

Tadeusz KRUCZEK

### RÓWNANIA EMPIRYCZNE UJMUJĄCE WPŁYW CIŚNIENIA W GARDZIELI WIELKIEGO PIECA NA SKŁAD I TEMPERATURĘ GAZU WIELKOPIECOWEGO

**Streszczenie.** Na podstawie wyników badań eksperymentalnych pochodzących z literatury zagranicznej opracowano równania empiryczne ujmujące wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na stosunek CO/CO<sub>2</sub> w gazie wielkopieczowym i na temperaturę tego gazu. Postać ogólną tych równań przyjęto na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej. Wymienione zależności empiryczne uogólniono na wszystkie wielkie piece poprzez ujęcie ich jako jednoparametrowe rodziny krzywych. Nieznany parametr wyznacza się na podstawie wyników jednorazowego pomiaru cieplnego badanego procesu wielkopieczowego.

#### Oznaczenia:

- $c_k, s_k$  - udziały gramowe węgla i siarki w koksie suchym,  
 $c_p$  - pojemność cieplna właściwa gazu przy stałym ciśnieniu, kJ/kmol K,  
 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> - udziały molowe tlenku węgla, dwutlenku węgla, wodoru i azotu w suchym gazie wielkopieczowym,  
 $C_F, H_F, N_F, S_F$  - ilość węgla, wodoru, azotu i siarki w paliwie zastępczym, kmol/kg lub kmol/kmol,  
 d - entalpia dewaluacji, kJ/kg lub kJ/kmol,  
 D - jednostkowe zużycie suchego wzbogaconego tlenem dmuchu wielkopieczowego, kmol/t sur.,  
 F - jednostkowe zużycie paliwa zastępczego, kg/t sur. lub kmol/t sur.,  
 G - jednostkowa produkcja suchego gazu wielkopieczowego, kmol/t sur.,  
 i - entalpia właściwa, kJ/kg lub kJ/kmol,  
 K - jednostkowe zużycie koksu, kg/t sur.,  
 $K_1, K_2$  - stałe równowagi dla reakcji chemicznych,  
 l - jednostkowe zużycie powietrza sprężonego do rozpylania paliwa zastępczego, kmol/kg lub kmol/kmol,  
 O<sub>2D</sub> - udział molowy tlenu w suchym dmuchu wielkopieczowym,  
 p - ciśnienie bezwzględne, MPa,

- T - temperatura, K,  
 W - wartość opalowa, kJ/kmol,  
 X - stopień zawilżenia gazu, kmol H<sub>2</sub>O/kmol g..

### Indeksy:

- CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O - dotyczy tlenku i dwutlenku węgla, wodoru, azotu oraz pary wodnej,  
 D - dotyczy dmuchu,  
 F - dotyczy paliwa zastępczego,  
 G - dotyczy gazu wielkopiecowego,  
 K - dotyczy koksu,  
 l - dotyczy powietrza sprężonego do rozpylania paliwa zastępczego,  
 r - dotyczy strefy rezerwy cieplnej,  
 X - dotyczy zawilżenia gazu,  
 ( ) - wielkości fizyczne dotyczące gazu wilgotnego.

### 1. Wstęp

Wykorzystanie tlenku węgla jako czynnika redukcyjnego w wielkim piecu ocenia się bądź za pomocą stosunku CO/CO<sub>2</sub> w gazie wielkopiecowym, bądź przy użyciu pojęcia sprawności wykorzystania tlenku węgla  $\varphi_{CO}$ . W niniejszym opracowaniu do oceny stopnia wykorzystania CO jako czynnika redukcyjnego posłużono się stosunkiem CO/CO<sub>2</sub>, który nazwano funkcją

$$\varphi = \frac{CO}{CO_2} \quad (1)$$

Stopień wykorzystania wodoru jako czynnika redukcyjnego można również oceniać za pomocą sprawności jego wykorzystania lub za pomocą innych wskaźników. W niniejszej pracy przyjęto funkcję  $\phi$ , która ujmuje stosunek wodoru zawartego w gazie do wodoru doprowadzonego do strefy dysz

$$\phi = \frac{G H_2}{K \frac{h_K}{2} + F H_F + D X_D} \quad (2)$$

Równania opisujące funkcje  $\varphi$ ,  $\phi$  i  $T_G$  powinny mieć charakter ogólny i dać się zastosować w każdym przypadku badanego wielkiego pieca. W tym celu każdą z wymienionych zależności określono w postaci jednoparametrowej rodziny krzywych. Nieznane a priori parametry w równaniach empirycznych należy wyznaczyć według wyników jednorazowego pomiaru cieplnego konkretnego wielk.e-

go pieca. W ten sposób zostaje uwzględniona specyfika badanego procesu wielkopieczowego.

Ze względu na złożony i niedostatecznie jeszcze poznany przebieg zjawisk wymiany ciepła i substancji oraz procesów chemicznych zachodzących w wielkim piecu, wymienionych zależności nie można określić na drodze teoretycznej. Na podstawie rozważań teoretycznych można jedynie wnioskować o ogólnej postaci tych zależności. W niniejszym opracowaniu w pierwszej kolejności podjęto próbę określania ogólnej postaci zależności  $\Psi(p_G)$ ,  $\Phi(p_G)$  i  $T_G(p_G)$  na drodze teoretycznej, a następnie na podstawie danych pomiarowych wyznaczono konkretne postacie tych funkcji. Materiał doświadczalny do wyznaczenia równań empirycznych wykorzystano tylko te serie, które charakteryzowały się odpowiednio szerokim zakresem zmian ciśnienia oraz dostateczną liczebnością próby. W większości serie te dotyczyły badań przy możliwie stałych warunkach wsadowych i w miarę ustalonych pozostałych parametrach dmuchu.

Artykuł stanowi kontynuację prac [20], [25], [26], [27], dotyczących badania wpływu podwyższenia temperatury dmuchu, stosowania paliw zastępczych i gazu reformowanego oraz wzbogacania dmuchu tlenem na wskaźniki energetyczne procesu wielkopieczowego.

## 2. Równanie empiryczne ujmujące zależność $\Psi(p_G)$

Według teorii Gumza [4] w wielkim piecu istnieje punkt, w którym temperatura wsadu stałego jest równa temperaturze fazy gazowej, a skład gazu jest składem równowagowym. Tę temperaturę Gumz nazwał temperaturą reakcji  $T_R$ . Późniejsze badania Micharda i Kitajewa potwierdziły teorię Gumza, z tą różnicą, że zamiast punktu stwierdzono istnienie w wielkim piecu pewnego obszaru - strefy, w której temperatury wsadu i gazu są bardzo do siebie zbliżone, a skład gazu tylko nieznacznie odbiega od składu równowagowego. Obszar zbliżonych temperatur wsadu i gazu nazwano strefą rezerwy cieplnej, natomiast zawarty w tej strefie obszar zbliżonego do stanu równowagi składu gazu - strefą rezerwy chemicznej. Strefa rezerwy cieplnej dzieli szyb wielkiego pieca na dolną i górną strefę wymiany ciepła.

