

Andrzej ZIĘBIK, Wojciech STANEK

## ZASTOSOWANIE PYŁU WĘGLOWEGO JAKO PALIWA ZASTĘPCZEGO W WIELKIM PIECU

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono ocenę efektów energetycznych towarzyszących wdmuchiwaniu pyłu węglowego jako paliwa zastępczego do wielkich pieców. Zastosowano metodę bilansową „input-output” przewidywania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego. Przeprowadzono analizę ilościową wpływu dodatku pyłu węglowego na jednostkowe zużycie koksu i dmuchu, na jednostkową produkcję gazu wielkopiecowego oraz na jednostkowe zużycie gazu w nagrzewnicach i ilość gazu dla zewnętrznych odbiorców. Przedstawiono również wyniki weryfikacji zastosowanej metody bilansowej.

## APPLICATION OF COAL DUST AS AUXILIARY FUEL IN BLAST FURNACES

**Summary.** The paper presents an evaluation of the energy effects of coal dust injection into the tuyere zone of a blast furnace. The “input-output” balance method of predicting the energy characteristics of a blast-furnace plant has been taken into account. The quantitative analysis of the influence of coal dust injection concerns the following energy characteristics: specific consumption of coke and blast, specific production of top-gas and specific consumption of top-gas in Cowper-stoves, as well as by external consumers. The results of the verification of the „input-output” balance method have been presented, too.

## ПРИМЕНЕНИЕ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ КАК ЗАМЕНИТЕЛЯ КОКСА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Резюме.** В работе представлена оценка энергетических эффектов добавки угольной пыли как заменителя кокса в доменной печи. Применен балансный метод прогнозирования энергетических показателей доменного цеха. Сделан анализ влияния добавки угольной пыли на удельный расход кокса, дутья, удельное количество химической энергии доменного газа, удельный расход химической энергии доменного газа в нагревателях дутья и количество доменного газа снабжающего газоэнергетическую систему металлургического завода.

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o koszcie produkcji surówki w procesie wielkopiecowym jest zużycie koksu. Funkcje energetyczna i chemiczna spełniane przez koks w wielkim piecu mogą być częściowo zastępowane przez inne paliwa wdmuchiwane do strefy dysz, zwane paliwami zastępczymi. Jako paliwa zastępcze można stosować:

- a) paliwa gazowe: gaz ziemny, gaz koksowniczy,
- b) paliwa ciekłe: oleje opałowe (szczególnie mazut),
- c) paliwa stałe: głównie węgiel kamienny w postaci pyłu.

Przy doborze rodzaju paliwa zastępczego powinno się uwzględnić następujące kryteria:

- a) wielkość nakładów inwestycyjnych na instalacje przygotowania i wdmuchiwanie paliwa zastępczego,
- b) wartość współczynnika zamiany koksu przy stosowaniu danego rodzaju paliwa oraz stosunek ceny jednostki paliwa zastępczego do ceny jednostkowej koksu,
- c) wpływ wdmuchiwanie danego rodzaju paliwa zastępczego na wskaźniki energetyczne i technologiczne procesu wielkopiecowego (kryterium to obejmuje wpływ wdmuchiwanie paliwa na zwiększenie wydajności procesu).

Wdmuchiwanie paliw gazowych pociąga za sobą najniższe nakłady inwestycyjne na dodatkowe instalacje. Koszt inwestycyjny instalacji do wdmuchiwanie paliw ciekłych jest mniejszy niż dla paliw stałych i większy niż dla paliw gazowych i obejmuje koszt urządzeń do magazynowania, podgrzewania i transportu paliwa do dysz wielkiego pieca. Zdecydowanie największe nakłady inwestycyjne towarzyszą wdmuchiwanie pyłu węglowego, jednak od czasu ostatniego kryzysu energetycznego, kiedy to gwałtownie wzrosły ceny oleju opałowego i gazu ziemnego, pył węglowy jest najczęściej stosowanym paliwem zastępczym w wielkich piecach hut Zachodniej Europy. Obecnie ilość wdmuchiwanego pyłu przekracza 150 kg/t sur. przy równoczesnym zużyciu koksu poniżej 300 kg/t sur.

Porównanie nakładów inwestycyjnych w odniesieniu do jednostkowej ilości wdmuchiwanego paliwa zastępczego przedstawiono w tablicy 1 [16]:

**Tablica 1**

**Nakłady inwestycyjne na instalacje wdmuchiwanie paliwa zastępczego do wielkiego pieca [16]**

Rodzaj paliwa zastępczego	Nakłady inwestycyjne w odniesieniu do jednostkowej ilości wdmuchiwanego paliwa zastępczego [\$/t paliwa]
1. Gaz ziemny	2,5 – 4,0
2. Olej opałowy	10,0 – 15,0
3. Pył węglowy	90,0 – 100,0

Podstawą decyzji o zastosowaniu wdmuchiwania pyłu węglowego powinna być analiza ekonomiczna uwzględniająca ilościową ocenę efektów energetycznych towarzyszących wdmuchiwaniu pyłu węglowego.

W niniejszej pracy przedstawiono ocenę efektów energetycznych w przypadku Huty Katowice. Prognozy tej dokonano metodą teoretyczno-doświadczalną tak zwaną metodą „input-output” [13]. Dodatkowo przedstawiono weryfikację tej metody opierając się na danych eksploatacyjnych wielkiego pieca pracującego z wdmuchiwaniem pyłu węglowego oraz omówiono typowe instalacje wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkiego pieca.

## 2. TECHNOLOGIA WDMUCHIWANIA PYŁU WĘGLOWEGO

Instalacje wdmuchiwania pyłu zasilane są z instalacji przygotowania (mieleń i suszenie pyłu) za pomocą instalacji transportu pneumatycznego. Nośnikiem pyłu jest najczęściej sprężone i osuszone powietrze. Zadaniem instalacji wdmuchiwania jest zasilanie dysz wielkiego pieca określonymi ilościami pyłu węglowego. Należy pamiętać, by ilość zimnego czynnika transportującego pył do dysz wielkiego pieca była możliwie jak najmniejsza, gdyż wpływa ona na obniżenie temperatury w strefie dysz. Mieszanina pyłowo-powietrzna nie może być podgrzewana ze względu na możliwość wystąpienia samozapłonu.

Wśród instalacji wdmuchiwania pyłu węglowego można wyróżnić:

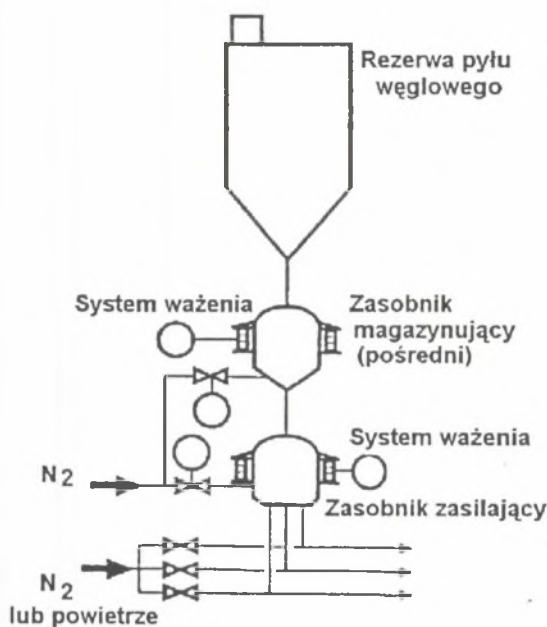
1. Instalacje bazujące na zasilaniu pyłem węglowym z zasobnika ciśnieniowego przewodów doprowadzających pył do dysz lub jednego przewodu zbiorczego.
2. Instalacje wyposażone w mechaniczne urządzenia zasilające przewody transportujące pył do dysz.

