERS W.: Vergleichbare Bewertung von Wasserstoffträgern für das Einblasen in das Hochofengestell. Stahl und Eisen 1962, nr 1 str. 1.
6. BORGNAT D., COCHERY J.C. i inni: Utilisation des combustibles auxiliaires au haut fourneau. Revue de Métallurgie, 1971, nr 7-8, str.469
7. BORGNAT D., EYGLUNENT B.: Etude de l'injection de "fuel-oil" au haut fourneau. Essais sur modèle réduit d'une tuyère a onde de choc alimentée en vent chaud. Circulaire d'Informations Techniques. Centre de Documentation Sidérurgique, 1972, nr 4, str. 951.
8. BORISOW Ju.S., FOFANOW A.A.: Issliedowanije domiennogo prociessa prirwwiedienii w gorn żidkogo topliwa. Stal 1961, nr 6, str. 492.
9. BRANDI H.T., ISCHEBECK P., BEER H.: Einblasen von Schweröl bei hohen Windtemperaturen voll vorbereitetem Möller und Sauerstoffzusatz.Stahl und Eisen 1963, nr 24, str. 1541.
10. BRUNEAU C.: Observations sur une injection d'huile representant 15% des combustibles consonomes par le haut fourneau 1 d'Hagondange. Circ. Inf. Techn. 1970, nr 12, str. 2641.
11. CORDIER J., GUERBOIS J. i inni: Les injections au haut fourneau. Revue de Métallurgie 1962, nr 10, str. 791.
12. DANCOISNE P., MICHARD J.: Utilisation de combustibles auxiliaires aux hauts fourneaux. Congrès International de Charleroi 1966. Le coke en Siderurgie (D1), str. 1.
13. DECKER A.M.: Thermal aspects of blast furnace fuel injection. Journal of Metals 1961, nr 1, str. 41.
14. FORESI M., CHINAGLIA M.: Iniezione di nafta all' altoforno n. 3 dello Stabilimento Oscar Sinigaglia dell'Italsider. Metallurgia Italiana 1963 nr 1, str. 17.
15. GAŁATONOW A.Ł.: Wlijanije tiempieratury dutja na tiechniko-ekonomiczeskije i tiechnołogiczeskije pokazatieli domiennoj pławki.Stal 1963 nr 10, str. 869.
16. GOLDSZTEJN N.Ł.: Wodorod w domiennom prociessie. Moskwa 1971, Mietałłurgija.
17. GRIMM W.: Eindüsung von Kohlenwasserstoffen in Hochöfen. Brennstoff-Wärme-Kraft 1963, nr 12, str. 571.

18. GUERBOIS I.: Compte rendu succinet des essais d'injection de fuel oil leger au haut fourneau 1 de l'usine de Louvroil. Circ.Inf.Techn. 1962 nr 7-8, str. 1727.

19. GUZIK A.: Model matematyczny procesu cieplnego nagrzewnicy wielkopiecowej. Zeszyty Naukowe WSI Opole 1972, nr 1, str. 5.

20. HAUSWIRTH G., MAYER H.: Ein Jahr Betrieb eines Hochofens der Vöest mit Schweröl und Sauerstoff. Berg- und Hüttenmönische Monatshefte 1963 nr 11, str. 380.

21. HAYASHI S., SUZUKI G., KOBAYASHI T.: Heavy oil injection test at Kawasaki Iron Works of Nippon Kokan Kabushiki Kaisha. Tetsu-to-Hagane-Overseas 1963, nr 4, str. 303.

22. HEYNERT G., BEUTHAN W., SCHROEDER H.F.: Fuel oil injection plus oxygen enrichment; blast furnace performance vs. computer predictions. Blast Furnace and Steel Plant 1964, nr 5, str. 409.

23. ISCHEBECK P., HEYNERT G., BEER H.: Einblasen von Schweröl bei hohen Windtemperaturen und voll vorbereitetem Möller. Stahl und Eisen 1962, nr 22, str. 1476.

