ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967

Seria: ENERGETYKA z. 26 Nr kol. 194

JAN SZARGUT, ANDRZEJ ZIĘBIK
Katedra Energetyki Cieplnej

PRZYBLIŻONE RÓWNANIA UJMUJĄCE WPŁYW PODGRZANIA DMUCHU NA WSKAŹNIKI ENERGETYCZNE PROCESU WIELKOPIECOWEGO

Streszczenie. Wykorzystując równania teoretyczne [3] oraz równania empiryczne podane w [4] opracowano program obliczeń wskaźników energetycznych na elektroniczną maszynę cyfrową. Przeprowadzono obliczenia dla pięciu wielkich pieców. Wyniki tych obliczeń stanowiły podstawę do ustalenia przybliżonych równań ujmujących wpływ podgrzania dmuchu na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego.

1. Wprowadzenie

Równania teoretyczne wyprowadzone w oparciu o bilanse substancjalne pierwiastków C, H, O, N i bilans energii [3] umożliwiają obliczenie wskaźników energetycznych dla różnych temperatur dmuchu podług wyników jednorazowego pomiaru wielkiego pieca tzn. pomiaru dotyczącego jednej temperatury dmuchu. Można oczywiście wykonać ten pomiar kilkakrotnie przy ustabilizowanym wsadzie i ustabilizowanej temperaturze dmuchu, otrzymane zaś wyniki uśrednić. W tablicy 1 zestawiono wielkości, które należy zmierzyć podczas pomiaru cieplnego wielkiego pieca. Ilość gazu wielkopiecowego oblicza się na podstawie bilansu substancjalnego azotu z równania:

$$V_g = \frac{0{,}79\ V_L}{[N_2]} \qquad (1)$$

Należy zwrócić uwagę by wielkości c, h, w, W_k, V_g i V_L wymienione w tablicy 1 były odniesione do tej samej jednostki tzn. by były konsekwentnie podane na kg koksu suchego lub na kg koksu wilgotnego.

Tablica 1

Dane wyjściowe przy obliczaniu wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego*)

Materiał	Wielkość mierzona	Jednostka	Wielkie piece					
			A	B	C	C"	D	E
Koks lub paliwo zastępcze	Udziały gramowe:							
	węgiel c	%	87,99	86,55	88,22	87,99	87,99	82,53
	wodór h	%	0,92	1,32	0,71	0,92	0,92	0,28
	wilgoć w	%	5,97	6,03	6,05	5,97	5,97	4,35
	Wartość opałowa W_k	kJ/kg	30 803	30 543	30 723	30 803	30 803	29 639
Gaz wielkopiecowy	Ilość gazu suchego V_g	m_n^3/kg koksu	4,124	4,166	4,039	4,001	4,146	3,401
	Udziały molowe w gazie suchym							
	CO	%	33,8	30,6	31,0	31,0	31,0	28,96
	CO_2	%	6,0	10,2	10,2	9,8	10,6	11,40
	H_2	%	2,1	2,2	1,9	2,1	2,0	2,64
	CH_4	%	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,31
	N_2	%	57,3	56,2	56,2	56,1	55,4	56,62
	O_2	%	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,00
	Stopień zawilżenia X_g	m_L^3 H_2O/m_n^3 g.s.	0,1228	0,1032	0,0995	0,1036	0,1063	0,0281
	Temperatura t_g	°C	440	300	160	300	220	373
Dmuch	Ilość dmuchu suchego V_L	m_n^3/kg koksu	2,991	2,964	2,873	2,842	2,908	2,488
	Stopień zawilżenia X_L	m_n^3 H_2O/m_n^3 d.s.	0,0072	0,0171	0,0295	0,0349	0,0349	0,0482
	Temperatura t_L	°C	800	800	760	770	830	898

*) Dane dla wielkiego pieca B są odniesione na kg suchego paliwa zastępczego. Dla wielkiego pieca E dane wyjściowe podano na kg koksu wilgotnego. Dla pozostałych wielkich pieców jednostką jest kg koksu suchego.