W dalszych rozważaniach wykorzystano podstawowe założenia modelu Gumza [4]. Istotą tego modelu jest wykorzystanie równań bilansowych pierwiastków wchodzących w skład fazy gazowej (tj. C, H, N, O) oraz bilansu energii dla dolnej strefy wymiany ciepła. Ponadto wykorzystuje się równania równowagi dla reakcji Boudouarda i reakcji pary wodnej z węglem koksu

$$\frac{(CO)_R^2}{(CO_2)_R} = \frac{K_1}{P_{wR}}, \quad (3)$$

$$\frac{(H_2)_R (CO)_R}{(H_2O)_R} = \frac{K_2}{P_{wR}}, \quad (4)$$

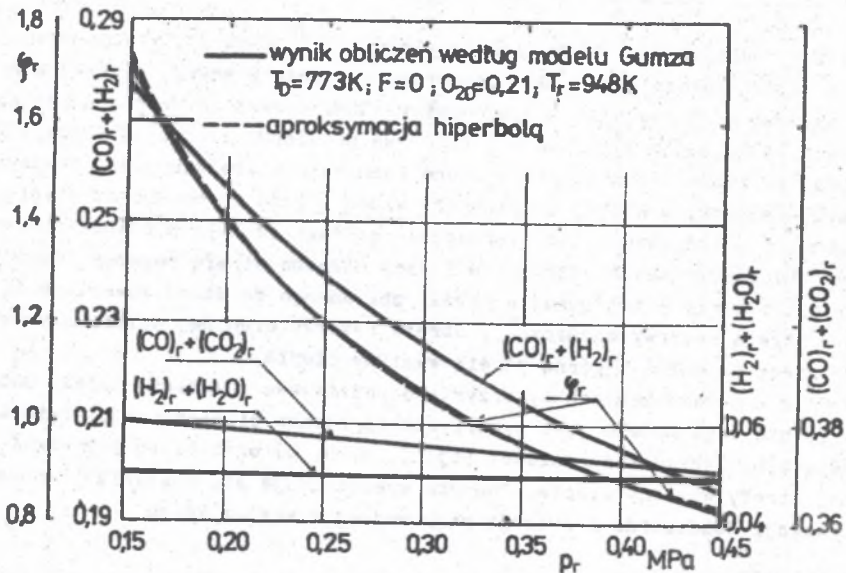
gdzie:

$P_{w r}$  - oznacza ciśnienie względne w strefie rezerwy chemicznej.

Układ równań bilansowych substancji i energii oraz równań równowagi umożliwi obliczenie jednostkowego zużycia paliwa i dmuchu oraz składu gazu w strefie rezerwy, jeżeli znana jest temperatura reakcji. W obliczeniach prowadzonych na podstawie swojego modelu, dotyczących oceny wpływu ciśnienia na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego, Gumz przyjmuje (i uzasadnia to) stałą temperaturę reakcji. Również w [12] podkreśla się, że samo ciśnienie nie wpływa w istotny sposób na rozkład temperatur w wielkim piecu, co potwierdzałoby propozycję Gumza, że przy badaniu wpływu ciśnienia można przyjąć założenie

$$T_r = \text{idem.} \quad (5)$$

Wykorzystując model Gumza oraz niektóre dane liczbowe [4] przeprowadzono obliczenia wyznaczając składy gazu w strefie rezerwy dla różnych przypadków (zmieniano temperaturę reakcji i dmuchu oraz udział tlenu w dmuchu). Jeden z przypadków przedstawiono na rys. 1. Przypadek ten dotyczy temperatury reakcji równej 948 K. Jest to wartość przykładowa przyjęta analogicznie jak



Rys. 1. Wybrane wyniki dotyczące składu gazu w strefie rezerwy otrzymane na podstawie modelu Gumza

Fig. 1. Chosen results dealing with the contents of the gas in the reserve zone obtained basing on the base of Gumz model

u Gumza [4]. W świetle współczesnych badań uważa się jednak, że temperatury w strefie rezerwy cieplnej wielkiego pieca są wyższe od temperatury przyjętej. Równanie równowagi dla reakcji Boudouarda nasuwa sugestię o hiperbolicznym przebiegu zmian wartości stosunku  $(CO)_R/(CO_2)_R$  w funkcji ciśnienia. Dlatego dla aproksymacji zależności  $\varphi_R = (CO)_R/(CO_2)_R$  wskazane wydaje się zastosowanie równania hiperboli.

Wykorzystując wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie modelu Gumza, dotyczące składu gazu w strefie rezerwy, za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczono równania hiperboli o postaci:

$$\varphi_R = \frac{a_1}{a_3 + p_R} + a_2, \quad (6)$$

aproksymujące przebiegi funkcji  $\varphi$  w strefie rezerwy. Podobną zależność wyznaczono na podstawie danych dotyczących składu gazu w gardzieli, prezentowanych w [22]. W przypadku danych [22]  $a_3 = 0,018$ , natomiast w pozostałych przypadkach wyraz  $a_3$  osiągał wartości rzędu 0,02 i nie miał istotnego wpływu na dokładność dopasowania krzywych. Dla aproksymacji przebiegu funkcji  $\varphi_R$  uzasadnione wydaje się zatem zastosowanie równania hiperboli o postaci:

$$\varphi_R = \frac{a_1}{p_R} + a_2. \quad (7)$$

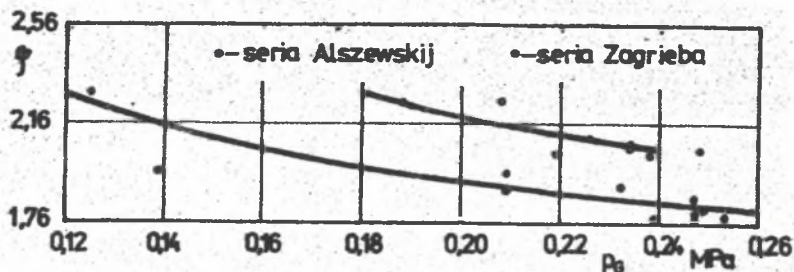
Za taką postacią przemawia również fakt, że funkcja  $\varphi = CO/CO_2$  powinna mieć asymptotę pionową w punkcie  $p = 0$ . Wynika to z równania równowagi (3) dla reakcji Boudouarda. Wykorzystując powtórnie wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie modelu Gumza, za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczono równania postaci (7). We wszystkich przypadkach otrzymano dobre dopasowanie krzywych, współczynniki korelacji były większe od 0,99. Potwierdziło to celowość zastosowania zależności o postaci (7) do aproksymacji przebiegu zmian  $\varphi_R$ .

W gardzieli wielkiego pieca stosunek  $CO/CO_2$  jest inny niż to wynika z warunku równowagi w strefie rezerwy. Można to jednak uwzględnić przez indywidualny dobór wyrazu wolnego, który będzie uwzględniał także  $CO_2$  pochodzące z rozkładu węglanów. Również ciśnienie w gardzieli jest nieco niższe niż w strefie rezerwy. Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy są jednak nadal aktualne, ponieważ jej celem była jakościowa ocena zjawiska. Zależność empiryczną  $\varphi(p_G)$  można zatem ująć w postaci równania:

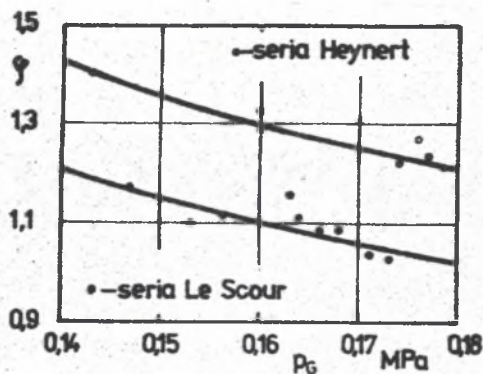
$$\varphi = \frac{a_1}{p_G} + a_2. \quad (8)$$

W celu wyznaczenia równania empirycznego opisującego wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na funkcję  $\varphi$  wykorzystano dane pomiarowe z [1].

[5], [6], [7], [8], [9], [11], [13], [15], [23], [24], które zebrano w [19]. Analiza tych serii, z których pięć przedstawiono na rysunkach 2, 3, 4, potwierdza celowość hiperbolicznego ujęcia zależności  $\psi(p_G)$  według postaci (8).