24. KITAJEW B.I., JAROSZENKO Ju.G., ŁAZARIEW B.Ł.: Tiepłoobmien w domiennoj pieczi. Moskwa 1966, Mietałłurgija.

25. KNEPPER W.A., WOOLF P.L., SANDERS H.R.: Operation of the Bureau of Mines experimental blast furnace with fuel oil injection. Blast Furnace and Steel Plant 1961, nr 12, str. 1189.

26. LINNIK J.W.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania obserwacji, Warszawa 1962, PWN.

27. MAZANEK E., SABELA W.: Procesy spalania i wymiany ciepła w wielkim piecu. Katowice, 1970, "Śląsk".

28. MICHARD J.: Étude du haut fourneau. Cahier II. Bilan thermique et échanges de chaleur. (Tłum. rosyjskie: Tiepłowyje bałansy i tiepłoobmien w domiennych pieczach. Moskwa 1963).

29. MICHARD J.: Étude théorique de l'injection de fuel, à température de vent constante. Journées Internationales de Sidérurgie,Luxemburg 1962 str. 346.

30. NAGAI T., UMEGAKI K.: Heavy oil injection effects on coke rate in the blast furnace. Congres International de Charleroi 1966. Le coke en Siderurgie (D8), str. 1.

31. NOEL E., MOLDEREZ J., POOS A.: Recent fuel oil injection tests on a blast furnace in Belgium. Iron and Steel 1963, nr 1, str. 22.

32. ONO KACUA, TATEOKA MASATAKI, TAKEI JOSIJO. Tetsu-to-hagane. Journal Iron and Steel Institut of Japan, 1968, nr 12, str. 1268 (R.Ż. Mietałłurgija, Proizwodstwo czuguna, nr 5, 1969).

33. PENRY C.R., CATLOW J.: Blast furnace fuel oil injection practice and results at Ebbw Vale. Journées Internationales de Sidérurgie, Luxemburg 1962, str. 396.

34. PUSZKASZ I.I. i inni: Primienienije mazuta w domiennych pieczach Niżnie Tagilskogo Mietałłurgiczeskogo Kombinata. Biuletyn CNIICzM 1965, nr 17, str. 41.

35. RAMM A.N.: Sprawocznik "Domiennoje proizwodstwo". Rozdział 22 i 23, Moskwa 1963.

36. RENUART L.: Etude d'une marche a 40% d'agglomérés Smidth et injection de fuel lourd n° 2 au haut fourneau n° 7 de l'Ussine de Rehon. Circ. Inf. Techn. 1968, nr 6, str. 1439.

37. RIDGION J.M.: Blast furnace performance with injection at the tuyeres Journal of Iron and Steel Institut 1961, nr 2, str. 135.

38. ROMBOUGH W.R.: Blast furnace fuel oil injection. Journal Metals, 1961 nr 10, str. 743.

39. SAKAYI CHIYOJI: On recent operation of No. 1 blast furnace. Blast Furnace and Steel Plant 1964, nr 3, str. 244.

40. SCHUMACHER H.: Erfahrungen beim Betrieb eines Hochofens mit hohen Temperaturen. Stahl und Eisen 1966, nr 6, str. 309.

41. SCHÜRMANN E., BÜLTER D.: Vorausberechnung des Koksverbrauches im Hochofen auf Grund einer zweistufigen Wärme- Stoff- und Reduktionsbilanz. Archiv für das Eisenhüttenwesen 1964, nr 8, str. 677.

42. SENKARA T.: Prawo ograniczonego wzrastania w technice cieplnej. Archiwum Procesów Spalania 1972, nr 1, str. 29.

43. Sprawozdanie Głównego Technologa Huty "Pokój" z badań nad wdmuchiwaniem mazutu w wielkim piecu A w 1971 r. Opracowanie wewnętrzne.