### 2.1. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych

#### 2.1.1. *Przykład instalacji z indywidualnym zasilaniem z zasobnika ciśnieniowego (Projekt firmy Petrocarb Inc)*

Na rysunku 1 przedstawiono schemat instalacji z indywidualnym zasilaniem ze zbiornika ciśnieniowego. Pył węglowy pod wpływem podwyższonego ciśnienia opuszcza zasobnik zasilający, następnie w tzw. „trójniku” zostaje zassany przez strumień sprężonego azotu lub powietrza, za pomocą którego transportuje się go do odpowiedniej dyszy. Zbiornik ciśnieniowy posiada liczbę wylotów równą liczbie dysz w wielkim piecu.

Zbiornik ciśnieniowy jest zasilany sprężonym azotem (gazem obojętnym), który pozwala utrzymywać odpowiednią nadwyżkę ciśnienia względem ciśnienia w okrężnicy dmuchu wielkopiecowego. Azot służy również do utrzymywania



Rys. 1. Schemat instalacji z indywidualnym zasilaniem z zasobnika ciśnieniowego (Projekt Petrocarb Inc)

Fig. 1. Schematic of the Petrocarb system based on individual feeders from a pressurized injection vessel

Przedstawiony system pozwala na dozowanie pyłu z dokładnością  $\pm 3\%$  wartości zadanej. Przedstawiony układ zastosowano w Hucie Thyssen Stahl (Niemcy).

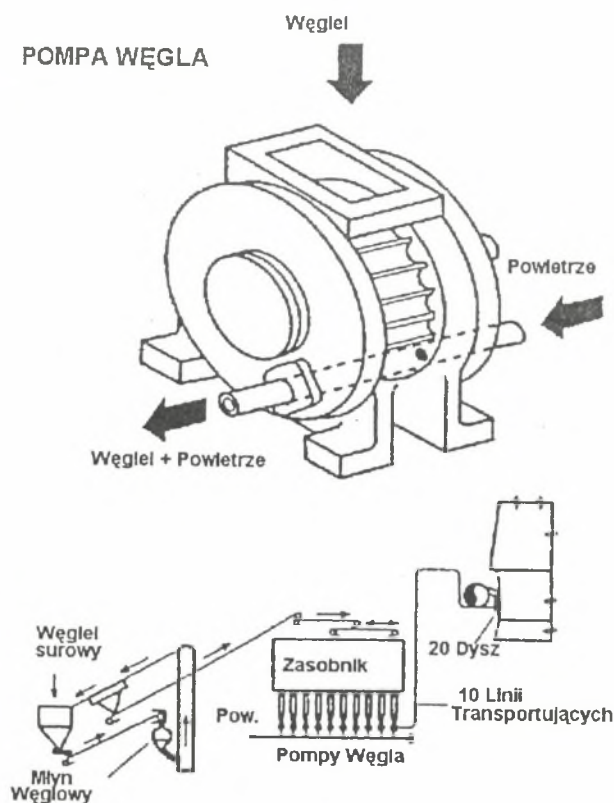
### 2.1.2. Przykład instalacji z tzw. „pompami węgla” (Projekt firmy Koppers)

Jest to instalacja zaliczana do grupy instalacji z mechanicznym dozowaniem pyłu. Na rysunku 2 przedstawiono system wdmuchiwania firmy Koppers. Podstawowym elementem układu są tak zwane pompy węgla, których zadaniem jest dozowanie pyłu do przewodów zasilających dysze. Głównym elementem pompy jest wirnik z kieszeniami umieszczony w ściśle dopasowanej obudowie. Pył z zasobnika opada pod wpływem sił ciężkości do otworu na górze pompy i przenoszony jest w kieszeniach do punktu wyładowczego, w którym jest porywany przez przepływające powietrze. Wydajność jest regulowana przez zmianę prędkości obrotowej pompy.

Podstawowe wady tej instalacji to: szybkie zużywanie się wirnika pompy oraz stosunkowo duże straty powietrza przez nieszczelności.

nia stężenia tlenu w zbiorniku poniżej stężenia odpowiadającego granicy palności.

Porcje pobieranego pyłu ze zbiornika są określane przez system ważenia (ogniwa obciążnikowe). Jeżeli ilość wdmuchiwanego pyłu odchyła się od zadanej wartości korektę przeprowadza się poprzez zmianę ciśnienia w zasilającym zbiorniku ciśnieniowym. Jeżeli ilość pyłu w zbiorniku zasilającym spadnie poniżej nastawionej wartości, zostaje podwyższone ciśnienie w zbiorniku magazynującym (pośrednim) do tego samego poziomu co w zbiorniku zasilającym. Podczas ładowania zbiornika zasilającego ciśnienie jest utrzymywane na stałym poziomie (nie ma w tym czasie możliwości korygowania ilości wdmuchiwanego pyłu).



Rys. 2. Schemat instalacji z tzw. „pompami węgla” (Projekt firmy Koppers)

Fig. 2. Schematic of the Koppers system

### 2.1.3. Instalacja z dozowaniem pyłu przez obrotowe zawory zasilające (Projekt firmy Paul Wurth Company)

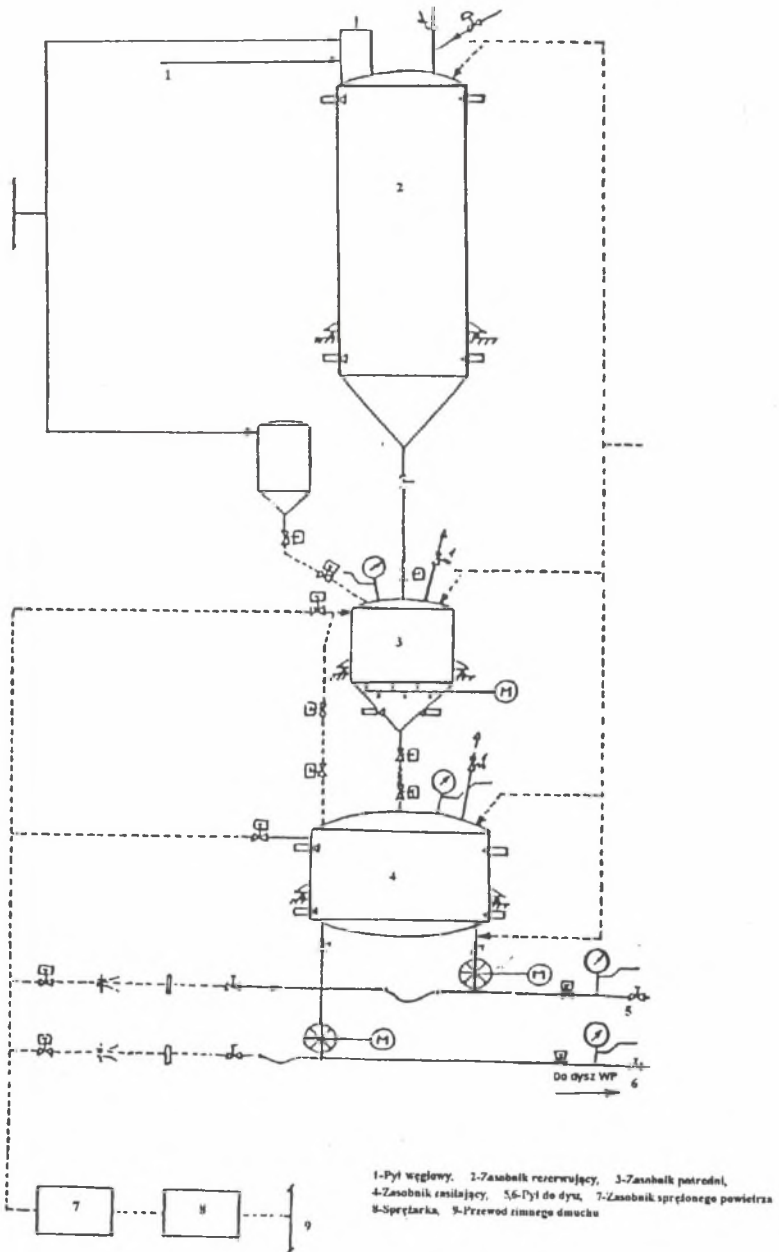
Na rysunku 3 przedstawiono instalację wg projektu firmy Paul Wurth Company (zaliczana do instalacji typu mechanicznego).