Rys. 2. Zależność empiryczna  $\psi(p_G)$  według serii pomiarowych [1, 24]  
Fig. 2. Empirical dependence  $\psi(p_G)$  according to measurement serie [1, 24]



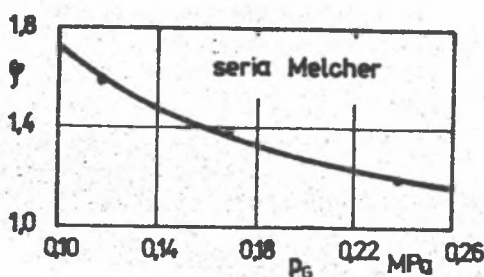
Rys. 3. Zależność empiryczna  $\psi(p_G)$  według serii pomiarowych [5, 8]  
Fig. 3. Empirical dependence  $\psi(p_G)$  according to measurement serie [13]

W dotychczasowych badaniach [20] przyjmowano założenie o addytywnym wpływie parametrów  $T_D$ ,  $F$ ,  $O_{2D}$  na funkcję  $\psi$ . Dopuszczalność tego postępowania stwierdzono na podstawie rozwiązań przeprowadzonych we wcześniejszych pracach. Ponieważ ciśnienie w gardzieli jest nowym parametrem w stosunku do wymienionych wcześniej, w niniejszym opracowaniu podjęto próbę zbadania czy nie występuje zjawisko synergicznego wpływu parametrów  $p_G - T_D$ ,  $p_G - F$ ,  $p_G - O_{2D}$  na funkcję  $\psi$ , a zarazem

czy jest dopuszczalne przyjęcie założenia o addytywnym wpływie ciśnienia na funkcję  $\psi$ , co może być ujęte zależnością:

$$\psi = \psi_1(T_D) + \psi_2(F) + \psi_3(O_{2D}) + \psi_4(p_G) + \psi_0, \quad (9)$$

gdzie  $\psi_4$  jest funkcją ciśnienia w gardzieli.



Rys. 4. Zależność empiryczna  $\psi(p_G)$  według serii pomiarowej [13]

Fig. 4. Empirical dependence  $\psi(p_G)$  according to measurement serie [13]

Efekt synergiczny może się uwidocznić w postaci różnorodnych związków funkcyjnych wymienionych wcześniej par parametrów. W chwili obecnej nie wiadomo, czy związki takie występują, jak również nie jest wiadomo, jakie ewentualnie mogą być ich postaci. Gdyby jednak wystąpiła współzależność wpływu dwóch parametrów na funkcję  $\psi$ , jej efektem w sensie liczbowym zawsze będzie pewne  $\Delta\psi$ , które można traktować jako poprawkę na

występowanie efektu synergicznego. Zatem w przypadku występowania tego efektu do aproksymacji przebiegu funkcji  $\psi$  można użyć zależności:

$$\psi = \sum_{i=1}^3 \psi_i(x_i) + \psi_4^*(x_4) + \sum_{i=1}^3 \Delta\psi_i + \psi_0^* \quad (10)$$

gdz.e:

$x_1$  - parametry  $T_D, F, O_{2D}, p_G$ ,

$\psi_4^* = a_1^*/p_G$  - postać funkcji  $\psi_4$  przy założeniu występowania efektu synergicznego,

$\Delta\psi_i = b_1 f(p_G, x_1)$  - poprawka na występowanie współzależnego wpływu parametrów  $p_G - x_1$  na funkcję  $\psi$ ,

$f(p_G, x_1)$  - pewna (nieznana) funkcja parametrów  $p_G, x_1$ ,

$b_1$  - współczynnik liczbowy.

Przedstawioną analizę można przeprowadzić, jeśli znana będzie ogólna postać funkcji  $f(p_G, x_1)$ . Można o niej wnioskować na podstawie rozważań teoretycznych lub poszukiwać jej metodą prób. Analiza teoretyczna byłaby jednak sprawą stosunkowo trudną, ponieważ na obecnym etapie nie wiadomo nawet czy badany efekt w ogóle wystąpi. Dlatego w dalszych rozważaniach wybrano drugi sposób.

Ogólnie mogą zaistnieć cztery przypadki jednoczesnych zmian parametrów  $p_G - x_1$ . Ponieważ nie wiadomo, jaką tendencję powinna wykazywać  $|\Delta\psi|$  w każ-

dym z czterech przypadków (rosnącą czy malejącą), w analizie uwzględniono wszystkie możliwości. Założono następujące postacie funkcji  $f$ :

$$\begin{aligned} f_1 &= \varphi_4^*(p_G) \varphi_1(x_1), \quad i = 1, 2, 3, \\ f_2 &= 1/f_1, \\ f_3 &= \varphi_4^*(p_G)/\varphi_1(x_1), \\ f_4 &= 1/f_2. \end{aligned} \tag{11}$$

Ze względu na skąpność materiału statystycznego przeprowadzoną analizę traktowano jako wstępną. Z tej przyczyny rozważania na temat postaci funkcji  $f$  ograniczono do postaci (11).

Obecnie badanie zjawiska efektu synergicznego można sprowadzić do kontroli dokładności dopasowania hiperpowierzchni postaci (9) i (10) do posiadanego zbioru punktów za pomocą metody mniejszych kwadratów lub do badania istotności współczynników  $b_i$ . Dalej zastosowano obydwa ww. kryteria. Do badania wykorzystano serie [1], [5], [8], [9], [11], [15], [24] charakteryzujące się dostateczną zmiennością analizowanych parametrów i liczebnością punktów. Jako miary dokładności dopasowania hiperpowierzchni używano estymatora wariancji resztowej. Zależnie od tego, w którym przypadku estymator osiągał mniejszą wartość, tę hiperpłaszczyznę uznawano za "lepiej dopasowaną". Ze względu na niewielkie ilości punktów w posiadanych seriach pomiarowych w przeprowadzonej analizie postacie funkcji  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  przyjmowano jako znane [20], a wyznaczono jedynie wartości współczynnika  $a_1$  występującego w funkcji  $\varphi_4$  i wartość wyrazu wolnego  $\varphi_0$  lub wartości współczynnika  $a_1^*$  w funkcji  $\varphi_4^*$ , współczynników  $b_i$  i wyrazu wolnego  $\varphi_0^*$ . Do badania istotności współczynników  $b_i$  użyto testu parametrycznego do weryfikacji hipotez statystycznych [17].

Istota tego testu polega na zbadaniu wartości statystyki

$$t(b_i) = \frac{b_i - \hat{\beta}_i}{S(b_i)}, \tag{12}$$

gdzie:

$\hat{\beta}_i$  - wartość współczynnika  $b_i$  wynikająca z hipotezy zerowej  $H_0$ ,

$S(b_i)$  - estymator odchylenia średniego dla  $b_i$ .

Jeżeli  $t(b_i)$  należy do obszaru krytycznego, wówczas świadczy to przeciw hipotezie zerowej  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ .



W badanym przypadku hipotezę sformułowano w postaci:

$$H_0: \beta_1 = 0,$$

zaś hipotezę alternatywną

$$H_1: \beta_1 \neq 0.$$

Przy takim sformułowaniu hipotezy alternatywnej otrzymano dwustronny obszar krytyczny. Opisują go przedziały  $(-\infty, -t_p)$   $(t_p, +\infty)$ , gdzie  $t_p$  oznacza wartość parametru  $t$  z rozkładu  $t$  - Studenta przy poziomie ufności  $p$  i danej liczbie stopni swobody.

