ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967

Seria: ENERGETYKA z. 26 Nr kol. 194

ANDRZEJ ZIĘBIK
Katedra Energetyki Cieplnej

WPŁYW TEMPERATURY DMUCHU NA SKŁAD I TEMPERATURĘ GAZU WIELKOPIECOWEGO

Streszczenie. Na podstawie wyników pomiarowych dotyczących czterech wielkich pieców wyprowadzono uogólnione równanie empiryczne ujmujące wpływ temperatury dmuchu na stosunek CO do ($CO + CO_2$) w gazie wielkopiecowym. Równanie to określa jednoparametrową rodzinę krzywych. Parametr jest ustalany podług wyników jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca. Stosunek ilości wodoru w gazie wielkopiecowyr do ilości wodoru w dmuchu i koksie ujęto jako wielkość proporcjonalną do stosunku $CO/(CO + CO_2)$. Zależność temperatury gazu t_g od temperatury dmuchu t_L podano równaniem pęku prostych.

1. Wstęp

Przedstawione w pracy [5] równania teoretyczne, ujmujące wpływ temperatury t_L dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego, wymagają dla przeprowadzenia konkretnych obliczeń znajomości uogólnionej postaci funkcji $\varphi(t_L)$, $\psi(t_L)$ i $t_g(t_L)$. Zgodnie z pracą [5] funkcje φ i ψ są zdefiniowane równaniami:

$$\varphi = \frac{CO}{CO + CO_2} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{V_g(H_2 + 2CH_4)}{V_L X_L + V_{H_2k}} \tag{2}$$

gdzie:

CO, CO_2, H_2, CH_4 - udziały molowe składników suchego gazu wielkopiecowego,

V_g, V_L, V_{H_2k} - ilość suchego gazu wielkopiecowego, suchego dmuchu i wodoru w koksie, m_n^3/jednostkę surówki,

X_L - stopień zawilżenia dmuchu, m_n^3 H_2O/m_n^3 pow. suchego.

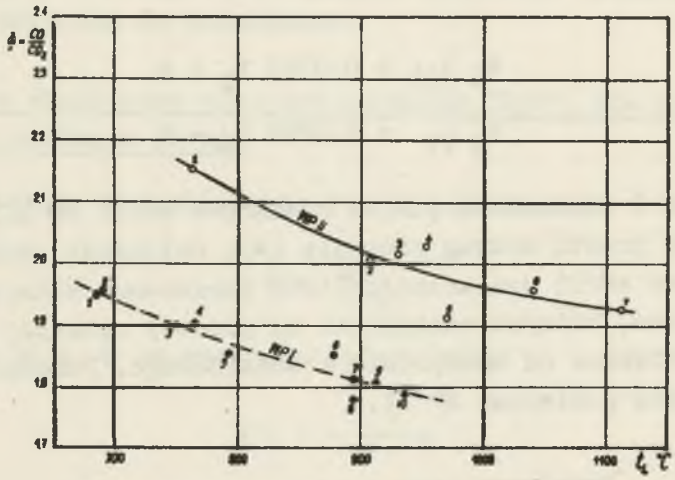
Analityczne ustalenie postaci tych funkcji nie wydaje się obecnie możliwe, gdyż wymagałoby zastosowania niedostatecznie jeszcze poznanych praw kinetyki procesów cieplnych i chemicznych przebiegających w wielkim piecu. Równania empiryczne opisujące funkcje φ, ψ i t_g można wyprowadzić przez analizę wyników pomiarów wielkich pieców. Pomiary winny być prowadzone przy zmiennej temperaturze dmuchu jednak przy możliwie stałych innych parametrach procesu wielkopiecowego.

2. Opracowanie wyników pomiarów dotyczących składu gazu wielkopiecowego

Wykorzystano wyniki pomiarowe cytowane w publikacjach [3] i [6] oraz archiwalne dane pomiarowe z raportów dobowych jednej z polskich hut. Uzyskane z literatury serie pomiarowe nie wymagały dodatkowego opracowania przed ich wykorzystaniem. Pomiary bowiem wielkich pieców, z których wyniki podają autorzy publikacji [3] i [6], prowadzono przy zachowaniu prawie stałych warunków pracy a zmieniano wyraźnie tylko temperaturę dmuchu. Serie pomiarowe z literatury ujęto na rys. 1.