System wdmuchiwania składa się z trzech zasobników pyłu zainstalowanych jeden nad drugim:

- 1) zasobnik rezerwujący o pojemności  $160 \text{ m}^3$  (2) ,
- 2) zasobnik pośredni (magazynujący)  $18 \text{ m}^3$  (3) ,
- 3) zasobnik zasilający obrotowe zawory dozujące  $45 \text{ m}^3$  (4) .

Zasobnik zasilający jest połączony poprzez zawory obrotowe z przewodami transportującymi pył do dysz. Ilość wdmuchiwanego pyłu reguluje się przez sterowanie pracą zaworów obrotowych. Nośnikiem pyłu węglowego jest sprężone, osuszone i ochłodzone powietrze pobierane z przewodu zimnego dmuchu (przed nagrzewnicami). Zasobniki wypełnione są powietrzem (zasobnik zasilający –  $0,4 \text{ MPa}$ ). W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy miejsca szczegól-





Rys. 3. Schemat instalacji z dozowaniem pyłu przez obrotowe zawory zasilające (Projekt firmy Paul Wurth Company)

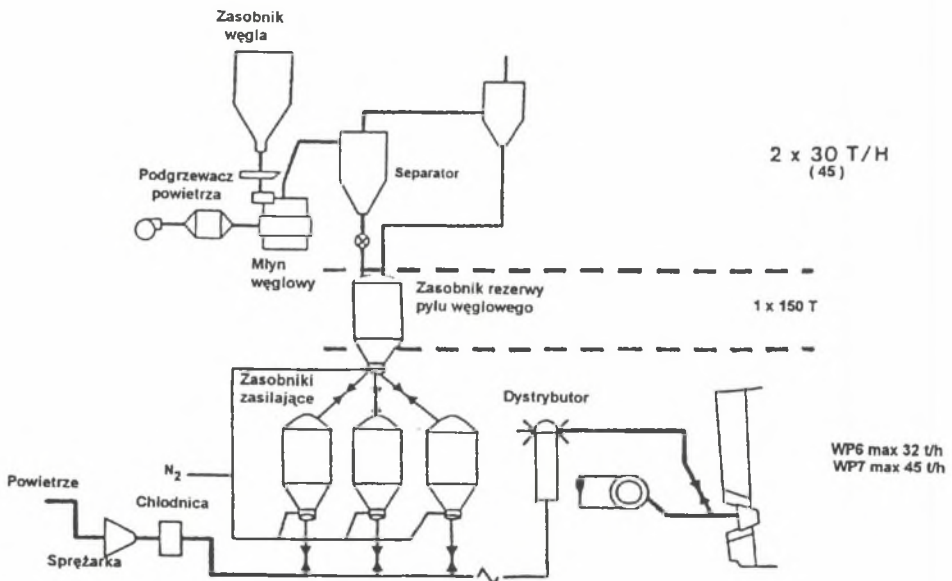
Fig. 3. Schematic of the Paul Wurth system

nie narażone na wystąpienie samozapłonu wyposażone są w system wdmuchiwania gazu obojętnego, którym jest w tym przypadku  $\text{CO}_2$ .

Instalacja wdmuchiwania wyposażona jest w system ważenia (pomiaru stopnia wypełnienia zbiorników) sterujący pracą zaworów i napełnianiem zbiorników. Opisaną instalację wykorzystuje się do wdmuchiwania pyłu w Hucie Dunkierka.

*2.1.4. Instalacja z trzema równolegle pracującymi zbiornikami ciśnieniowymi zasilającymi wspólny przewód transportujący pył do dystrybutora (Projekt firmy Armco)*

Instalacja (rysunek 4) ta składa się z jednego zasobnika magazynującego rezerwę pyłu węglowego (150 ton), który współpracuje z trzema zasobnikami zasilającymi wspólny przewód transportowy pyłu. Czynnikiem transportującym pył jest sprężone powietrze. Rozdział pyłu do dysz następuje w dystrybutorze zainstalowanym na wysokości aparatu zasypowego pieca. Zasobniki podobnie jak poprzednio wyposażone są w system ważenia pozwalający na sterowanie ilością wdmuchiwanego pyłu. Ilość wdmuchiwanego pyłu można zmieniać poprzez zmianę ciśnienia w zbiornikach zasilających. Przy trzech



Rys. 4. Schemat instalacji z trzema równolegle pracującymi zbiornikami ciśnieniowymi zasilającymi wspólny przewód transportujący pył do dystrybutora (Projekt firmy Armco)

Fig. 4. Armco pulverised coal injection equipment

pracujących zasobnikach jeden zasila dystrybutor przy piecu, drugi jest pełny, o podwyższonym ciśnieniu – gotowy do wdmuchiwania, trzeci zasobnik jest napełniany lub również gotowy do pracy. Układ pozwala na pracę z dwoma zasobnikami.

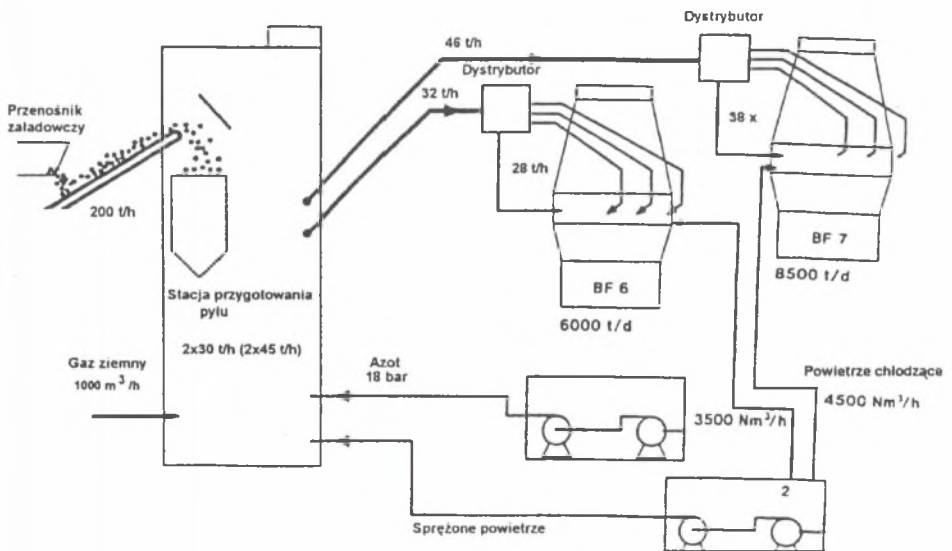
Cykl pracy zasobnika:

- napełnianie (przy obniżonym ciśnieniu),
- podwyższanie ciśnienia,
- oczekiwanie na przełączenie,
- rozładowanie zbiornika (wdmuchiwanie),
- obniżanie ciśnienia.

Do podwyższania ciśnienia w zasobnikach stosuje się sprężony azot (gaz obojętny). W celu zabezpieczenia instalacji stosuje się:

- system wdmuchiwania CO<sub>2</sub> w przypadku wystąpienia zagrożenia,
- system detekcji wystąpienia podwyższonego ciśnienia i zawory bezpieczeństwa.

Instalację typu Armco zainstalowano w Hucie Hoogovens w Holandii (rysunek 4, 5). System składa się z instalacji przygotowania pyłu o wydajności 2 · 45 t/h, która zasila (w sposób opisany wyżej) dystrybutory przy piecach oddalone w tym przypadku od stacji przygotowania i wdmuchiwania o 150 m.