Przeznaczone do badania serie podzielono na grupy. W pierwszej grupie umieszczono serie, w których zmienne były tylko dwa parametry -  $p_G$ ,  $T_D$ , natomiast druga zawierała serie z parametrami  $p_G$ ,  $T_D$ ,  $F$ . Omawianą analizę przeprowadzono etapowo. Najpierw badano występowanie efektu synergicznego w pierwszej grupie serii. Wyniki przedstawiono w tablicy 1. Są one stosunkowo zróżnicowane, bo na przykład dla serii nr 1 otrzymano potwierdzenie występowania efektu synergicznego wg obu kryteriów dla postaci funkcji  $f_1$ ,  $f_4$ . Nie uzyskano jednak tak zgodnego wyniku w przypadku pozostałych serii, a w dodatku znak współczynnika  $b_1$  dla serii nr 1 i wymienionych postaci funkcji "f" jest inny niż w przypadku serii nr 6, 7, 11. Podsumowując uznano, że otrzymane wyniki nie świadczą jednoznacznie o występowaniu efektu synergicznego i po przyjęciu addytywnego wpływu  $T_D$  (w stosunku do  $p_G$ ) na wartość funkcji  $\varphi$  poddano analizie drugą grupę serii, tabl. 1. Wynik otrzymany dla serii nr 2 świadczyłby raczej o występowaniu efektu synergicznego. Nie potwierdzają jednak tego zjawiska serie nr 5, 9. W rezultacie uznano, że na obecnym etapie badań nie ma zdecydowanych podstaw do przyjęcia stwierdzenia o występowaniu tego efektu. Dlatego przyjęto addytywny wpływ dodatku paliwa zastępczego na funkcję  $\varphi$ . Brak stosownych serii nie pozwolił na przeprowadzenie analizy dotyczącej występowania efektu synergicznego przy równoczesnych zmianach parametrów  $p_G$ ,  $O_{2D}$ . Mając na uwadze fakt, że dotychczasowa analiza w przypadku innych parametrów nie wykazała istnienia tego efektu, dla parametrów  $p_G$ ,  $O_{2D}$  przyjęto również addytywny wpływ na funkcję  $\varphi$ .

W celu wyznaczenia konkretnej postaci równania ujmującego wpływ ciśnienia na funkcję  $\varphi$  wykorzystano 11 serii pomiarowych. Ponieważ w analizowanych seriach występowały wahania wartości parametrów  $T_D$ ,  $F$  i  $O_{2D}$ , zmierzone wartości stosunku  $CO/CO_2$  korygowano sprowadzając je do poziomu dla średniej wartości parametrów  $T_D$ ,  $F$ ,  $O_{2D}$  w serii. Wykorzystywano do tego celu równania empiryczne  $\varphi(T_D)$ ,  $\varphi(F)$ ,  $\varphi(O_{2D})$  [20]. Następnie dla każdej serii pomiarowej, wykorzystując metodę rachunku wyrównawczego [18], wyznaczono indywidualne równania empiryczne opisujące wpływ ciśnienia w dziedzinie wiel-

Tablica 1

Wyniki badań efektu synergicznego dla funkcji  $\Psi$ 

Grupa serii	Analizowane parametry	Numer, nazwa serii i pozycja literatury	Postać funkcji $f$	Znak współczynnika $b_i$	Stwierdzenie efektu synergicznego	
					Kryterium estymatora wariancji	Kryterium istotności współczynnika $b_i$
1	$P_G - T_D$	1 Alszewskij [1]	$f_1$	-	TAK	TAK
			$f_2$	+	TAK	NIE
			$f_3$	+	TAK	NIE
			$f_4$	-	TAK	TAK
		6 Lewin [9]	$f_1$	+	NIE	TAK
			$f_2$	-	NIE	NIE
			$f_3$	-	NIE	NIE
			$f_4$	+	NIE	TAK
		7 Maertens [11]	$f_1$	+	NIE	TAK
			$f_2$	-	TAK	NIE
			$f_3$	-	NIE	NIE
			$f_4$	+	NIE	TAK
		11 Zagriebea [24]	$f_1$	+	NIE	TAK
			$f_2$	-	NIE	NIE
			$f_3$	-	NIE	NIE
			$f_4$	+	NIE	TAK
2	$P_G - F$	2 Heynert [5]	$f_1$	+	TAK	TAK
			$f_2$	-	TAK	NIE
			$f_3$	-	TAK	NIE
			$f_4$	+	TAK	TAK
		5 Le Scour [8]	$f_1$	+	NIE	NIE
			$f_2$	-	TAK	NIE
			$f_3$	-	TAK	NIE
			$f_4$	+	NIE	TAK
		9 Pochwisniew [15]	$f_1$	+	NIE	TAK
			$f_2$	-	TAK	NIE
			$f_3$	-	TAK	NIE
			$f_4$	+	NIE	TAK

Tablica 2

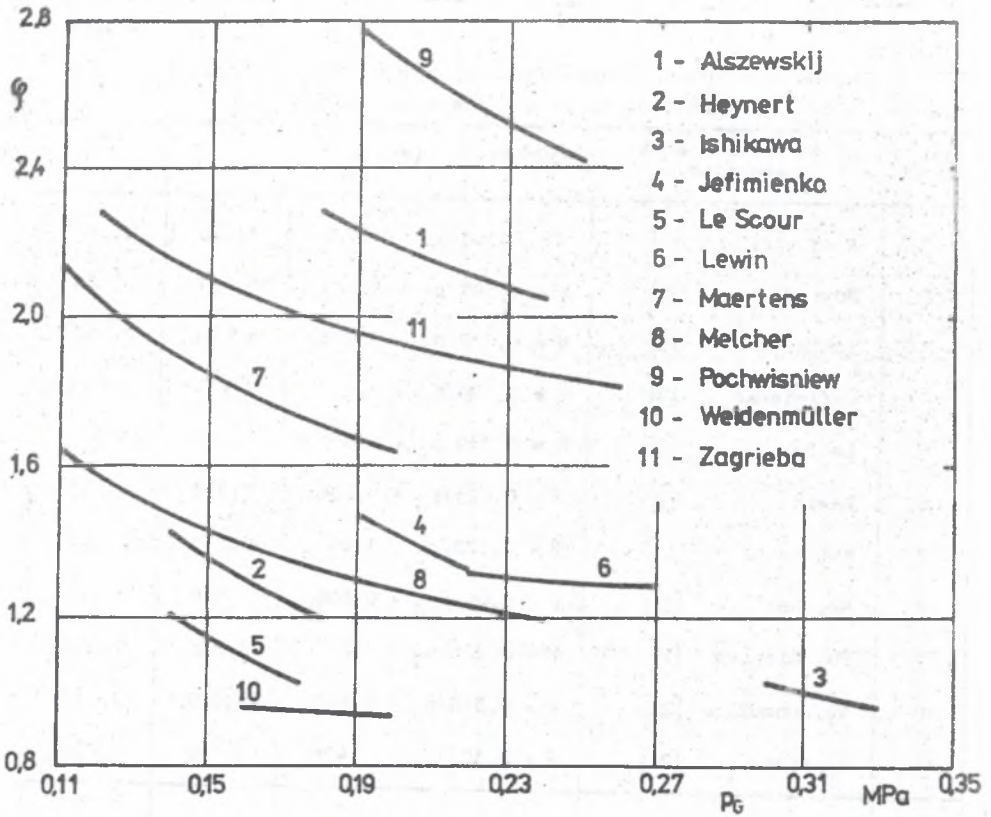
Zestawienie równań empirycznych ujmujących wpływ ciśnienia  
w gardzieli wielkiego pieca na funkcję

Nr serii	Nazwa serii i pozycja literatury	Równanie empiryczne	$V_j$	Waga $w_j$
1	Alszewskij [1]	$\varphi = 0,165/p_G + 1,366$	1,440	0,283
2	Heynert [5]	$\varphi = 0,141/p_G + 0,425$	5,681	0,072
3	Ishikawa [6]	$\varphi = 0,182/p_G + 0,408$	34,948	0,012
4	Jefimienko [7]	$\varphi = 0,194/p_G + 0,452$	7,651	0,053
5	Le Scour [8]	$\varphi = 0,119/p_G + 0,359$	8,079	0,050
6	Lewin [9]	$\varphi = 0,023/p_G + 1,204$	7,443	0,055
7	Maartens [11]	$\varphi = 0,122/p_G + 1,031$	50,423	0,008
8	Melcher [13]	$\varphi = 0,093/p_G + 0,806$	1,514	0,269
9	Pochwisniew [15]	$\varphi = 0,285/p_G + 1,276$	3,830	0,107
10	Weidenmüller [23]	$\varphi = 0,018/p_G + 0,847$	33,009	0,012
11	Zagrieba [24]	$\varphi = 0,105/p_G + 1,406$	5,166	0,079
-	Rodzina	$\varphi = 0,107/p_G + \varphi_0$	-	-

kiego pieca na funkcję  $\varphi$  dla danej serii. Równania te zestawiono w tablicy 2.