Wyniki pomiarowe uzyskane z archiwum jednej z polskich hut obejmują pewien wybrany okres pracy wielkich pieców. Rozpatrywane serie pomiarowe dotyczą konkretnie dwu wielkich pieców, oznaczonych dalej symbolami WP III i WP IV. Dane te, ze względu na zmienne warunki prowadzenia wielkich pieców w tej hucie, wymagały szczegółowej selekcji polegającej na wyeliminowaniu punktów pomiarowych uzyskanych w warunkach wyraźnie odbiegających od wybranych warunków średnich. Na wstępie wyeliminowano dane pomiarowe uzyskane w dniach gdy skład wsadu wielkopiecowego wyraźnie odbiegał od przeciętnego. Pozostałe

punkty poddano kolejno selekcji ze względu na ciśnienie dmuchu, zasadowość żużla oraz zawilżenie dmuchu.



Rys. 1. Stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym dla WP I i WP II

Eliminację ze względu na ciśnienie dmuchu i zasadowość żużla przeprowadzono na podstawie częstości występowania wartości liczbowych tych wielkości. Dla każdej z serii pomiarowych przyjęto więc zakresy, w których te wielkości przeważnie występują. Dla serii pomiarowej WP III przyjęto zakres zmian nadciśnienia 1,81 - 1,91 bar i zakres zmian zasadowości żużla 1,25 - 1,31. Dla serii pomiarowej WP IV przyjęto odpowiednio zakres zmian nadciśnienia dmuchu 2,16 - 2,26 bar, zasadowości żużla zaś 1,24 - 1,32. Punkty pomiarowe, które wykraczały poza te zakresy zostały odrzucone.

Selekcję punktów pomiarowych ze względu na zawilżenie dmuchu przeprowadzono przyjmując, że zmienia się ono liniowo z temperaturą powietrza według równania [5]:

$$w_L = \xi_w \, t_L + 4 \qquad (3)$$

gdzie:

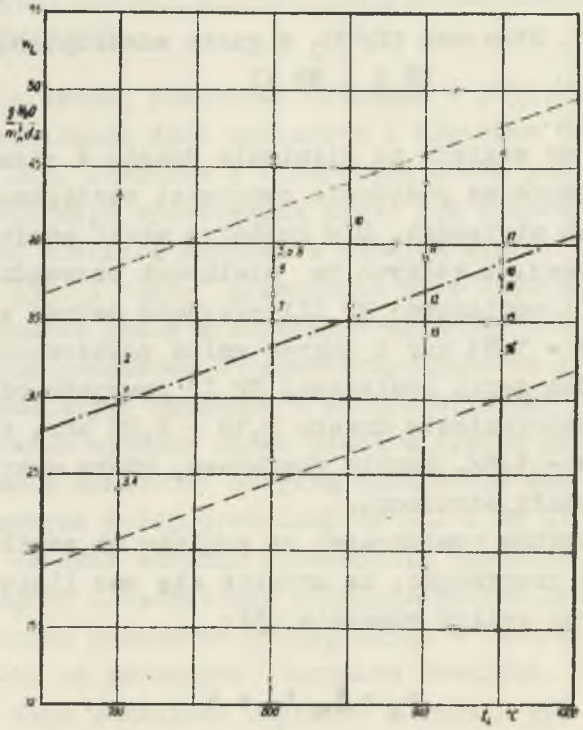
w_L - stopień zawilżenia dmuchu, g H_2O/m_n^3 pow. suchego,
t_L - temperatura dmuchu, ^oC.

Stałą ξ_w wyznaczono dla każdej z serii pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów. Dla serii pomiarowych WP III i WP IV zmianę zawilżenia dmuchu z temperaturą powietrza podają równania:

$$w_{L\ III} = 0{,}0367\ t_L + 4 \qquad (4)$$

$$w_{L\ IV} = 0{,}0298\ t_L + 4 \qquad (5)$$

Na rysunku 2 naniesiono punkty pomiarowe serii WP III oraz poprowadzono prostą według równania (4). Obliczono odchylenie standardowe serii pomiarowej. Linie kreskowane eliminują punkty pomiarowe, których odchylenie od prostej opisanej równaniem (4) jest większe od odchylenia standardowego. Podobnie postępowano z serią pomiarową WP IV.