44. SUNCOW G.N., PRIBAWIN N.W.: Stiepień ispolzowanija wodoroda w domiennych pieczach. Stal 1971, nr 3, str. 203.

45. SZARGUT J.: Energetyka cieplna w hutnictwie. Katowice 1972, "Śląsk".

46. SZARGUT J.: Wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1967, Energetyka z. 26. str. 5.

47. SZARGUT J., ZIĘBIK A.: Równania praktyczne ujmujące wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1968, Energetyka z. 29, str. 25.

48. SZARGUT J., ZIĘBIK A.: Analiza wpływu podwyższenia temperatury dmuchu na gospodarkę energetyczną huty żelaza. Gospodarka Paliwami i Energią 1973, cz. I - nr 6, str. 3, cz. II - nr 7, str. 11.

49. SZARGUT J., ZIĘBIK A.: Zastosowanie bilansów substancji i energii do określania wpływu temperatury dmuchu na wskaźniki cieplne procesu wielkopiecowego. Archiwum Hutnictwa 1974, nr 4, str. 395.

50. SZARGUT J., ZIĘBIK A., KURPISZ K.: Badania wpływu użycia paliw zastępczych w wielkim piecu na skład, ilość i temperaturę gazu wielkopiecowego. Praca Zlecona ITC Pol. Śl., dla Huty "Pokój", Gliwice, 1971-72.

51. TRENSE R.V., ROSBOROUGH D.F.: Fuel oil injection:comparison of actual performance with predictions made using a mathematical model. British Iron and Steel Institute. Autumn Meeting. London 1961, Special Raport nr 72, str. 53.

52. WAGENER J.M., MAJERUS N.: Compte rendu essais d'injection de fuel léger dans la conduite à vent chaud du haut fourneau II de Belval (Arbed). Rev. Univ. Min. Metall. 1962, nr 7, str. 499.

53. WAXWEILER P., LORANG J. i inni: Injection de fuel-oil extra-lourd par les tuyeres d'un haut fourneau de l'ARBED. Journées Internationales de Siderurgie. Luxemburg 1962, str. 417.

54. WILD R.: Simple method of calculating the change in furnace performance when fuel or steam injection is practised. Iron and Coal 1961, nr 4869, str. 1007.

55. YOSHIYUKI MURAI: L'iniezione massiccia di nafta in altoforno Technical Meeting Italsider - Nippon Steel. Genova 1971. Atti della Sessione Area Ghisa.

56. ZIĘBIK A.: Wpływ temperatury dmuchu na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. 1967, Energetyka z. 26, str. 25.

57. ZIĘBIK A.: Analiza dokładności przewidywania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. 1968, Energetyka z. 29, str. 51.

58. ZIĘBIK A.: Model matematyczny bilansu materiałowo-energijnego surowcowej huty żelaza. Dysertacja doktorska. Politechnika Śląska 1969.

59. ZIĘBIK A.: Wpływ podwyższenia temperatury dmuchu i zużycia mazutu na obciążenie cieplne nagrzewnic wielkopiecowych. Praca zlecona ITC Pol. Śl. dla Huty "Pokój", Gliwice 1973.

60. ZIĘBIK A.: Wpływ dodatku paliw zastępczych w wielkim piecu na gospodarkę energetyczną huty żelaza. Materiały Konferencji SITPH "Postęp w energetyce hutniczej", Kraków 1974, str. 99.

61. 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., Energetyka (w druku).

62. ZISCHKALE W., HEYNERT G., BEER H.: Auswirkung der Heisswindtemperaturen auf die Betriebsergebnisse des Hochofens. Stahl und Eisen, 1963, nr 18, str. 1117.