W wyniku analizy równań indywidualnych (rys. 5) do opisu funkcji  $\varphi$  zdecydowano się zastosować równanie jednoparametrowej rodziny krzywych w postaci równania (8), przyjmując jako parametr wyraz wolny. Materiał doświadczalny stanowiły wymienione wcześniej serie pomiarowe. Przeprowadzona dodatkowo analiza nie wykazała istnienia korelacji między współczynnikami indywidualnych równań empirycznych  $a_1$  i  $a_2$ . Równanie jednoparametrowej rodziny krzywych wyznaczono z warunku:

$$\sum_{j=1}^{11} \sum_{i=1}^{n_j} w_j \left( \varphi'_{ji} - \frac{a_1}{p_G'_{ji}} - \varphi_0 \right)^2 = \min, \quad (13)$$



Rys. 5. Zależność empiryczna  $\varphi(p_G)$  według różnych autorów

Fig. 5. Empirical dependence  $\varphi(p_G)$  according to different authors

gdzie  $n_j$  oznacza liczbę punktów pomiarowych w  $j$ -tej serii. Wielkość  $w_j$  jest wagą serii wyznaczoną z relacji:

$$w_j = \frac{1/v_j}{\sum_{j=1}^n (1/v_j)}, \quad (14)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} [(v_{p_{ji}}/m_{p_{ji}})^2 + (v_{\varphi_{ji}}/m_{\varphi_{ji}})^2]}{n_j - 2} \quad (15)$$

gdzie:

$m_{p\ ji}$ ,  $m_{\varphi\ ji}$  - średnie błędy bezwzględne spostrzeżeń  $p_G$  i  $\varphi$  w i-tym punkcie pomiarowym j-tej serii,

$v_{p\ ji}$ ,  $v_{\varphi\ ji}$  - wartości poprawek spostrzeżeń w i-tym punkcie pomiarowym j-tej serii wyznaczone metodą rachunku wyrównawczego [18].

Wielkości  $\varphi'_{ji}$  i  $p'_{G\ ji}$  są poprawionymi wartościami spostrzeżeń [18] i wynikają z zależności:

$$\varphi'_{ji} = \varphi_{ji} + v_{\varphi\ ji} \quad (16)$$

$$p'_{G\ ji} = p_{G\ ji} + v_{p\ ji} \quad (17)$$

Wartości  $w_j$  oraz  $V_j$  dla każdej serii podano w tabelicy 2. Z warunku (13) otrzymuje się 12 równań, z których wyznacza się wartość uogólnionego współczynnika  $a_1$  oraz jedenaście współczynników  $\varphi_{0j}$  indywidualnych dla każdej serii. Otrzymany układ równań rozwiązano numerycznie, uzyskując równanie jednoparametrowej rodziny krzywych. Równanie to podano w tabelicy 2.

### 3. Zależność empiryczna między funkcjami $\varphi$ i $\psi$

o przyjęciu założenia o stanie równowagi w strefie rezerwy z równań (3), (4) wynika:

$$\frac{(CO)_r (H_2O)_r}{(CO_2)_r (H_2)_r} = K_x \quad (18)$$

gdzie  $K_x = K_1/K_2$ .

Analogiczną zależność podaje Bogdandy [2]. Po przekształceniu wyrażenia (18) można otrzymać zależność:

$$\psi_r = \frac{\varphi_r}{K_x + \varphi_r} \quad (19)$$

która ilustruje wzajemny związek między funkcjami  $\varphi$  i  $\psi$  w strefie rezerwy.

W gardzieli wielkiego pieca skład gazu odbiega od składu równowagowego, lecz, jak podkreśla Goldsztejn [3], związek między funkcjami  $\varphi$  i  $\psi$  istnieje nadal. Z wyrażenia (19) wynika, że związek ten jest niezależny od ciśnienia. Współzależność pomiędzy funkcjami  $\varphi$  i  $\psi$  była już przedmiotem wcześniejszych badań [20], [25]. W badaniach tych przyjmowano liniową zależność między funkcjami  $\varphi$  i  $\psi$ . Obecnie postać tej zależności zmieniono.

Do wyznaczenia nowej postaci wykorzystano osiem związków ujmujących współzależność  $\varphi$  i  $\psi$  opracowanych przez różnych autorów [20]. Sześć spośród tych związków ma identyczną postać i jest ona zbliżona do zależności (19), różnice występują tylko w wartościach współczynników. Do wyznaczenia zależności uśrednionej przyjęto postać równania  $\psi(\varphi)$  najczęściej podawaną przez badaczy:

$$\psi = \frac{a_4}{1 + \varphi} + \psi_0. \quad (20)$$

Wykorzystując wymienionych wcześniej osiem związków wyznaczono uśrednioną zależność między funkcjami  $\psi$  i  $\varphi$  z poniższego warunku:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left[ \sum_{i=1}^8 (\psi_i - \frac{a_4}{1 + \varphi} - \psi_{0i})^2 \right] d\varphi = \min, \quad (21)$$

gdzie:

- 1 - numer indywidualnego równania empirycznego,
- $\varphi_1, \varphi_2$  - przedział zmian wartości funkcji  $\varphi$  wynikający z przesłanek praktycznych,
- $\psi_i$  - związki  $\psi(\varphi)$  podawane przez poszczególnych badaczy.

Z warunku (21) wyznaczono uśrednioną wartość współczynnika  $a_4$  i osiem indywidualnych dla każdej serii współczynników  $\psi_{0i}$ . Obecnie uśredniona zależność ujmująca związek funkcji  $\psi$  i  $\varphi$  ma postać:

$$\psi = -\frac{1,080}{1 + \varphi} + \psi_0, \quad (22)$$

gdzie parametr  $\psi_0$  wyznaczany będzie z jednorazowego pomiaru cieplnego badanego procesu wielkopiecowego.

#### 4. Równanie empiryczne ujmujące zależność $T_G(p_G)$

W celu określenia ogólnej postaci równania opisującego wpływ ciśnienia na temperaturę gazu w gardzieli wielkiego pieca wykorzystano bilanse substancjalne węgla i siarki, azotu oraz bilans energii dla dolnej strefy wymiany ciepła. Zastosowano także uproszczony bilans energii dla górnej strefy wymiany ciepła.