Rys. 2. Zależność stopnia zawilżenia od temperatury dmuchu dla WP III

Punkty pomiarowe z wielkich pieców WP III i WP IV, które spełniły wszystkie podane kryteria eliminacji zestawiono na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 2 punkty pomiarowe spełniające wszystkie kryteria są numerowane.

3. Równanie empiryczne ujmujące stosunek CO/CO_2 dla poszczególnych wielkich pieców

Zamiast funkcji φ analizowano funkcję prostszą:

$$\Phi = \frac{CO}{CO_2} \tag{6}$$

Funkcje φ i Φ są związane zależnością:

$$\varphi = 1 - \frac{1}{\Phi + 1} \tag{7}$$

Wstępna analiza danych pomiarowych zamieszczonych w publikacjach [3] i [6] pozwoliła stwierdzić, że funkcja Φ winna być opisana równaniem:

$$\Phi = A\, e^{-B \frac{t_L}{1000}} + C \tag{8}$$

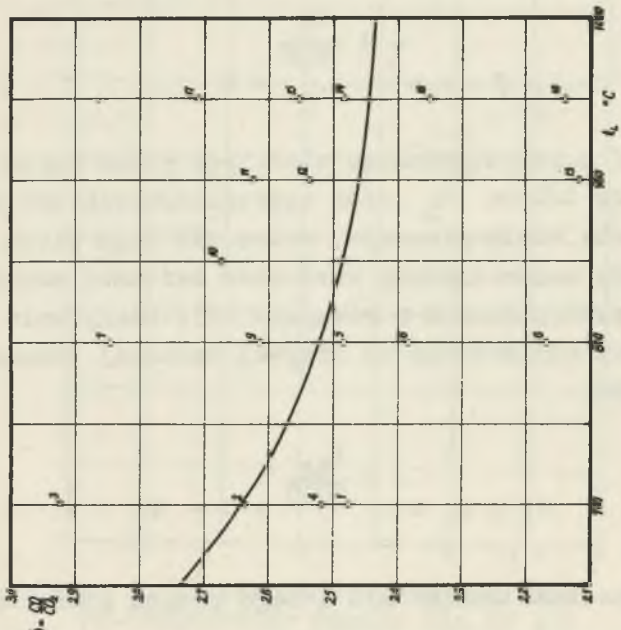
Dysponując dla rozpatrywanego wielkiego pieca serią pomiarów temperatury dmuchu t_L oraz odpowiadających jej udziałów CO i CO_2 w gazie wielkopiecowym, można dla tego pieca obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów wartości współczynników A, B i C występujących w równaniu (8). Odchylenie ε_i dowolnego punktu pomiarowego od krzywej opisanej równaniem (8) podaje zależność:

$$\varepsilon_i = A\, e^{-B \frac{t_{Li}}{1000}} + C - \Phi_i \tag{8}$$

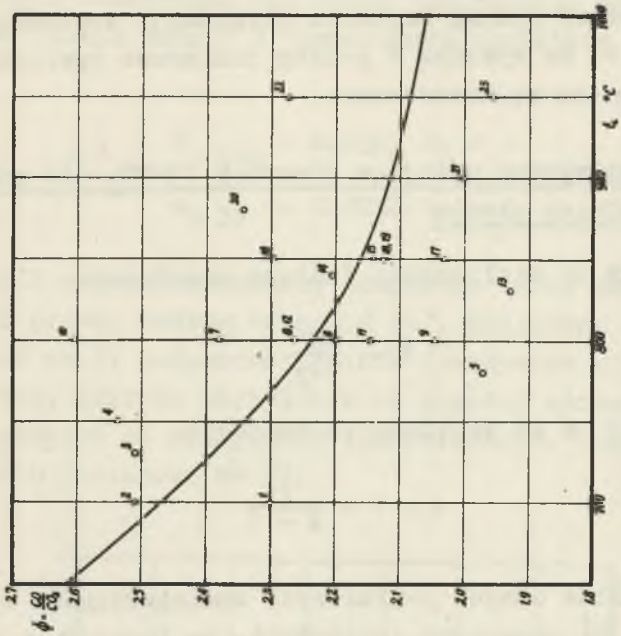
gdzie:

t_{Li} - wartość stosunku [illegible] a i-tego punktu pomiarowego, °C,

$\Phi_i = \left(\frac{CO}{CO_2}\right)_i$ - wartość stosunku CO/CO_2 dla i-tego punktu pomiarowego.