Rys. 5. Schemat współpracy instalacji projektu Armco z dwoma wielkimi piecami hutnictwa Hoogovens

Fig. 5. Pulverised coal injection flow diagram



## 2.2. Ogólna ocena systemów wdmuchiwania

### 2.2.1. Systemy ze zbiornikami o podwyższonym ciśnieniu

Wadą tego typu instalacji jest dość wysoka konstrukcja nośna, w przypadku instalacji Armco problem komplikuje ponadto instalacja trzech zbiorników zasilających wymagających dodatkowej powierzchni. Instalacje tego typu są bardziej wrażliwe na wahania ciśnień pomiędzy poszczególnymi dyszami, co może prowadzić do nierównomiernego przepływu węgla do dysz.

### 2.2.2. Systemy z urządzeniami dozującymi typu mechanicznego

Główną korzyścią jest możliwość indywidualnego regulowania przepływu węgla do poszczególnych dysz oraz mniejsza zależność od wahań ciśnienia niż w instalacjach ze zbiornikami ciśnieniowymi. Wadą natomiast są problemy z mechanicznym zużywaniem części urządzeń dozujących (pompy – Koppers, obrotowe zawory – Paul Wurth), ponadto gdy układ współpracuje z piecem o podwyższonym ciśnieniu w gardzieli, należy podwyższyć ciśnienie w zbiorniku przed urządzeniem dozującym (Paul Wurth).

## 3. SYMULACJA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH ZA POMOCĄ METODY BILANSOWEJ

Dodatek pyłu węglowego jako paliwa zastępczego wpływa przede wszystkim na oszczędność koksu. Zmianie ulegają także jednostkowe zużycie dmuchu, jednostkowa ilość i energia produkowanego ubocznie gazu wielkopiecowego, zużycie gazu w nagrzewnicach oraz ilość gazu oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty.

Prognozy wskaźników energetycznych w przypadku wdmuchiwania pyłu węglowego można dokonać przy użyciu teoretyczno-doświadczalnej metody „input-output”.

Część teoretyczną metody „input-output” stanowią zasady zachowania ilości substancji i energii oraz prawa rządzące przepływem ciepła w nagrzewnicach dmuchu wielkopiecowego [13].

Na część doświadczalną metody składają się równania empiryczne dotyczące wpływu rozpatrywanych parametrów na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego oraz pomiar jednorazowy wielkiego pieca. Równania empiryczne wyprowadza się na podstawie szeregu serii pomiarowych uzyskanych z badań różnych wielkich pieców. Każde z równań empirycznych zawiera jeden nieznaną składnik, zależny od specyfiki rozpatrywanego procesu wielkopiecowego. Nieznane parametry równań empirycznych wyznacza się na podstawie pomiaru jednorazowego danego wielkiego pieca. W efekcie otrzymuje się równania opisujące wpływ zmian parametrów procesu na skład i temperaturę

gazu dla konkretnego wielkiego pieca. Dysponując wynikami pomiaru jednorazowego można wyznaczyć również stałe procesu występujące w równaniach bilansów substancji i energii.

Na podstawie układu równań bilansów uzupełnionych równaniami empirycznymi można dokonywać prognozy wskaźników energetycznych.

W przypadku rozpatrywania wpływu wdmuchiwanego pyłu węglowego na wskaźniki energetyczne jako parametry ustalone przyjmuje się takie wielkości, jak: temperatura i wzbogacenie dmuchu w tlen, ciśnienie w gardzieli, natomiast zmienną w symulacji jest ilość wdmuchiwanego pyłu węglowego.

### 3.1. Założenia teoretyczno–doświadczalnej metody bilansowej

Metoda „input-output” oparta jest na następujących założeniach:

- a) warunki wsadowe i skład surówki są stałe w rozpatrywanym procesie,
- b) wydajność procesu jest utrzymywana na poziomie optymalnym, wynikającym ze stosowanych parametrów,
- c) bilans węgla i siarki sporządza się łącznie,
- d) zakłada się, że stałe w odniesieniu do jednostki surówki są w danym procesie następujące wielkości:
  - różnica między ilością węgla + siarki zawartą w produktach nieenergetycznych a ilością węgla + siarki w substratach nieenergetycznych: stała procesu  $\alpha$  [kmol/t sur.],
  - wilgoć wsadu (bez wilgoci koksu): stała  $\beta$  [kmol/t sur.],
  - różnica między ilością tlenu w produktach nieenergetycznych a ilością tlenu w substratach nieenergetycznych: stała  $\gamma$  [kmol/t sur.],
  - różnica między sumą entalpii produktów nieenergetycznych a entalpią substratów nieenergetycznych stała:  $\delta$  [kJ/t sur.] .

### 3.2. Układ równań bilansowych metody „input-output”

- a) Połączony bilans węgla i siarki:

$$\left(K - P \frac{c_p}{c_k}\right) \left(\frac{c_k}{12} + \frac{s_k}{32}\right) + F \left(\frac{c_F}{12} + \frac{s_F}{32}\right) = \alpha + G(\text{CO}_{2G} + \text{CO}_G) \quad (3.1)$$

- b) Bilans wodoru:

$$\left(K - P \frac{c_p}{c_k}\right) \left(\frac{h_k}{2} + \frac{w_k}{18}\right) + DX_{ZD} + F \left(\frac{h_F}{2} + \frac{w_F}{18}\right) + \beta = G(\text{H}_{2G} + X_{ZG}) \quad (3.2)$$

c) Różnica bilansów tlenu i wodoru:

$$\begin{aligned} \left( K - P \frac{c_p}{c_k} \right) \left( \frac{o_K}{32} - \frac{h_K}{4} \right) + F \left( \frac{o_F}{32} - \frac{h_F}{4} + 0,211 \right) + DO_{2D} = \\ = \gamma + G \left( CO_{2G} + \frac{1}{2} CO_G - \frac{1}{2} H_{2G} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

d) Bilans azotu:

$$D(1 - O_{2D}) + F \left( \frac{n_F}{28} + 0,791 \right) = G(1 - CO_{2G} - CO_G - H_{2G}) \quad (3.4)$$

e) Bilans energii:

$$\begin{aligned} \left( K - P \frac{c_p}{c_k} \right) \cdot d_K + F(d_F + i_F) + D(i_D + X_{ZD} i_{XD}) = \\ = \delta + G(d_G + i_G + X_{ZG} + i_{XG}) + Q_{ow} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$Q_{ow}$  – straty ciepła do otoczenia i wody chłodzącej wyrażone w jednostkach energii na tonę surówki.

Układ równań empirycznych uzupełniających algorytm:

$$\begin{aligned} \varphi = \frac{CO_G}{CO_{2G}} = 0,1174 \exp(-0,0364 F) + 8,93 \exp[-0,0053(T_D - 273)] + \\ + 69,01(O_{2D} - 0,2576)^2 + \varphi_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$T_G = 0,2557F - 0,1385T_D - 986,3O_{2D} + T_{G0} \quad (3.7)$$

$$\psi = \psi_0 - \frac{1,08}{(1 + \varphi)} \quad (3.8)$$

$$P = (58,24 + 2,65P_0)u_G + P_0 \quad (3.9)$$

gdzie:  $\varphi_0$ ,  $T_{G0}$ ,  $\psi_0$ ,  $u_0$  wyznacza się na podstawie wyników pomiaru jednorazowego.

Dysponując jednorazowym pomiarem cieplnym wielkiego pieca, niezbędnym do uwzględnienia specyfiki danego procesu poprzez wyznaczenie stałych występujących w równaniach, można za pomocą układu równań (3.1) – (3.9)

wyznaczyć interesujące nas wskaźniki procesu wielkopiecowego. Układ równań pozwala na wyznaczenie wskaźników  $K$  jednostkowego zużycia koksu,  $D$  jednostkowego zużycia dmuchu,  $G$  jednostkowej ilości gazu wielkopiecowego produkowanego ubocznie w zespole wielkopiecowym oraz jego składu. Na podstawie składu oblicza się entalpię dewaluacji gazu, a następnie  $E$  ilość energii chemicznej produkowanego ubocznie gazu wielkopiecowego. Jednostkową ilość gazu wielkopiecowego  $E_N$  zużywanego do opalania nagrzewnic wyznacza się z bilansu nagrzewnic. Różnicę pomiędzy ilością energii chemicznej gazu produkowanej a ilością zużywaną do opalania nagrzewnic, przy uwzględnieniu nieuniknionych strat gazu, ujmuje się za pomocą wskaźnika  $E_Z$  jednostkowej energii chemicznej gazu wielkopiecowego oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty.