W dalszej analizie przyjęto następujące założenia:

- a) w strefie rezerwy panuje stan równowagi cieplnej i chemicznej,
- b) warunki wsadowe są ustabilizowane,
- c) przyjmuje się ustalony stan parametrów

$$T_D, F, O_{2D} = \text{idem.} \quad (23)$$

Ponadto przyjęto, że następujące wielkości nie zależą od zmian ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca:

- d) sumy udziałów tlenku i dwutlenku węgla oraz wodoru i pary wodnej w strefie rezerwy po spełnieniu warunków (5) i (23), (por. rys. 1)

$$(CO)_R + (CO_2)_R = C_R = \text{idem} , \quad (24)$$

$$(H_2)_R + (H_2O)_R = H_R = \text{idem} , \quad (25)$$

- e) w bilansie substancjalnym dla [dolnej strefy różnica między ilością węgla i siarki w produktach nieenergetycznych oraz ilością C + S w substratach nieenergetycznych w odniesieniu do jednostki surówki (stała  $\alpha_R$ , kmol/t sur.),
- f) w bilansie energii dla dolnej strefy różnica między sumą entalpii produktów nieenergetycznych i strat ciepła (do otoczenia oraz wody chłodzącej) a entalpią substratów nieenergetycznych w odniesieniu do jednostki surówki (stała  $\delta_R$ , kJ/t sur.),
- g) w bilansie energii dla górnej strefy różnica między sumą entalpii produktów stałych oraz strat ciepła a entalpią substratów [stałych w odniesieniu do jednostki surówki (stała  $q$ , kJ/t sur.).

Założenie g) znacznie upraszcza zagadnienie zjawisk zachodzących w szybie wielkiego pieca. Zostało ono jednak przyjęte, ponieważ celem prowadzonych rozważań jest wyłącznie analiza jakościowa procesu wymiany ciepła w szybie.

Bilans węgla i siarki

$$K_R \left( \frac{C_K}{12} + \frac{S_K}{32} \right) + F (C_F + S_F) = (G)_R \left[ (CO)_R + (CO_2)_R \right] + \alpha_R . \quad (26)$$

Bilans azotu

$$F (N_F + 0,79 l) + D (1 - O_{2D}) = (G)_R \left[ 1 - (CO)_R - (CO_2)_R - (H_2)_R - (H_2O)_R \right] . \quad (27)$$

Bilans energii dla dolnej strefy wymiany ciepła

$$K_R d_K + F(d_F + i_F + l i_1) + D (i_D + X_D i_{XD}) = \quad (28)$$

$$= (G)_R \left[ (CO)_R W_{CO} + (H_2)_R W_{H_2} + (i)_R \right] + \delta_R .$$

Uproszczony bilans energii dla górnej strefy wymiany ciepła

$$(G)_R \left[ (i)_R - (c_p)_G (T_G - T_0) \right] = q . \quad (29)$$

Z zależności (26) - (29) po wykorzystaniu (24) i (25) otrzymano:

$$T_G = A (CO)_R + B (H_2)_R + C, \quad (30)$$

gdzie:

$$A = \frac{1}{(c_p)_G} \left[ (1 - E) (i_{CO_2 R} - i_{CO_2 r}) - E W_{CO} \right], \quad (31)$$

$$B = \frac{1}{(c_p)_G} \left[ (1 - E) (i_{H_2 R} - i_{H_2 O r}) - E W_{H_2} \right], \quad (32)$$

$$C = \frac{1}{(c_p)_G} \left\{ (1 - E) \left[ C_R (i_{CO_2 R} - i_{N_2 R}) + \right. \right. \\ \left. \left. + H_R (i_{H_2 O R} - i_{N_2 R}) + i_{N_2 R} \right] + E \left[ \frac{1 - C_R - H_R}{1 - 0.2D} (i_D + X_D i_{XD}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{C_R d_K}{\frac{c_K}{12} + \frac{s_K}{32}} \right] \right\} + T_0 , \quad (33)$$

$$E = \frac{q}{\frac{C_R - F(C_F + S_F)}{\frac{c_K}{12} + \frac{s_K}{32}} d_K + F(d_F + i_F + l i_1) - \quad (34)$$

$$- \frac{F(N_F + 0.79 I)}{1 - 0.2D} (i_D + X_D i_{XD}) - \delta_R$$



Przy przyjętych założeniach (c, d, e, f, g) oraz (5) wielkości A, B, C i E praktycznie nie zależą od ciśnienia w wielkim piecu. Ponieważ wyrażenia A i B mają stosunkowo zbliżone wartości można stwierdzić, że temperatura gazu w gardzieli wielkiego pieca zależy od sumy  $(CO)_r$  i  $(H_2)_r$  w strefie rezerwy. Przy wzroście ciśnienia, zgodnie z regułą przekory, zmniejsza się udział tlenu węgla i wodoru w gazach redukcyjnych. Wynika stąd wniosek, że podwyższenie ciśnienia wywołuje spadek temperatury gazu w gardzieli wielkiego pieca. Potwierdzają to także wyniki innych rozważań teoretycznych [22], jak również wyniki pomiarów [5], [6], [7], [8], [10], [13], [14], [16], [21]. Analiza wykresu na rys. 1 wykazuje, że przebieg sumy udziałów  $(CO)_r + (H_2)_r$  w funkcji ciśnienia charakteryzuje się mniejszą krzywizną niż przebieg  $\varphi_r$ . W rzeczywistości przebieg funkcji  $T_G$ , opisany za pomocą (30), będzie się charakteryzował mniejszą krzywizną niż przebieg  $(CO)_r + (H_2)_r$ , ponieważ wraz ze wzrostem ciśnienia wielkości A i B będą wykazywać pewną tendencję malejącą (wskutek zwiększania się  $c_{pG}$ ). Ponieważ, jak wykazały to wcześniej przeprowadzone analizy [20], [25], funkcja  $T_G$  ma najmniejszy wpływ ze wszystkich funkcji empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych procesu wielkopieczowego. Do opisu tej funkcji zdecydowano się przyjąć zależność liniową

$$T_G = a_5 p_G + a_6 \quad (35)$$

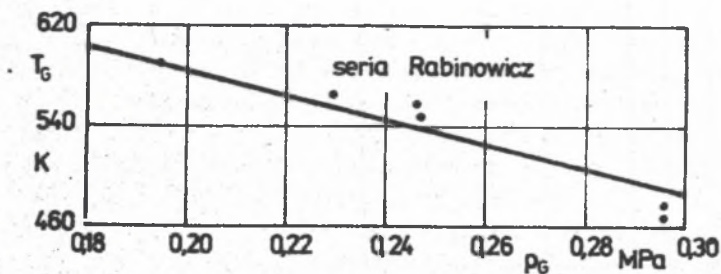
Podobnie jak w przypadku funkcji  $\varphi$ , również dla  $T_G$  przeprowadzono analizę mającą na celu zbadanie efektu synergicznego. Analizę tę przeprowadzono w analogiczny sposób jak dla funkcji  $\varphi$ . Otrzymane wyniki zestawiono w tablicy 3. Wyniki te są dość zróżnicowane, podobnie jak w poprzednim przypadku, lecz nie przemawiają jednoznacznie za występowaniem efektu synergicznego. Z przyczyn podobnych jak poprzednio w dalszej analizie założono addytywny wpływ wszystkich analizowanych parametrów na funkcję  $T_G$ .