Rys. 3. Stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym dla WP III



Rys. 4. Stosunek CO/CO_2 w gazie wielkopiecowym dla WP IV

Żądanie minimum sumy kwadratów odchyleń ε_i prowadzi do układu trzech równań służących do wyznaczenia współczynników równania (8):

$$\frac{\partial [\varepsilon\varepsilon]}{\partial A} = 0; \qquad \frac{\partial [\varepsilon\varepsilon]}{\partial B} = 0; \qquad \frac{\partial [\varepsilon\varepsilon]}{\partial C} = 0$$

skąd:

$$A\,[z\,z] - [\Phi z] + C\,[z] = 0 \tag{10}$$

$$A\,[z\,z\,t_L] - [z\,t_L\Phi] + C\,[z\,t_L] = 0 \tag{11}$$

$$A\,[z] - [\Phi] + n\,C = 0 \tag{12}$$

gdzie:

$$z_i = e^{-B\frac{t_{L\,i}}{1000}} \tag{13}$$

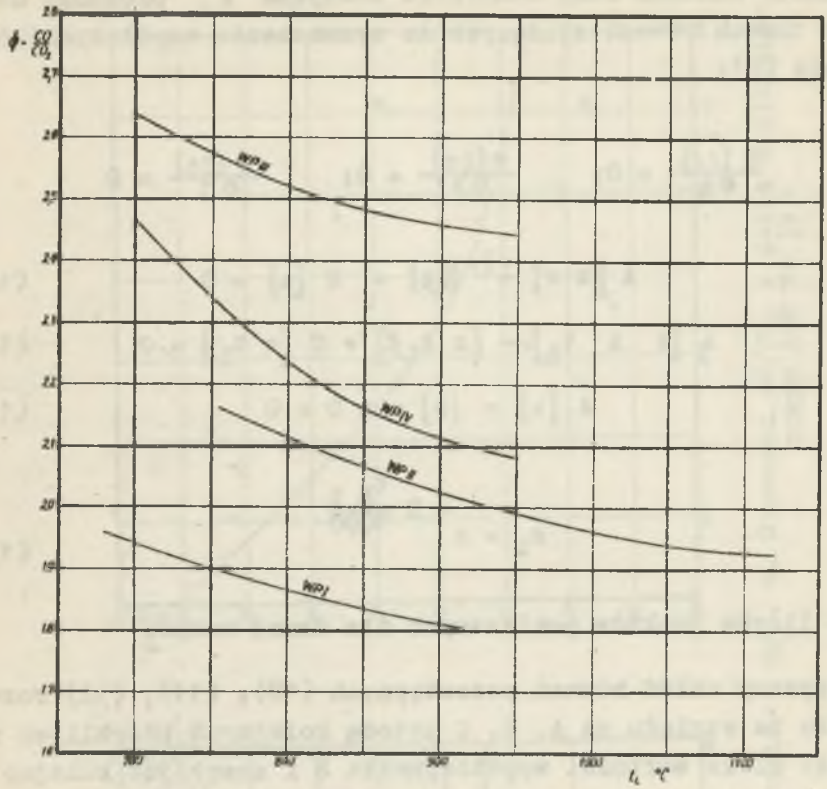
n - liczba punktów pomiarowych dla danej serii.

Otrzymany układ równań przestępnych (10), (11), (12) rozwiązuje się ze względu na A, B, C metodą kolejnych przybliżeń zakładając kilka wartości współczynnika B i zawężając kolejno przedział. Obliczenia współczynników A, B i C dla poszczególnych serii pomiarowych przeprowadzono na elektronicznej maszynie cyfrowej ZAM-2. Wyniki obliczeń umieszczono w tablicy 1. Na rysunkach 1, 3, 4 naniesiono wyniki pomiarów oraz nakreślono krzywe według równania (8) dla poszczególnych serii pomiarowych. Na rysunku 5 zestawiono funkcje Φ dla wszystkich analizowanych serii pomiarowych.