### 3.3. Pomiar jednorazowy i dane do symulacji cyfrowej

W celu wyznaczenia stałych procesu wielkopiecowego, jak również nieznanymi współczynnikami równań empirycznych uwzględniających specyfikę rozpatrywanego procesu wielkopiecowego posłużono się jednorazowym pomiarem cieplnym wielkiego pieca Huty Katowice, którego najważniejsze części przedstawiono w poniższych tablicach.

**Dane pomiaru jednorazowego dotyczące koksu**

**Tablica 2**

KOKS		
– udział węgla	$c_K$ [kg/kg]	0,873
– udział siarki	$s_K$ [kg/kg]	0,009
– udział tlenu	$o_K$ [kg/kg]	0,008
– udział wodoru	$h_K$ [kg/kg]	0,005
– udział wilgoci	$w_K$ [kg/kg]	0,040
– wartość opałowa	[kJ/kg]	30100,0
– jednostkowe zużycie koksu suchego	[kg/t sur.]	461,5

**Dane pomiaru jednorazowego dotyczące używanego aktualnie w procesie paliwa zastępczego**

**Tablica 3**

PALIWO ZASTĘPCZE. (gaz ziemny wysokometanowy)		
– udział metanu	$CH_4$ [kmol/kmol]	0,9650
– udział węglowodorów	$C_mH_n$ [kmol/kmol]	0,0030
– udział azotu	$N_2$ [kmol/kmol]	0,0290
– udział tlenu	$O_2$ [kmol/kmol]	0,0030
– molowy stopień zawilżenia	$X_Z$ [kmol/kmol]	0,0055
– wartość opałowa	[kJ/kmol]	776800,0
– zużycie jednostkowe	[kmol/t sur.]	1,9784
– temperatura	[K]	298,00

**Tablica 4**

**Dane pomiaru jednorazowego dotyczące produkowanego ubocznie gazu wielkopieczowego**

GAZ WIELKOPIECOWY		
- udział tlenku węgla	CO <sub>g</sub> [kmol/kmol g.s]	0,2719
- udział dwutlenku węgla	CO <sub>2g</sub> [kmol/kmol g.s]	0,1884
- udział wodoru	H <sub>2g</sub> [kmol/kmol g.s]	0,0547
- udział azotu	N <sub>2g</sub> [kmol/kmol g.s]	0,4850
- molowy stopień zawilżenia	[kmol H <sub>2</sub> O/kmol g.s]	0,0600
- temperatura	[K]	439,0
- ciśnienie w gardzieli	[MPa]	0,306
- wartość opałowa	[kJ/kmol]	90225,9
- jedn. uboczna wytwórczość	[kmol/t sur.]	76,77

**Tablica 5**

**Dane pomiaru jednorazowego dotyczące dmuchu wielkopieczowego**

DMUCH WIELKOPIECOWY		
- zużycie jednostkowe	[kmol dm.s./t sur.]	50,5238
- ciśnienie przed dyszami	[MPa]	0,473
- udział tlenu	[kmol/kmol dm.s.]	0,2640
- strumień	[kmol dm.s./s]	3,89
- molowy stopień zawilżenia	[kmol H <sub>2</sub> O/kmol dm.s.]	0,0149
- temperatura podgrzania	[K]	1375,0

**Tablica 6**

**Dane pomiaru jednorazowego dotyczące wydmuchiwanego pyłu wielkopieczowego**

PYŁ WIELKOPIECOWY		
- wydmuch jednostkowy	[kg/t sur.]	6,0
- udział węgla w pyłe	[kg/kg]	0,43

**Tablica 7**

**Dane pyłu węglowego wykorzystane do obliczeń symulacyjnych**

DANE PYŁU WĘGLOWEGO		
- udział węgla	c <sub>F</sub> [kg/kg]	0,6790
- udział siarki	s <sub>F</sub> [kg/kg]	0,0073
- udział tlenu	o <sub>F</sub> [kg/kg]	0,0970
- udział azotu	n <sub>F</sub> [kg/kg]	0,0160
- udział wodoru	h <sub>F</sub> [kg/kg]	0,0440
- udział wilgoci	w <sub>F</sub> [kg/kg]	0,0740
- wartość opałowa	[kJ/kg]	27775,0
- jedn. zużycie pow. sprężonego	[kmol/kg]	0,006

### 3.4. Warunek stałości temperatury adiabatycznej w strefie dysz

W przypadku wdmuchiwania paliw zastępczych do strefy dysz wielkiego pieca zmianie ulega temperatura w strefie dysz. Dlatego też konieczna jest kontrola adiabatycznej temperatury w strefie dysz. W rozważaniach przyjęto, że temperatura w strefie dysz nie powinna różnić się więcej niż o 50 K od temperatury wyznaczonej dla pomiaru jednorazowego przedstawionego w punkcie 3.3.

Temperaturę adiabatyczną w strefie dysz wyznaczono z bilansu energii garu wielkiego pieca, który jest elementem algorytmu symulacyjnego. Wyznaczona temperatura adiabatyczna pozwala na kontrolę, czy przy danej wartości parametrów  $O_{2D}$ ,  $t_D$ ,  $p_G$  i danej ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego spełniony jest warunek nieprzekroczenia granicznych wartości temperatury w strefie dysz, zapewniającej prawidłową pracę wielkiego pieca.

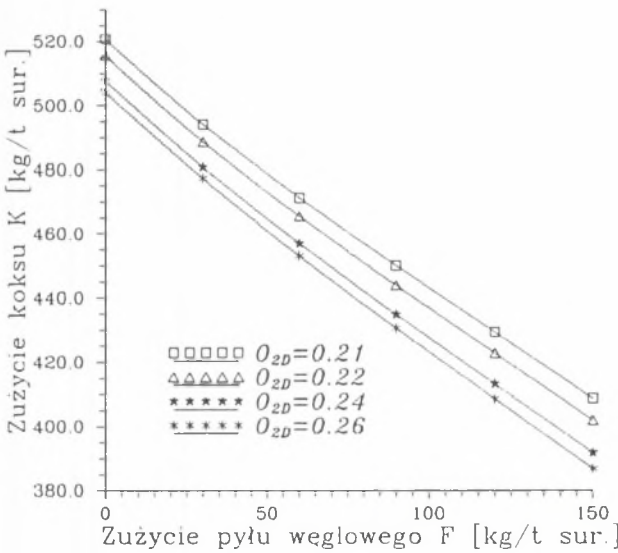
## 4. WYNIKI PROGNOZY WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH

Na rysunkach 6 – 13 przedstawiono rezultaty prognozy wpływu wdmuchiwania pyłu węglowego na podstawowe wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla zakresu wdmuchi-

wania pyłu węglowego 0 – 150 kg/t sur., dla ustalonej temperatury dmuchu na poziomie 1100°C i kilku wartości wzbogacenia dmuchu w tlen.

Wraz ze wzrostem ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego wskaźnik K (rys. 6) jednostkowego zużycia koksu maleje. Energia chemiczna koksu zostaje zastępowana energią chemiczną paliwa zastępczego z odpowiednim współczynnikiem zastępowania przy danej ilości pyłu węglowego.