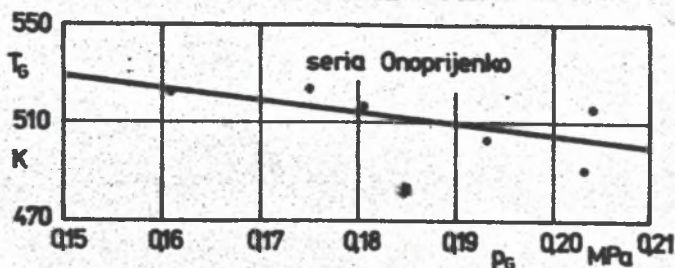
W celu wyznaczenia równania empirycznego ujmującego wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na funkcję  $T_G$  wykorzystano dane pomiarowe dla 10 serii [5], [6], [7], [8], [10], [12], [13], [14], [16], [21], które zestawiono w [19]. Analiza tych serii, z których trzy przedstawiono na rys. 6, 7, 8, potwierdza zasadność ujęcia zależności  $T_G(p_G)$  za pomocą funkcji liniowej. Zmierzone wartości temperatur  $T_G$  w wymienionych seriach korygowano sprowadzając je do poziomu dla średnich wartości parametrów  $T_D$ , F,  $O_{2D}$  w serii, wykorzystując w tym celu równania empiryczne  $T_G(T_D)$ ,  $T_G(F)$ ,  $T_G(O_{2D})$  [20]. Następnie dla każdej serii pomiarowej, wykorzystując metodę rachunku wyrównawczego do wyznaczania współczynników równań empirycznych [18], wyznaczono indywidualne równanie empiryczne opisujące wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na temperaturę gazu w gardzieli. Równania te zestawiono w tablicy 4. W wyniku analizy równań indywidualnych (rys. 9) oraz wobec stwierdzenia korelacji między współczynnikami kierunkowymi i wyrazami

Tablica 3

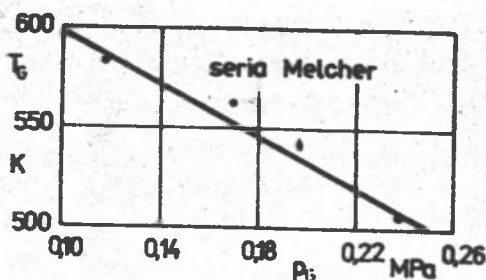
Wyniki badań efektu synergicznego dla funkcji  $T_G$ 

Grupa serii	Analizowane parametry	Numer, nazwa serii i pozycja literatury	Postać funkcji $f$	Znak współczynnika $b_1$	Stwierdzenie efektu synergicznego	
					Kryterium estymatora wariancji	Kryterium istotności współczynnika $b_1$
1	$p_G - T_D$	7 Onoprijenko [14]	$f_1$	+	TAK	NIE
			$f_2$	-	TAK	TAK
			$f_3$	-	TAK	TAK
			$f_4$	+	NIE	NIE
2	$p_G - F$	1 Heynert [5]	$f_1$	+	NIE	NIE
			$f_2$	+	NIE	NIE
			$f_3$	-	NIE	TAK
			$f_4$	+	NIE	NIE
		4 Le Scour [8]	$f_1$	+	TAK	NIE
			$f_2$	-	TAK	NIE
			$f_3$	-	TAK	TAK
			$f_4$	+	TAK	NIE

Rys. 6. Zależność empiryczna  $T_G$  ( $p_G$ ) według serii pomiarowej [16]Fig. 6. Empirical dependence  $T_G$  ( $p_G$ ) according to measurement serie [16]



Rys. 7. Zależność empiryczna  $T_G(p_G)$  według serii pomiarowej [14]  
 Fig. 7. Empirical dependence  $T_G(p_G)$  according to measurement serie [14]

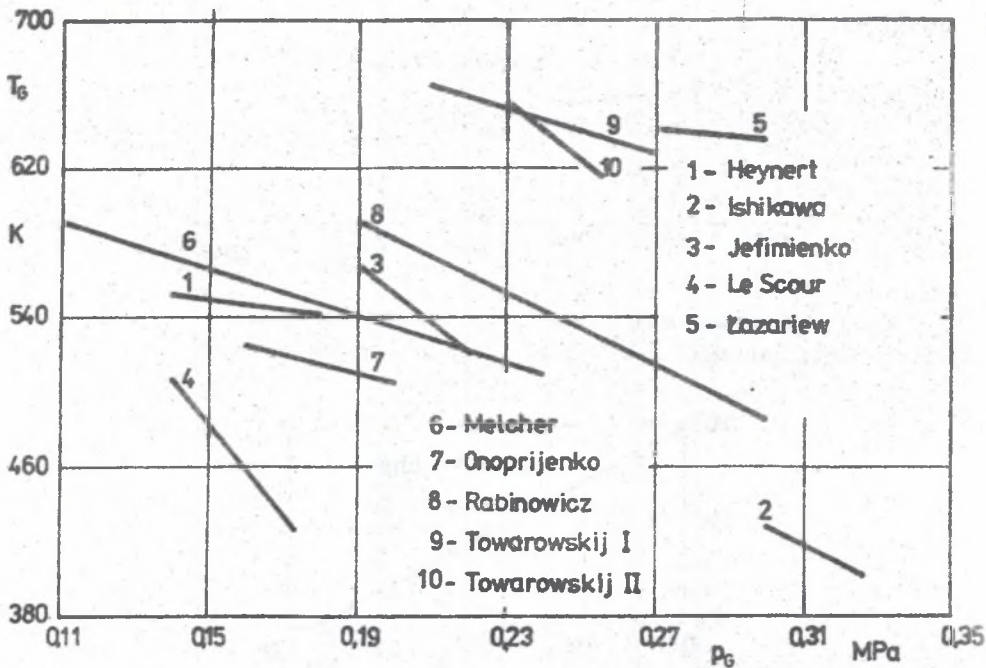


Rys. 8. Zależność empiryczna  $T_G(p_G)$  według serii pomiarowej [13]  
 Fig. 8. Empirical dependence  $T_G(p_G)$  according to measurement serie [13]

Tablica 4

Zestawienie równań empirycznych ujmujących wpływ ciśnienia  
 w gardzieli wielkiego pieca na funkcję  $T_G$

Nr serii	Nazwa serii i pozycja literatury	Równanie empiryczne	$V_j$	Waga $w_j$
1	Heynert [5]	$T_G = -241 p_G + 586$	2,193	0,120
2	Ishikawa [6]	$T_G = 1424 p_G + 851$	1,661	0,159
3	Jefimienko [7]	$T_G = -1650 p_G + 882$	7,210	0,037
4	Le Scour [8]	$T_G = -1796 p_G + 739$	4,085	0,065
5	Lazariew [12]	$T_G = -230 p_G + 704$	1,717	0,154
6	Melcher [13]	$T_G = -651 p_G + 663$	1,392	0,189
7	Onoprijenko [14]	$T_G = -480 p_G + 601$	2,484	0,106
8	Rabinowicz [16]	$T_G = -962 p_G + 776$	6,155	0,043
9	Towarowski I [21]	$T_G = -613 p_G + 794$	4,377	0,060
10	Towarowski II [21]	$T_G = -1703 p_G + 1048$	3,824	0,069
-	Rodzina	$T_G = (-1510 + 1,155 T_{GO}) p_G + T_{GO}$	-	-



Rys. 9. Zależność empiryczna  $T_G(p_G)$  według różnych autorów  
 Fig. 9. Empirical dependence  $T_G(p_G)$  according to different authors

wolnymi tych równań na poziomie ufności rzędu 0,80 do opisu funkcji  $T_G$  zdecydowano się zastosować zależność liniową o postaci:

$$T_G = (a_7 + a_8 T_{G0})p_G + T_{G0} \quad (36)$$

Materiał doświadczalny stanowiły wymienione wcześniej serie pomiarowe. Równanie jednoparametrowej rodziny prostych wyznaczono z warunku:

$$\sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{n_j} w_j [T'_{G j i} - (a_7 + a_8 T_{G0 j})p'_{G j i} - T_{G0 j}]^2 = \min,$$

gdzie  $w_j$  oznacza wagę serii, której wartość wyznaczono podobnie jak w przypadku funkcji  $\varphi$ . Z warunku (37) otrzymuje się 12 równań, z których wyznacza się wartości uogólnionych współczynników  $a_7$ ,  $a_8$  oraz współczynników  $T_{G0 j}$ , indywidualnych dla każdej serii. Otrzymany układ równań rozwiązano numerycznie. Równanie rodziny prostych podano w tabelicy 4. Za słusznością zastosowania rodziny prostych o postaci (36) przemawia również fakt zmniej-

szenia się resztowej sumy kwadratów w odniesieniu do przypadku, gdy zastosowano postać (35).