Tablica 1

Współczynniki funkcji Φ według równania (8) dla poszczególnych wielkich pieców

Seria pomiarowa	A	B	C
WP I	1,84	2,35	1,586
WP II	10,77	4,78	1,872
WP III	26,95	6,78	2,401
WP IV	60,67	6,96	2,000



Rys. 5. Zestawienie funkcji ϕ
dla poszczególnych wielkich pieców

4. Uogólnione równanie empiryczne dla stosunku CO/CO_2

Jak wynika z rysunku 5 przy jednakowej temperaturze dmuchu w różnych wielkich piecach występują różne wartości stosunku CO/CO_2. Równanie opisujące funkcję ϕ należy zatem dobierać indywidualnie dla każdego wielkiego pieca. Ogólne równanie empiryczne opisujące funkcję ϕ lub φ powinno zawierać tylko jeden współczynnik, ustalany podług wyników jednorazowego pomiaru badanego wielkiego pieca [5]. Równanie uogólnione powinno więc określać jednoparametrową rodzinę krzywy h.

Krzywe tej rodziny nie powinny się przecinać, gdyż uniemożliwiałoby to jednoznaczny wybór krzywej podług wyników jednorazowego pomiaru. Rodzinę krzywych nie przecinających się

można uzyskać przyjmując stałą wartość współczynnika B. Jak wykazały obliczenia przyjęcie wspólnej uśrednionej wartości B dla wszystkich krzywych niewiele wpływa na sumę kwadratów odchyleń. Na tej podstawie przyjęto jako parametr rodziny krzywych współczynnik C, uzależniając współczynnik A od wartości C.

Obliczone wartości współczynników B dla poszczególnych pieców uzyskano z pomiarów przeprowadzonych w różnych warunkach. Dlatego współczynnik B dla uogólnionego równania należy obliczyć jako średnią ważoną. Waga w_k dla każdej z serii pomiarowych jest odwrotnie proporcjonalna do oceny wariancji $\tilde{\sigma}_k^2$ (k - numer serii pomiarowej WP I, ..., WP IV). Ponieważ najmniejszy rozrzut punktów pomiarowych występuje dla WP I, przyjęto dla tej serii pomiarowej wagę $w_I = 1$.

$$w_k = \frac{\tilde{\sigma}_I^2}{\tilde{\sigma}_k^2} \tag{14}$$

Ocenę wariancji oblicza się za pomocą wzoru:

$$\tilde{\sigma}_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^{\,2}}{n - m} \tag{15}$$

gdzie:

m - liczba wyznaczonych parametrów w danej funkcji.

Dla pozostałych serii pomiarowych wagi mają następujące wartości:

$$w_{II} = 0{,}2330; \qquad w_{III} = 0{,}0076; \qquad w_{IV} = 0{,}0127$$

Uśredniony współczynnik B wynosi:

$$B = \frac{\sum_{k=1}^{4} w_k B_k}{\sum_{k=1}^{4} w_k} = 2{,}88 \tag{16}$$

Przyjęcie dla wszystkich serii pomiarowych stałej wartości współczynnika B powoduje, że dla obliczonych uprzednio wartości współczynników A i C nie jest spełniony warunek minimum sumy kwadratów odchyleń. Nowe wartości tych stałych należy obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów z równania:

$$\Phi = A\, e^{-0{,}00288\, t_L} + C \qquad (17)$$

Warunek minimum sumy kwadratów odchyleń ε_i prowadzi w tym przypadku do układu dwu równań liniowych ze względu na niewiadome A i C. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Współczynniki funkcji Φ według równania (17) dla poszczególnych wielkich pieców

Seria pomiarowa	A	C
WP I	2,29	1,637
WP II	3,28	1,780
WP III	2,79	2,255
WP IV	5,62	1,685

W celu pełnego uogólnienia równania (17) przyjęto, że współczynnik A zmienia się liniowo wraz z wartością C.