WPŁYW DODATKU PALIW ZASTĘPCZYCH I PODGRZANIA DMUCHU NA GOSPODARKĘ CIEPLNĄ WYDZIAŁU WIELKICH PIECÓW

S t r e s z c z e n i e

Dodatek paliw zastępczych i podwyższenie temperatury dmuchu w wielkim piecu wpływają na zużycie koksu, dmuchu, na ilość i energię chemiczną wytwarzanego gazu wielkopiecowego, na obciążenie cieplne nagrzewnic i na ilość gazu dla zewnętrznych odbiorców (baterie koksownicze, piece grzejne kotłownia). Wielkości te odniesione do jednostki surówki noszą nazwę całkowych wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego. Stanowią one mierniki oceny efektów energetycznych wdmuchiwania paliw zastępczych i podgrzania dmuchu. Dynamikę zmian badanych wskaźników całkowych obrazują różniczkowe cząstkowe wskaźniki energetyczne. Służą one także do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych (takich, jak wyznaczenie optymalnego dodatku paliwa zastępczego, optymalnej temperatury dmuchu, optymalnej częstości rewersji) oraz do porównywania efektów energetycznych uzyskanych w różnych piecach i do ustalenia uogólnionych równań na różniczkowe wskaźniki energetyczne.

W pracy podano metodę przewidywania całkowych i różniczkowych cząstkowych wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego w warunkach dodatku paliw zastępczych i podwyższenia temperatury dmuchu w wielkim piecu. Opracowana metoda prognozy jest teoretyczno-doświadczalną metodą bilansową typu "input-output". Podstawą części teoretycznej są zasady zachowania ilości substancji i energii oraz prawa rządzące przepływem ciepła w nagrzewnicach. Część empiryczna dotyczy zbadania wpływu dodatku paliw zastępczych i temperatury dmuchu na stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym i stosunek H_2 w gazie wielkopiecowym do wodoru doprowadzonego do strefy dysz a także na temperaturę gazu wielkopiecowego i zawilżenie dmuchu. Każda z zależności empirycznych zawiera jeden nieznany a priori parametr uwzględniający specyfikę badanego wielkiego pieca. Do części doświadczalnej należy również jednorazowy pomiar cieplny badanego wielkiego pieca. Wyniki tego pomiaru służą do wyznaczenia stałych procesu występujących w równaniach bilansowych oraz do określenia nieznanych parametrów w równaniach empirycznych.

Równania teoretyczne podane w pracy odnoszą się do przypadku wdmuchiwania oleju opałowego i gazu ziemnego. Można je jednak bez trudności przystosować do pozostałych paliw zastępczych. Część empiryczna pracy została podana dla oleju opałowego. Poprawność przyjętych w części teoretycznej założeń odnośnie stałych procesu sprawdzono za pomocą analizy statystycznej. W pracy sporządzono pełny przykład obliczeniowy dla wielkiego pieca jednej z polskich hut. Przeprowadzono również analizę wpływu błędów pomiarów i niedokładności równań empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych. Porównanie obliczonych wskaźników całkowych z wynikami doświadczeń 20, 23 potwierdziło praktyczną przydatność opracowanej metody w zakresie stosowanych dodatków oleju opałowego.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЗАМЕНИТЕЛЕЙ КОКСА И ПОДОГРЕВА ДУТЬЯ НА ТЕПЛОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ДОМЕННОГО ЦЕХА

Р е з ю м е

Добавки заменителей кокса и повышение температуры дутья влияют на расход кокса и дутья, на количество и химическую энергию колошникового газа, на тепловую нагрузку воздухонагревателей, а также на количество газа для внешних потребителей (коксовальные и нагревательные печи, котельная). Эти величины, отнесённые к единице чугуна, называются интегральными показателями доменного агрегата. Они предназначены к оценке энергетических эффектов инжекции заменяющих топлив и подогрева дутья. Для оценки темпа изменения интегральных показателей вводятся дифференциальные частные показатели. Они полезны при решении проблем оптимизации (например, определение оптимальной добавки заменителя кокса, оптимальной температуры дутья, оптимальной частоты реверсии), а также при сравнении энергетических эффектов, полученных в разных печах и при определению практических уравнений на дифференциальные частные показатели.