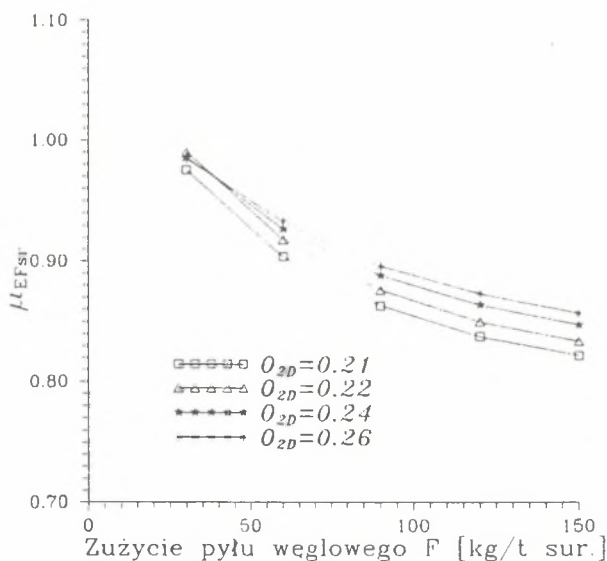
Średni mnożnik  $\mu_{EF}$  (rys. 7) oszczędności



Rys. 6. Wskaźnik jednostkowego zużycia koksu K

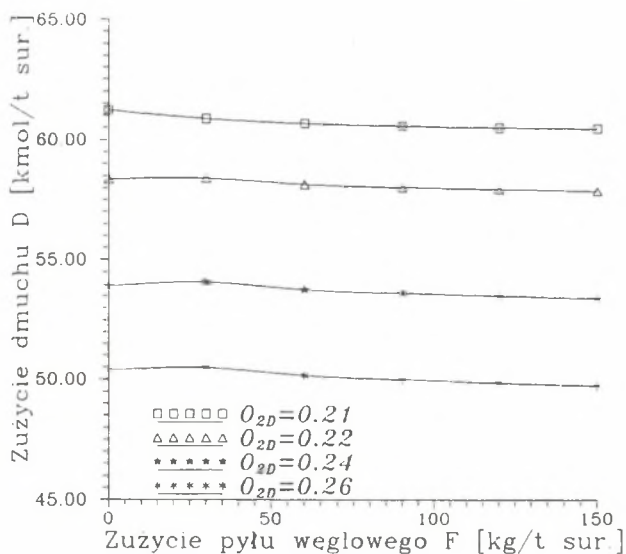
Fig. 6. Specific consumption of coke





Rys. 7. Średni mnożnik oszczędności energii chemicznej koksu

Fig. 7. Average multiplier of chemical energy of coke

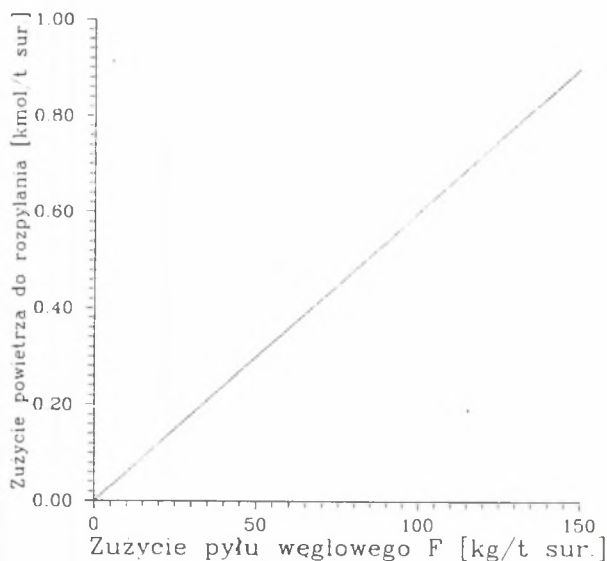


Rys. 8. Wskaźnik jednostkowego zużycia dmuchu D

Fig. 8. Specific consumption of blast

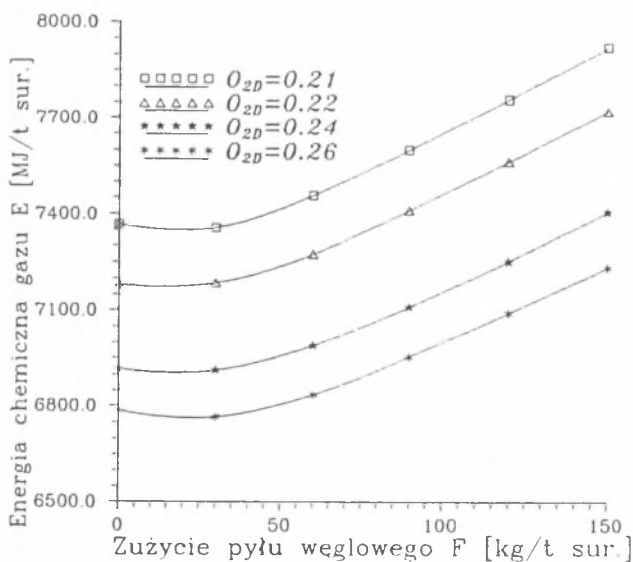
energii chemicznej koksu jest bliski 1 przy małych ilościach wdmuchiwanego pyłu, a wraz ze zwiększeniem ilości wdmuchiwanego paliwa jego wartość zmniejsza się do wartości bliskiej 0,8. Wynika to ze zwiększonego efektu zakłócenia zasady przeciwprądu przy dużych ilościach wdmuchiwanego, zimnego paliwa zastępczego. Uzyskane wartości średniego mnożnika oszczędności energii chemicznej koksu znajdują potwierdzenie w danych literaturowych. Na przykład z danych eksploatacyjnych przedstawionych w [5] wynika, że przy 131 kg/t sur. wdmuchiwanego pyłu węglowego i  $O_{2D} = 0,24$  uzyskano wartość mnożnika równą 0,84. W niniejszej prognozie dla  $O_{2D} = 0,24$  i ilości wdmuchiwanego pyłu równej 150 kg/t sur. uzyskano wartość  $\mu_{EF} = 0,85$ .

Wraz ze wzrostem ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego wskaźnik D jednostkowego zużycia dmuchu maleje (rys. 8). Zmiana ta jest podyktowana malejącym zużyciem koksu, jak również zwiększającą się



Rys. 9. Jednostkowa ilość powietrza transportującego pył do dysz od ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego

Fig. 9. Specific amount of transported air



Rys. 10. Jednostkowa ilość energii chemicznej produkowanego ubocznie gazu wielkopiecowego

Fig. 10. Specific chemical energy of top-gas

ilością powietrza transportującego pył do dysz wielkiego pieca (rys. 9). Ilość powietrza transportującego pył węglowy wynika z przyjętej do obliczeń jednostkowej ilości powietrza transportującego.

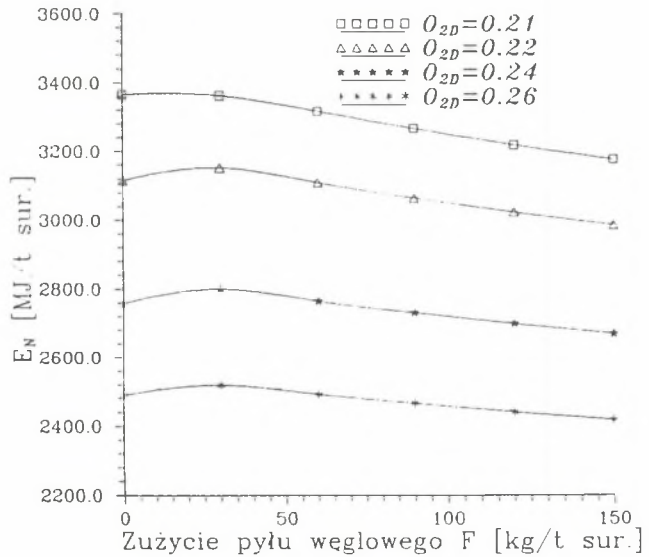
Całkowy wskaźnik  $E$  energii chemicznej gazu produkowanego ubocznie w zespole wielkopiecowym (rys. 10) zależy bezpośrednio od zmian ilości produkowanego gazu i zmian wartości opalowej. Ponieważ obie te wielkości, w przypadku niniejszej prognozy, rosną wraz ze wzrostem ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego, rośnie również więc energia chemiczna produkowanego gazu wielkopiecowego.