$$A = \alpha + \beta C \qquad (18)$$

Współczynniki α i β wyznaczono za pomocą metody najmniejszych kwadratów w oparciu o wartości A i C zestawione w tablicy 2. Z uwagi na różne warunki w jakich wyznaczono serie pomiarowe każdy składnik w sumie kwadratów odchyleń ε_k należy brać z wagą w_k odwrotnie proporcjonalną do oceny wariancji $\tilde{\sigma}_k^2$. Dla serii pomiarowej WP I przyjęto wagę $w_I = 1$. Wagi oraz oceny wariancji dla poszczególnych serii pomiarowych wyznaczo-

no w oparciu o równania (14) i (15). Dla pozostałych serii pomiarowych wagi mają wartości:

$$w_{II} = 0{,}2377; \qquad w_{III} = 0{,}0071; \qquad w_{IV} = 0{,}0115$$

Metoda najmniejszych kwadratów zastosowana w tym przypadku prowadzi do poszukiwania minimum funkcji:

$$\sum_{i=1}^{4} w_k \varepsilon_k^2 = \min \tag{19}$$

Otrzymany układ równań liniowych ze względu na α i β daje po rozwiązaniu:

$$\alpha = -5{,}09 \qquad \beta = 4{,}56$$

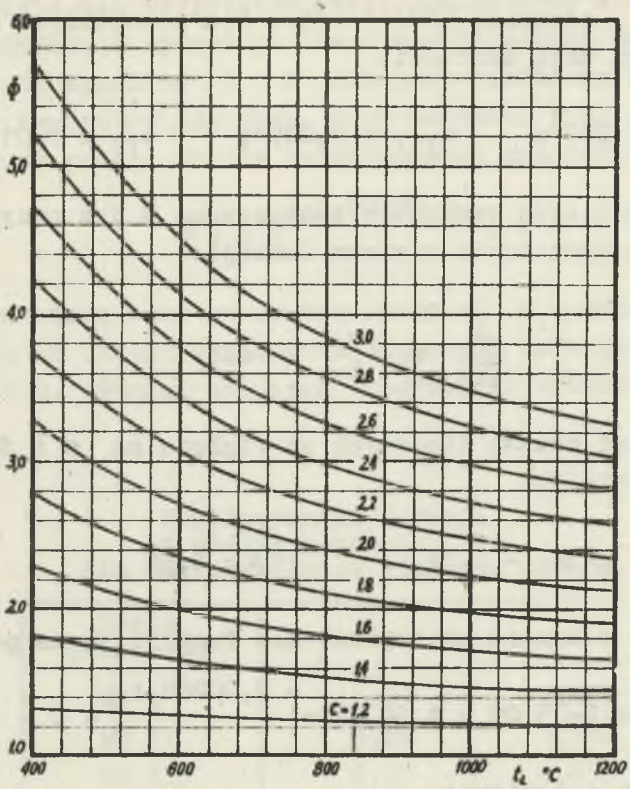
Uogólnione równanie empiryczne dla funkcji Φ ma postać:

$$\Phi = (-5{,}09 + 4{,}56\,C)\, e^{-0{,}00288\, t_L} + C \tag{20}$$

Dla funkcji φ natomiast:

$$\varphi = 1 - \frac{1}{(-5{,}09 + 4{,}56\,C)\, e^{-0{,}00288\, t_L} + C + 1} \tag{21}$$

Na rysunku 6 przedstawiono wykres jednoparametrowej rodziny krzywych opisanej równaniem (20). Wykres ten może służyć do znalezienia stałej C dla badanego wielkiego pieca na podstawie wyników jednorazowego pomiaru udziałów CO i CO_2 w gazie wielkopiecowym oraz temperatury dmuchu.



Rys. 6. Wykres jednoparametrowej rodziny krzywych opisanej uogólnionym równaniem funkcji Φ

5. Ustalenie zależności między funkcjami ψ i φ

W tablicy 3 zestawiono dane pomiarowe z publikacji [6], wartości funkcji ψ i φ oraz stosunku ψ / φ dla odpowiednich temperatur dmuchu. Z zestawienia tego wynika, że stosunek funkcji ψ / φ jest wartością prawie stałą, niezależną od temperatury dmuchu. Prawidłowość ta znajduje potwierdzenie w literaturze [1], [2], [4]. Na podstawie wymienionych pozycji literatury można przyjąć, że stosunek ψ / φ wynosi średnio:

$$\frac{\psi}{\varphi} = 0{,}98 \qquad (22)$$

Wartości stosunków ψ/φ przytoczone w tablicy 3 są w większości zbliżone do górnej granicy zakresu zmian ψ/φ podawanego w literaturze.