В работе приведен метод прогнозирования интегральных и дифференциальных частных показателей доменного агрегата в условиях инжекции заменителей кокса и повышения температуры дутья. Разработанный метод прогнозирования является теоретически-эмпирическим методом балансов типа "input-output". В теоретической части используются уравнения материального баланса C, S, H, O и N и баланса энергии, а также закон теплообмена в воздухонагревателях. В эмпирической части следует определить влияние добавок заменителей кокса и температуры дутья на отношение CO/CO_2 в колошниковом газе и отношение H_2 в колошниковом газе к количеству H_2, подаваемого в фурменную зону, а также на температуру колошникового газа и влажность дутья. Эти уравнения представляют однопараметровые семейства поверхностей. Параметр учитывает специфические свойства исследованной доменной печи. Для практического использования выведенных формул следует провести единичное тепловое измерение доменной печи. На основании результатов этого измерения определяются константы процесса в балансовых уравнениях и неизвестные параметры в эмпирических уравнениях.

Теоретическая часть удовлетворяет каждой из добавок заменителей кокса. Эмпирическая часть касается только мазута. Правильность предложений, принятых в теоретической части, проверена при использовании статистического ана-

лиза. В работе приведен расчётный пример для доменной печи одного из польских заводов чёрной металлургии. В работе проведен также анализ влияния ошибок измерений и неточности эмпирических уравнений на точ прогнозирования энергетических показателей. Сравнение вычислительных гральных показателей с результатами исследований [20, 23] подтвердило олезность разработанного метода в диапазоне применяемых на практике добавок мазута в доменных печах.

THE EFFECT OF INJECTING AUXILIARY FUELS AND OF HEATING BLAST UPON THE HEAT ECONOMY OF BLAST FURNACES

S u m m a r y

The injection of auxiliary fuels and the increase of temperature in a blast furnace influence the consumption of coke, and blast, the amount and chemical energy of the produced top gas, as well as the heat release of the cowpers and the amount of gas delivered to other consumers (coke batteries, heaters, boilers). These magnitudes are related to the unit of pig iron mass and have been called integral energy characteristics of the blast furnace process. These are the standards for the evaluation of the energy effects of injecting auxiliary fuels into the blast furnace and of heating blast. The dynamics of changes in the investigated integral energy characteristics is exemplified by the partial differential energy characteristics, which help to solve problems of optimization (i.e. such problems as the determination of the optimal addition of auxiliary fuel, the optimal temperature of the blast, the optimal frequency of reversion) as well as to compare the energy effects obtained in various furnaces and to set up generalized equations for the differential energy characteristics.

The paper provides a method for the forecasting of both the integral and partial differential energy characteristics of a blast furnace unit when auxiliary fuels are being injected and the furnace is being raised. The developed method of forecasting is a theoretically experimental method of the "input-output" type. The theoretical part of this method is based on the balances of substances and energy and on the laws which govern the heat flow in the cowpers. The empirical part deals with the investigation of the effect of injecting auxiliary fuels and of the blast temperature upon the CO/CO_2 ratio in the top gas and the relation of H_2 in the top gas to the hydrogen that is introduced into the combustion zone as well as on the temperature of the top gas and the humidity of the blast. Each one of these empirical relations contains one parameter, which is a priori unknown and takes into account the specific character of the investigated blast furnace process. The experimental part includes also one single thermal measurement of the investigated blast furnace process. The results of this measurement are utilized in the determination of the pro-

cess constants occurring in the balance equations and in the determination of unknown parameters in empirical equations.

The theoretical equations quoted in the paper refer to the case when fuel oil and natural gas are injected. They may be, however, easily adapted for the purpose of other auxiliary fuels, too. The empirical part of the paper refers to fuel oil. The correctness of assumptions suggested in the theoretical part concerning the process constants was checked by means of statistical analysis. The paper provides a full example of calculations for a blast furnace in one of the Polish ironworks.

There has been also analysed the influence of errors in the measurements and of the inaccuracy of empirical equations upon the exactitude of forecasting the energy characteristics. A comparison of the calculated integral energy characteristics with experimental results [20, 23] has confirmed the practical usability of this method in applied limits of the consumption of fuel oil.