Zmniejszonemu zużyciu dmuchu  $D$  towarzyszy, przy ustalonej temperaturze dmuchu, zmniejszone zapotrzebowanie na energię chemiczną gazu do opalania nagrzewnic (rys. 11). Równocześnie zwiększa się ilość energii chemicznej gazu oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty  $E_z$  (rys. 12).

Na rysunku 13 przedstawiono zależność temperatury adiabatycznej od ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego.

## 5. WERYFIKACJA METODY „INPUT-OUTPUT”

Na podstawie danych zamieszczonych w [5] opracowano tabele pomiaru jednorazowego pozwalającego na przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych dla opisywanego tam pieca. Następnie za pomocą metody „input-output” dokonano obliczeń wskaźników energetycznych pieca opisywanego w [5]. Efekt weryfikacji przedstawiono na przykładzie przebiegu dwóch głównych wskaźników (rys. 14, rys. 15). Punkty na wykresach to wielkości z eksploatacji pieca, krzywe stanowią efekt prognozy. Wynik weryfikacji wskazuje na zadowalającą zgodność wyników pomiarów z wynikami obliczeń symulacyjnych. Przeciętne odchylenie punktu pomiarowego od krzywej prognozy nie przekracza wartości średniego błędu pomiaru analizowanego wskaźnika energetycznego.

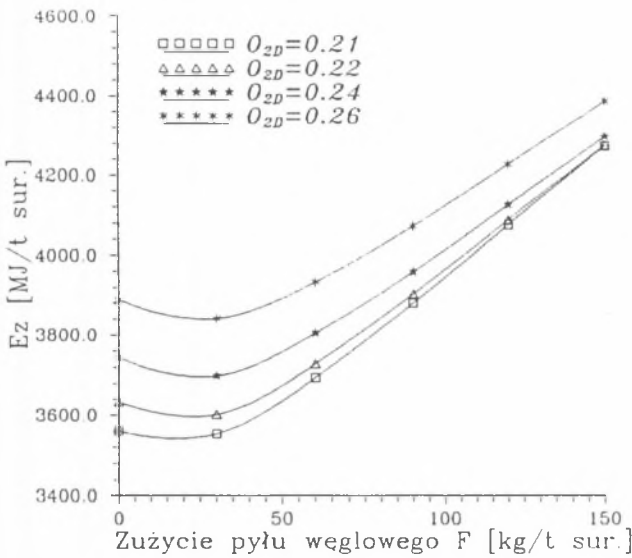


Rys. 11. Jednostkowa ilość energii chemicznej gazu wielkopieczowego zużywanego do opalania nagrzewnic dmuchu wielkopieczowego

Fig. 11. Specific consumption of chemical energy of top-gas in Cowper stoves

## 6. PODSUMOWANIE

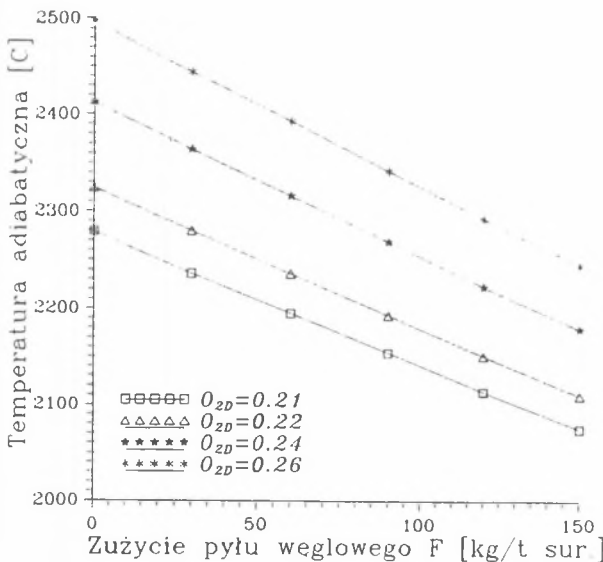
Przeprowadzona analiza ilościowa wpływu zastosowania pyłu węglowego jako paliwa zastępczego w procesie wielkopieczowym na wskaźniki energetyczne tego procesu wskazuje na możliwości uzyskania oszczędności nośników energii przy zastosowaniu omawianego paliwa zastępczego. Przede wszy-



Rys. 12. Jednostkowa ilość energii chemicznej gazu wielkopiecowego oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty

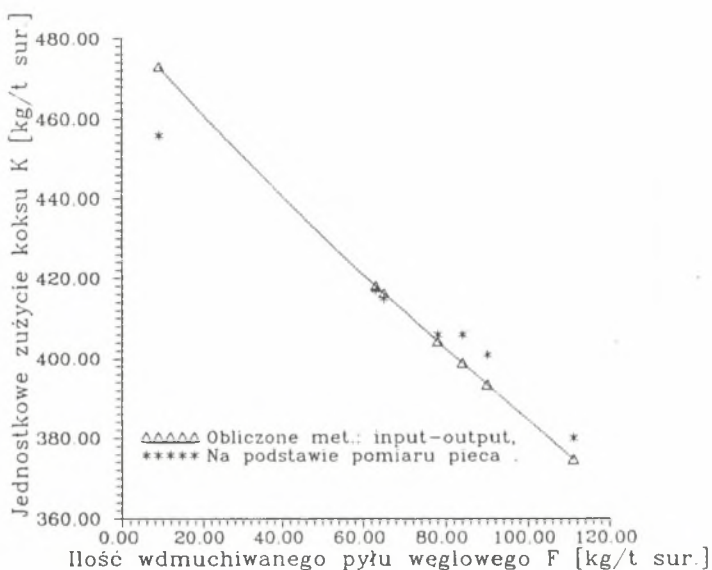
Fig. 12. Specific amount of chemical energy of top-gas feeding the gas-system of iron works

stkim wraz ze zwiększeniem ilości wdmuchiwanego pyłu maleje zużycie koksu. Dodatkowo analiza wskazuje na zmniejszające się zużycie dmucho i rosnącą ilość energii chemicznej produkowanego ubocznie gazu wielkopiecowego wraz ze wzrostem ilości wdmuchiwanego pyłu. Wyniki przeprowadzonej analizy energetycznej mogą stanowić podstawę do przeprowadzenia analizy ekonomicznej decydującej o celowości zastosowania pyłu węglowego jako paliwa zastępczego w krajowych wielkich piecach. Analiza taka powinna uwzględniać wielkość nakładów inwestycyjnych na instalację przygotowania i wdmuchiwania pyłu, koszty eksploatacji dodatkowych instalacji, jak również relacje pomiędzy ceną koksu a ceną pyłu węglowego wdmuchiwanego do wielkiego pieca.



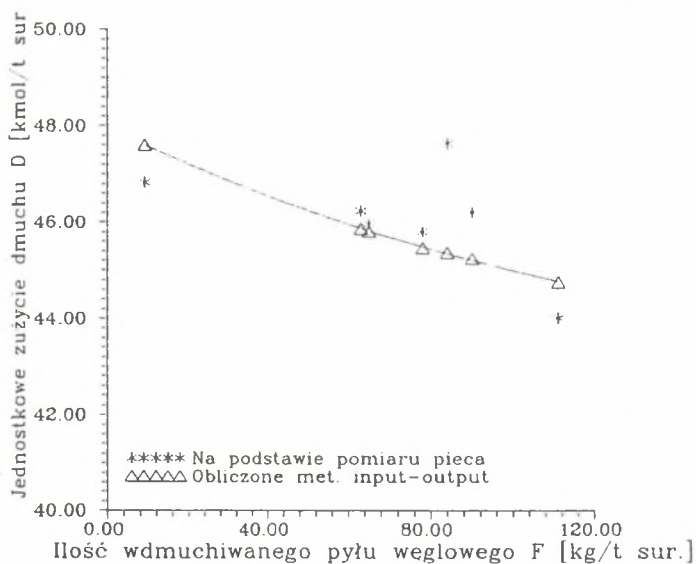
Rys. 13. Temperatura adiabatyczna w strefie dysz wielkiego pieca w zależności od ilości wdmuchiwanego pyłu węglowego