Tablica 3

Zestawienie serii pomiarowej WP II [6] x)

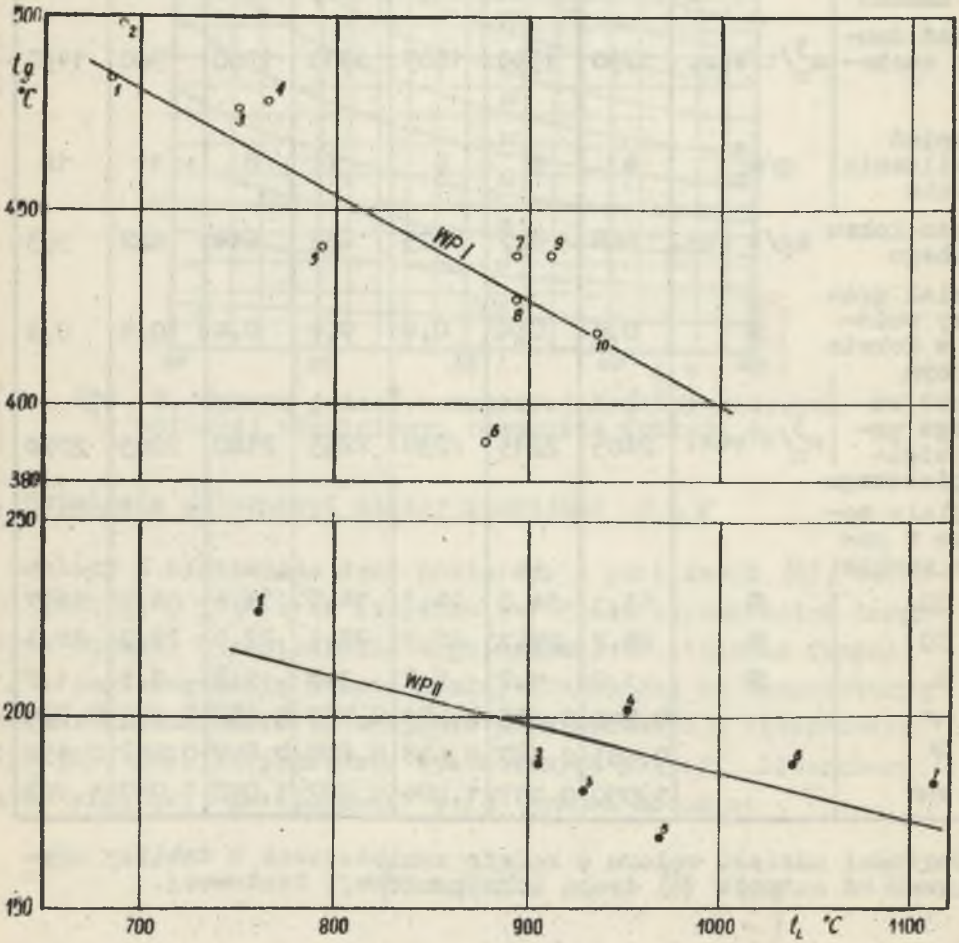
Wielkość mierzona lub obliczona	Jednostka	Numer pomiaru						
		1	2	3	4	5	6	7
Temperatura dmuchu	°C	762	907	930	953	970	1040	1113
Ilość dmuchu suchego	m_n^3/t sur.	1750	1590	1605	1610	1560	1560	1450
Stopień zawilżenia dmuchu	g/m_n^3	4	6	6	11	8	11	12
Ilość koksu suchego	kg/t sur.	668	627	623	632	614	622	593
Udział gramowy wodoru w koksie suchym	%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ilość suchego gazu wielkopiecowego	m_n^3/t sur.	2405	2215	2230	2265	2180	2205	2070
Udziały molowe w gazie suchym:								
CO_2	%	13,1	14,0	14,1	14,0	14,6	14,4	14,7
CO	%	28,2	28,1	28,4	28,4	27,9	28,2	28,3
H_2	%	1,2	1,2	1,2	1,5	1,3	1,5	1,7
ψ		0,746	0,665	0,671	0,675	0,658	0,673	0,724
φ		0,683	0,667	0,668	0,670	0,657	0,662	0,658
ψ/φ		1,090	0,997	1,004	1,007	1,002	1,017	1,100

x) Wartości udziału wodoru w koksie zamieszczone w tablicy uzyskano od autorów [6] drogą korespondencji listownej.