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ukazują się w następujących seriach:

A. AUTOMATYKA
B. BUDOWNICTWO
Ch. CHEMIA
E. ELEKTRYKA
En. ENERGETYKA
G. GÓRNICTWO
H. HUTNICTWO
IS. INŻYNIERIA SANITARNA
JO. JĘZYKI OBCE
MF. MATEMATYKA-FIZYKA
M. MECHANIKA
NS. NAUKI SPOŁECZNE
O ORGANIZACJA

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty serii En:

Energetyka z. 1, 1956 r., s. 174, zł 26,—
Energetyka z. 2, 1957 r., s. 118, zł 24,—
Energetyka z. 3, 1959 r., s. 62, zł 7,—
Energetyka z. 4, 1960 r., s. 113, zł 22,80
Energetyka z. 5, 1961 r., s. 103, zł 16,25
Energetyka z. 6, 1961 r., s. 55, zł 4,15
Energetyka z. 7, 1961 r., s. 60, zł 5.50
Energetyka z. 8, 1961 r., s. 50, zł 3,70
Energetyka z. 9, 1962 r., s. 127, zł 9,55
Energetyka z. 10, 1962 r., s. 73, zł 5,50
Energetyka z. 11, 1963 r., s. 178, zł 9,30
Energetyka z. 12, 1964 r., s. 89, zł 4,65
Energetyka z. 13, 1964 r., s. 109, zł 8,10
Energetyka z. 14, 1964 r., s. 104, zł 8,15
Energetyka z. 15, 1964 r., s. 69, zł 4,65
Energetyka z. 16, 1964 r., s. 149, zł 7,50
Energetyka z. 17, 1964 r., s. 152, zł 7,10
Energetyka z. 18, 1965 r., s. 128, zł 6,40
Energetyka z. 19, 1965 r., s. 92, zł 6,—
Energetyka z. 20, 1965 r., s. 90, zł 4,70
Energetyka z. 21, 1966 r., s. 120, zł 8,—
Energetyka z. 22, 1966 r., s. 111, zł 6,—
Energetyka z. 23, 1966 r., s. 64, zł 5,—
Energetyka z. 24, 1967 r., s. 100, zł 5,—
Energetyka z. 25, 1967 r., s. 176, zł 10,—
Energetyka z. 26, 1967 r., s. 106, zł 6,—
Energetyka z. 27, 1967 r., s. 132, zł 8,—
Energetyka z. 28, 1968 r., s. 239, zł 1[illegible],—
Energetyka z. 29, 1968 r., s. 191, zł 10,—
Energetyka z. 30, 1969 r., s. 129, zł 7,—
Energetyka z. 31, 1969 r., s 171, zł 8,50
Energetyka z. 32, 1969 r., s. 90, zł 4,50
Energetyka z. 33, 1969 r., s. 97, zł 5,50
Energetyka z. 34, 1970 r., s. 354, zł 14,50
Energetyka z. 35, 1970 r., s. 169, zł 10,50
Energetyka z. 36, 1970 r., s. 134, zł 8,—
Energetyka z. 37, 1970 r., s. 107, zł 6,—
Energetyka z. 38, 1971 r., s. 102, zł 7,—
Energetyka z. 39, 1971 r., s. 122, zł 8,—
Energetyka z. 40, 1971 r., s. 118, zł 8,—
Energetyka z. 41, 1972 r., s. 46, zł 4,—
Energetyka z. 42, 1972 r., s. 70, zł 4,—
Energetyka z. 43, 1972 r., s. 90, zł 6,—
Energetyka z. 44, 1972 r., s. 74, zł 5,—
Energetyka z. 45, 1973 r., s. 161, zł 10,—
Energetyka z. 46, 1973 r., s. 102, zł 7,—
Energetyka z. 47, 1973 r., s. 128, zł 8,—
Energetyka z. 48, 1974 r., s. 108, zł 6,—
Energetyka z. 49. 1974 r., s. 104, zł 7,—
Energetyka z. 50. 1974 r., s. 130, zł 8,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3349/75/55

Druk. Pol. Śl. 1684-60 60 000

Cena zł 9,–