Entalpię fizyczną gazu wielkopiecowego, powietrza i pary wodnej figurującą w równaniach teoretycznych oblicza się przyjmując, że średnie ciepło właściwe tych gazów zmienia się liniowo z temperaturą:

$$\Delta i \Big|_{0}^{t} = (b + c \frac{t}{1000})\, t \qquad (2)$$

Współczynniki b i c dla poszczególnych gazów zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Współczynniki b i c w równaniu (2) dla poszczególnych gazów

Gaz	b $\frac{kJ}{m_n^3\ deg}$	c $\frac{kJ}{m_n^3\ deg^2}$
CO	1,2862	0,1243
CO_2	1,7501	0,4165
H_2	1,2753	0,0578
CH_4	1,6287	1,0157
N_2	1,2770	0,1147
O_2	1,3230	0,1453
H_2O	1,4675	0,2583
Powietrze suche	1,2841	0,1260

W artykule zastosowano symbolikę objaśnioną w publikacjach [3] i [4]. Indeks "1" określa wielkości uzyskane na podstawie wyników jednorazowego pomiaru danego wielkiego pieca.

2. Program obliczeń wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Przebieg obliczeń wskaźników energetycznych jest oparty na równaniach teoretycznych wyprowadzonych w pracy [3] oraz na

równaniach empirycznych podanych w [4]. Bazę wyjściową do obliczeń stanowią wyniki jednorazowego pomiaru wielkiego pieca ujęte w tablicy 1.

Według równań (12), (18), (19) podanych w [3] oblicza się na podstawie wyników analizy koksu wielkości a, d', d".

Wielkości l_1, u_1, x_1, y_1, z_1 wynikają z równań:

$$l_1 = \frac{V_{L1}}{W_k} \tag{3}$$

$$u_1 = \frac{V_{g1}([H_2]_1 + 2\,[CH_4]_1)}{W_k} \tag{4}$$

$$x_1 = \frac{V_{g1}\,X_{g1}}{W_k} \tag{5}$$

$$y_1 = \frac{V_{g1}\,[CO]_1}{W_k} \tag{6}$$

$$z_1 = \frac{V_{g1}\,[CO_2]_1}{W_k} \tag{7}$$

Współczynniki C i D występujące w równaniach empirycznych (21) i (23) podanych w pracy [4] wyznacza się na podstawie pomiaru udziałów CO i CO_2 w gazie wielkopiecowym i temperatury gazu wielkopiecowego. Współczynnik ξ w równaniu (7) cytowanym w [3] określa się na podstawie pomiaru stopnia zawilżenia dmuchu. Wartości φ_o i ψ_o otrzymuje się z równań (21) i (22) podanych w [4].

Entalpię fizyczną gazu wielkopiecowego, powietrza i pary wodnej oblicza się w oparciu o równanie (2) i tablicę 2. Współczynniki a_z i b_z we wzorze na zastępcze ciepło właściwe gazu wielkopiecowego wynikają z równań:

$$a_z = \sum_{i=1}^{n} z_i\, a_i \tag{8}$$

$$b_z = \sum_{i=1}^{n} z_i \, b_i \tag{9}$$

gdzie:

z_i - udziały molowe poszczególnych składników w wilgotnym gazie wielkopiecowym.

Obliczone poprzednio wielkości służą do wyznaczenia stałych procesu α, β, δ według metody opisanej w [3]. Z równań (26), (22), (15) podanych w [3] oblicza się następnie wielkości l_o, u_o, y_o.

Przytoczony tok obliczeń stanowi podstawę do analizy wpływu temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Dla zadanej temperatury t_L dmuchu wielkopiecowego oblicza się z równań empirycznych (21), (22), (23) podanych w [4] wartości φ, ψ, t_g oraz z równania (7) przytoczonego w [3] stopień zawilżenia dmuchu X_L. Na podstawie równań (2), (8), (9) i tablicy 2 wyznacza się entalpię ficzyczną gazu wielkopiecowego, powietrza i pary wodnej. Następnie z równań (34), (37), (38), (39), (42) podanych w [3] wyznacza się całkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego ω_k, ω_L, ω_g, ω_z i ε.