Przyjęcie stałej wartości stosunku ψ/φ ma mały wpływ na wyniki obliczeń wskaźników energetycznych ze względu na małą zawartość wodoru w gazie wielkopiecowym.

6. Zależność między temperaturą gazu wielkopiecowego a temperaturą dmuchu

Wpływ temperatury dmuchu na temperaturę gazu wielkopiecowego analizowano w oparciu o wyniki pomiarów cytowane w publikacjach [3] i [6]. Na rysunku 7 pokazano punkty pomiarowe z obu publikacji. Przyjęto, że funkcję przedstawiającą zależność tempera-



Rys. 7. Zależność temperatury gazu wielkopiecowego od temperatury dmuchu dla WP I i WP II

tury t_g gazu od temperatury t_L dmuchu można z dostateczną dokładnością ująć równaniem pęku prostych:

$$t_g = D\left(1 - 0{,}405\,\frac{t_L}{1000}\right) \qquad (23)$$

Stałą D wyznacza się indywidualnie podług wyników jednorazowego pomiaru badanego wielkiego pieca. Współczynnik 0,405 w równaniu (23) obliczono za pomocą metody najmniejszych kwadratów przy równoczesnym uwzględnieniu danych z publikacji [3] i [6]. Dla serii pomiarowych WP I i WP II otrzymano odpowiednio D = 671,7 i D = 311,3. Na rysunku 7 pokazano przebieg obu prostych.

Na zakończenie autor pragnie wyrazić gorące podziękowanie Panu prof. dr inż. J. Szargutowi za wskazanie problemu i cenne wskazówki przy jego opracowaniu.

LITERATURA

[1] BABARYKIN N.N., JUSZIN F.A.: Opriedielenije stiepieni ispolzowanija wodoroda w domiennoj pieczi. Stal (1966) nr 1, str. 10/17.

[2] BOGDANDY L. von, SCHAEFFERS W.: Vergleichbare Bewertung von Wasserstoffträgern für das Einblasen in das Hochofengestell. Stahl und Eisen (1962) nr 1, str. 1/18.

[3] GAŁATONOW A.Ł.: Wlijanije tiempieratury dutja na tiechniko-ekonomiczeskije i tiechnołogiczeskije pokazatieli domiennoj pławki. Stal 23 (1963) nr 10, str. 869/74.

[4] SCHÜRMAN E., BÜLTER D.: Vorausberechnung des Koksoverbrauches im Hochofen auf Grund einer zweistufingen Wärme - Stoff - und Reduktionsbilanz. Archiv für das Eisenhüttenwesen (1964), Bd. 35, nr 8, str. 677/89.

[5] SZARGUT J.: Wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka nr 26. Gliwice 1967.

[6] ZISCHKALE W., HEYNERT G., BEER H.: Auswirkung der Heißwindtemperaturen auf die Betriebsergebnisse des Hochofens. Stahl und Eisen 83 (1963) nr 18, str. 1117/23.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДУТЬЯ НА СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРУ ДОМЕННОГО ГАЗА

Р е з ю м е

На основании результатов тепловых измерений четырех доменных печей выводиться обобщенное эмпирическое уравнение, представляющее влияние температуры дутья на отношение CO к ($CO + CO_2$) в доменном газе. Это уравнение определяет однопараметрное семейство кривых. Параметр вычисляется на основе результатов единичного теплового измерения доменной печи. Отношение количества водорода в доменном газе к количеству водорода в доменном дутье и коксе принимается пропорционально к отношению $CO/(CO + CO_2)$. Зависимость температуры газа от температуры дутья определяется уравнением пучка прямых.

THE INFLUENCE OF BLAST TEMPERATURE ON THE COMPOSITION AND TEMPERATURE OF BLAST FURNACE GAS

S u m m a r y

On the base of the measurement results concerning four blast furnaces, the author derives the generalized empirical equation describing the influence of blast temperature on ratio CO to ($CO + CO_2$) in the blast furnace gas. This equation determines the one parameter family of curves. The parameter is determined by the single heat measurement results of blast furnace. The ratio of hydrogen amount in the blast - furnace gas to hydrogen amount in the blast and coke is assumed to be proportional to the ratio $CO/(CO + CO_2)$. Dependence of gas temperature t_g on the blast temperature t_L is given by the equation of a pencil of straight lines.