### 5. Uwagi końcowe

Opracowane równania empiryczne umożliwiają zastosowanie metody bilansowej obliczania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego w warunkach zmian ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca.

W artykule przeprowadzono analizę dotyczącą synergicznego wpływu ciśnienia gazu w gardzieli wielkiego pieca i pozostałych parametrów (dmuchu) na wartości funkcji empirycznych. Otrzymane wyniki są zróżnicowane, jednakże nie świadczą jednoznacznie za występowaniem tego efektu. Dlatego założono addytywny wpływ analizowanych parametrów na wartości funkcji empirycznych. Ostrożność w interpretacji otrzymanych rezultatów wynikała ze stosunkowo wąskiego zakresu zmian analizowanych parametrów w seriach użytych do analizy.

Podane zależności empiryczne mogą być uściślane, a analiza efektu synergicznego pogłębianą w miarę pozyskiwania nowych serii pomiarowych.

### LITERATURA

- [1] Alszewskij A.E., Bratzenko W.P., Bolszakowa Ł.I., Kopyrin I.A., Niekrasow W.G.: Analiz raboty domiennoj pieczy bolszowo abjema. *Mietałżurg* 1964, nr 12, s. 4.
- [2] Bogdandy L., Engell H.: *Reduktion der Eisenerze*. Verlag Stahleisen mbH/Düsseldorf Springer - Verlag Berlin/Heidelberg/N.York, 1967.
- [3] Goldsztejn N.Ł.: *Wodorod w domiennom prociessie*. *Mietałżurgija*, Moskwa 1971.
- [4] Gumz W.: *Gas producers and blast furnaces. Theory and methods of calculation*. J.Wiley a. Sons, New York 1950.
- [5] Heynert G., Legilie E.: *Bell - less top for high top pressure furnaces*. *Developments in Ironmaking Practice* 1972, p. 109.
- [6] Ishikawa Y.: *Some considerations on the operation of large blast furnaces*. *Rev. Metall.* 1976, nr 3, p. 283.
- [7] Jefimienko G.G., Kotow K.J., Dyszlewicz J.J., Żak A.M., Gubin A.I.: *Domiennoj piawka na szichtie s ofljusowanymi magniezialnymi lokatyszani*. *Stal* 1972, nr 5, s. 387.
- [8] Le Scour C.: *Amélioration de la mise au mille au haut fourneau 3 d'USI-NOR a'Dunkeque*. *Circ. Inf. Techn.* 1972, nr 1, s. 159.
- [9] Lewin L., Wanczikow W., Szur A.B., Kajłow W.D., Bjałyj Ł.A.: *Oswojenije moszcznoj domiennoj pieczy*. *Stal* 1963, nr 9, s. 773.
- [10] Łazariew B.Ł., Gierman B.Ł., Bużinskij A.A., Jancien B.D., Rutkowskaja E.N.: *Forsirowanije choda domiennoj pieczy s powyszieniem obszcziewo pierlepada dawlenij*. *Mietałżurg* 1971, nr 9, s. 4.
- [11] Maertens P., Delinc U.: *L'utilisation de la contre - pression sur un haut fourneau de grande capacite*. *Troisiemens Journees Inter. de Siderurgie* 1962, nr 1-4, s. 213.

- [12] Mazanek E., Sabela W.: Procesy spalania i wymiany ciepła w wielkim piecu. "Śląsk", Katowice 1970
- [13] Melcher N.B., Marshall W.E., Woolf P.L.: Use of high top pressures and wind rate with sinter and pellet burdens. J. Metals 1967, nr 2, p.41.
- [14] Onoprijenko W.P., Starszinow G.N., Tkaczenko A.A., Sinickij W.D., Frijadin L.M., Portnyj L.J.: Rabota domiennej pieczy s dawleniem do 1,1 at. Stal 1957, nr 9, s. 772.
- [15] Pochwisniew A.N., Szarow S.I., Żilkin N.K., Orłow J.A., Matwiejew P.M.: Rabota domiennej pieczy objemom 2000 m<sup>3</sup>. Mietałłurg 1964, nr 1, s. 7.
- [16] Rabinowicz G.W., Urbanowicz G.I., Wasiliew S.W., Wizłow E.M., Antipow N.S.: Pierwyj pieriod raboty i oswojenije projektonoj moszcznosti domiennej pieczy objemom 3200 m<sup>3</sup>. Mietałłurg 1974, nr 7, s. 12.
- [17] Strzałkowski A., Sliżyński A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów. PWN Warszawa 1978.
- [18] Szargut J., Kolenda Z., Majza E.: Zastosowanie rachunku wyrównawczego do wyznaczania równań empirycznych. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1983, nr 3, s. 80.
- [19] Szargut J., Ziębik A., Rusinowski H., Kruczek T.: Opracowanie metod obliczeniowych i programów na EMC w zakresie oceny efektów energetycznych intensyfikacji procesu wielkopiecowego. Etap D1 1984, ITC.
- [20] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwowo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Wydawnictwo PAN, Ossolineum, 1983.
- [21] Towarowski I.G.: Efektownost nagriewa dutje w suczcziestwujuszczich i pierspiektiwnych usłowjach domiennej pławki. Mietałłurg 1972, nr 7, s. 10.
- [22] Wakabayashi K., Fujiura M.: Theoretical analysis on the high top - gas - pressure operation and oxygen - enriched operation of blast furnace, Trans. Isij 1970, nr 3, p. 207.
- [23] Weidenmüller H.R., Sinha K.M.: Diseno de altos hornos y experiencias con alta presion de Tragante. Altos Hornos '78 Tecnologia, Diseno y Operacion 1978, p. 414.
- [24] Zagrzeba A.W., Slinko N.F., Fiedorienko G.I.: Zaduwka i rabota domiennej pieczy objemom 2000 m<sup>3</sup>, Mietałłurg 1962, nr 1, s. 8.
- [25] Ziębik A.: Wpływ dodatku paliw zastępczych i podgrzania dmuchu na gospodarkę cieplną wydziału wielkich pieców. ZN Pol. Sl., Energetyka z. 55, Gliwice 1975.
- [26] Ziębik A., Kruczek T., Madeja M.: Opracowanie metod obliczeniowych i programów na EMC w zakresie oceny efektów energetycznych intensyfikacji procesu wielkopiecowego. Etap B1 1982, ITC.
- [27] Ziębik A., Madeja M.: The influence of oxygen enrichment on the energy characteristics of the blast-furnace assembly. Bulletin d l'Academie Polonaise des Sciences, Serie des sciences techniques (w druku).

Recenzent:

prof. dr inż. Władysław Sabela

Wpłynęło do Redakcji w maju 1985

ЭМПИРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ  
НА КОЛОШНИКЕ НА СКЛАД И ТЕМПЕРАТУРУ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА

Р е з ю м е

На основе результатов исследований доступных в зарубежной литературе, разработаны эмпирические уравнения определяющие влияние давления на колошнике на отношение  $CO/CO_2$  в колошниковом газе и на температуру этого газа. Общий образ этих уравнений принят на основе теоретического анализа. Принимая отдельные эмпирические зависимости за однопараметрические семейства функций, они обобщаются на все доменные печи. Незвестный параметр определяется на основе теплового измерения исследуемого доменного процесса.

EMPIRICAL EQUATIONS DESCRIBING THE INFLUENCE OF TOP PRESSURE UPON THE  
COMPOSITION AND TOP GAS TEMPERATURE

S u m m a r y

Empirical equations which describe the influence of the top gas pressure upon the ration  $CO/CO_2$  in top gas and upon their temperature have been elaborated taking into account results of measurements derived from foreign literature. The general form of the equations have been received basing on results of theoretical analysis.

The empirical relation has been generalized on the all blast - furnaces described by one - parameter family functions. The unknown parameter is found basing on heat measurement of the blast furnaces processess.