Fig. 13. Adiabatic temperature in the tuyere zone as a function of the amount of coal dust



Rys. 14. Porównanie wartości wskaźnika K obliczonego metodą „input-output” z wynikami pomiarów przedstawionymi w [5]

Fig. 14. Comparison of the calculations of specific consumption of coke and results of measurements [5]



Rys. 15. Porównanie wartości wskaźnika D obliczonego metodą „input-output” z wynikami pomiarów przedstawionymi w [5]

Fig. 15. Comparison of the calculations of specific consumption of blast and results of measurements [5]

## PODSTAWOWE OZNACZENIA I INDEKSY

### Oznaczenia

- c – udział gramowy węgla,
- $CO_G$  – udział molowy CO w suchym gazie wielkopiecowym [kmol/kmol],
- $CO_{2G}$  – udział molowy  $CO_2 + SO_2$  w suchym gazie wielkopiecowym [kmol/kmol],
- d – entalpia dewaluacji [kJ/kmol] lub [kJ/kg],
- D – wskaźnik jednostkowego zużycia suchego dmuchu wielkopiecowego [kmol/t sur.],
- E – jednostkowy wskaźnik energii chemicznej ubocznie wytwarzanego gazu wielkopiecowego [MJ/t sur.],
- $E_N$  – jednostkowy wskaźnik zużycia energii chemicznej gazu wielkopiecowego w zespole nagrzewnic [MJ/t sur.],
- $E_Z$  – jednostkowy wskaźnik energii chemicznej gazu wielkopiecowego oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty [MJ/t sur.],
- F – jednostkowe zużycie paliwa zastępczego w wielkim piecu [kg/t sur.] lub [kmol/t sur.],
- G – jednostkowy wskaźnik produkcji suchego gazu wielkopiecowego [kmol/t sur.],
- h – udział gramowy wodoru,
- $H_{2G}$  – udział molowy wodoru w suchym gazie wielkopiecowym [kmol/kmol],
- i – entalpia fizyczna właściwa [kJ/kg] lub [kJ/kmol],
- K – jednostkowy wskaźnik zużycia koksu [kg/t sur.],
- l – jednostkowa ilość powietrza sprężonego transportującego pył węglowy [kmol/kg],
- n – udział gramowy azotu,
- $N_{2G}$  – udział molowy azotu w suchym gazie wielkopiecowym [kmol/kmol],
- o – udział gramowy tlenu,
- $O_{2D}$  – udział molowy tlenu w suchym dmuchu wielkopiecowym [kmol/kmol],
- $Q_{ow}$  – jednostkowa strata ciepła do otoczenia i wody chłodzącej [kJ/t sur.],
- s – udział gramowy siarki,
- w – udział gramowy wilgoci,
- $W_d$  – wartość opałowa [kJ/kg] lub [kJ/kmol],
- $X_Z$  – molowy stopień zawilżenia [kmol  $H_2O$ /kmol g.s.],
- $\mu$  – mnożnik zastępowania energii chemicznej koksu,
- $\varphi$  – stosunek  $CO/CO_2$  w gazie wielkopiecowym,
- $\psi$  – stosunek ilości wodoru w gazie wielkopiecowym do ilości wodoru doprowadzonego do strefy dysz.



## Indeksy

- F – dotyczy paliwa zastępczego,
- G – dotyczy suchego gazu wielkopiecowego,
- H<sub>2</sub>O – dotyczy pary wodnej,
- K – dotyczy koksu,
- ot – dotyczy parametrów otoczenia,
- 1 – dotyczy pomiaru jednorazowego.

## LITERATURA

- [1] Brouwer R.C., Schoone E.E., Toxopeus H.L.: Coal injection driven to the limits, *Iron and Steel Engineer*, Dec. 1992.
- [2] Carmichael I.F.: An Introduction to Blast Furnace Coal Injection, *I&SM*, nr 3, 1993.
- [3] Colnot B.: Wdmuchiwanie sproszkowanego węgla do dysz wielkiego pieca nr 3 huty Uckange, *CIT* 1982, nr 11, tłumaczenie IMŻ – Gliwice.
- [4] Dunajew N.: Wduwanie pyliewidnych materiałów w domiennyje pieci, *Mietałurgija*, Moskwa 1977.
- [5] Graffeuille F., Allaire B., Lao D.: Coal Injection Practice In Usinor Dunkirk BF.2, *Ironmaking Proc. Conf.* 14-17.05.1985, Detroit.
- [6] Heming G.M., Carter G.G.: Systemy wdmuchiwania węgla do wielkich pieców, *Ironmaking and Steelmaking* nr 3, 1981 – tłumaczenie IMŻ – Gliwice.
- [7] Jemuszincew W., Galiemin M.: Wypławka pierieliedolnogo czuguna s razlicznym raschodom pylieugolnogo topliwa, *Stal*, nr 6, 1969.
- [8] Koen W., Vogel R.B., Toxopeus H.L., Flierman G.A.: Injection of coal into the Hoogovens Blast Furnaces, *Ironmaking Proc. Conf.* 14-17.05.85, Detroit.
- [9] Operhalski Z.: Ocena efektów energetycznych wdmuchiwania pyłu węglowego do wielkiego pieca, praca dyplomowa, *ITC – Gliwice* 1981.
- [10] Peters K., Mandel J., Peters M., Gerstenberg B.: Betrieb eines GroBhohofens mit unterschiedlichen Kokssorten bei hohen Kohleeinblasmen, *Stahl und Eisen* nr 22, 1989.
- [11] Szargut J.: Energetyka cieplna w hutnictwie, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1985.
- [12] Szargut J.: Termodynamika techniczna, PWN, Warszawa 1991.
- [13] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego, *Ossolineum*, Wrocław 1983.

- [14] Szega M.: Analiza termodynamiczna możliwości wykorzystania składników redukcyjnych gazów wielkopieczowego zawracanego do procesu, praca doktorska, ITC – Gliwice 1992.
- [15] Ziębik A.: Równania empiryczne ujmujące wpływ dodatku oleju opałowego i podgrzania dmuchu na wykorzystanie CO i H<sub>2</sub> w wielkim piecu oraz na temperaturę gazów wielkopieczowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1975, Energetyka z. 54.
- [16] Agarwal J.C., Brown F.C., Chin D.L., Frydenlund A.R., Jessiman N.S.: A model for economic comparison natural gas, oil and coal injection in the blast furnace., Ironmaking Conference Proceedings 1992.

Recenzent: Prof. zw. dr inż. Jan Szargut

Wpłynęło do Redakcji: 7. 12. 1994 r.

## Abstract

The injection of coal dust into the tuyere zone as auxiliary fuel influences the consumption of coke, blast, the amount of produced top gas and its chemical energy, the consumption of gas in the Cowper stoves and the amount of the top-gas feeding the gas-system of the ironworks. Calculated in relation to a pig-iron unit, these quantities have been called energy characteristics. They serve the process-analysis of the energy effects of injection of coal dust as auxiliary fuel.

The applied method of predicting the energy characteristics of the blast-furnace is based on information concerning the "input" and "output" of process. The theoretical part of the method base on the principle of the conservation of substance and energy, as well as of the law of heat transfer in the Cowper stoves. The experimental part deals with investigations concerning the effect of coal dust injection upon the degree of utilization of CO and H<sub>2</sub> in the blast-furnace and the temperature of top gas. The experimental part includes also a single thermal measurement of the investigated blast-furnace. The results of this measurement are used for determination of the process constants in the balance equations and of unknown parameters in empirical equations.

This paper presents results of predicting of energy characteristics for a blast-furnace with a volume 3200 m<sup>3</sup>. Additionally the results of calculations concerning the blast-furnace described in [5] the prediction of specific consumption of coke and blast have been compared with the experimental data [5]. The comparison showed that this method is satisfactory and fully applicable in practice.