Różniczkowe wskaźniki energetyczne oblicza się na podstawie [3] ze wzoru:

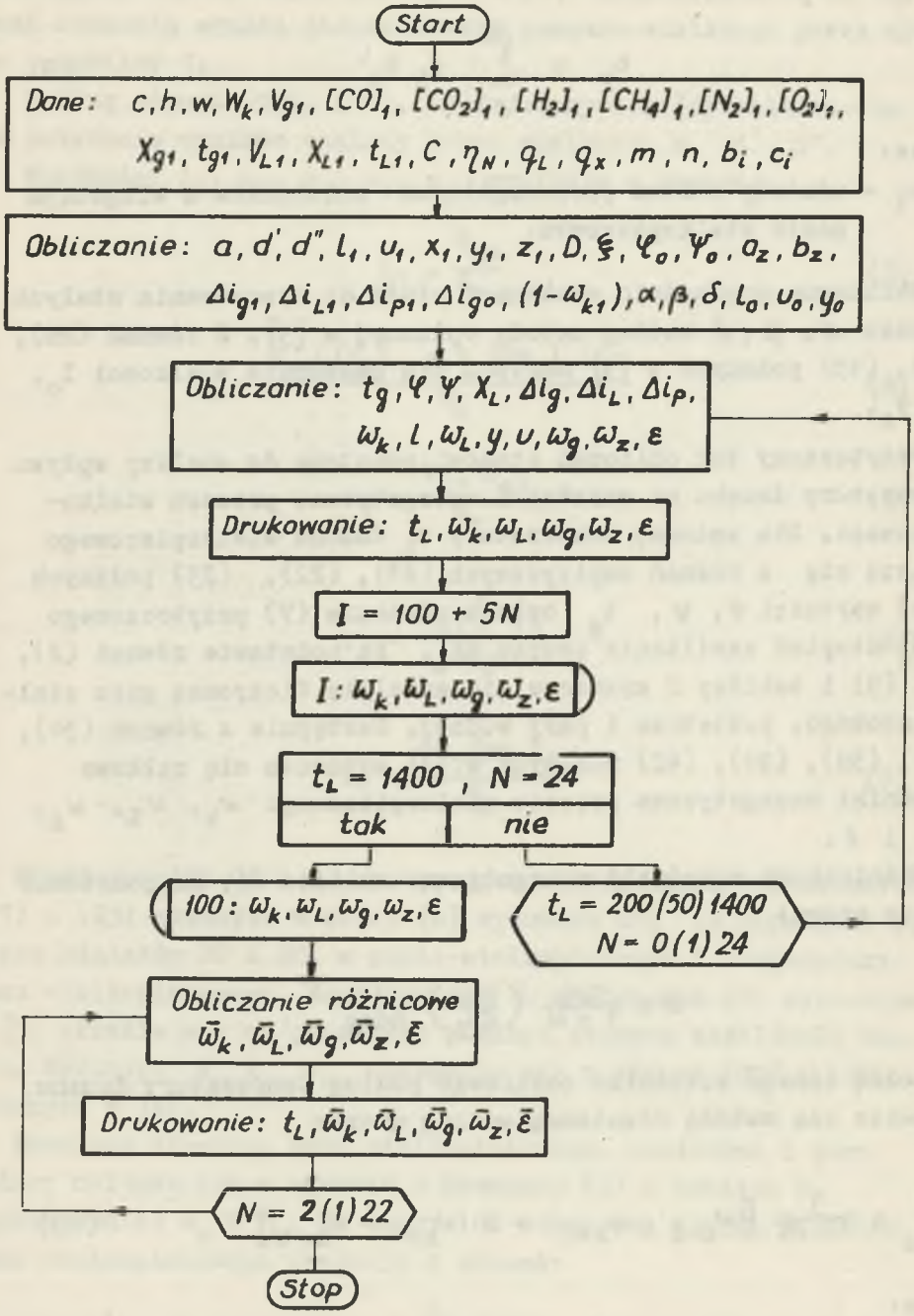
$$\bar{\omega} = \frac{100}{1-\omega} \left(\frac{d\omega}{dt_L}\right) \frac{1}{hdeg}$$

Pochodną danego wskaźnika całkowego podług temperatury dmuchu wyznacza się metodą różnicową według wzoru:

$$\left(\frac{d\omega}{dt_L}\right)_k = \frac{1}{12\,\Delta t} \left[(\omega_{k-2} - \omega_{k+2}) - 8\,(\omega_{k-1} - \omega_{k+1})\right] \tag{10}$$

gdzie:

Δt - przedział różnicowy (przyjęto $\Delta t = 50$ deg).



Rys. 1. Schemat blokowy obliczeń wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego na elektronicznej maszynie cyfrowej ZAM-2

Obliczenia wskaźni ów energetycznych procesu wielkopiecowego zostały zaprogramowane na elektroniczną maszynę cyfrową ZAM-2. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy obliczeń wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego.

Różniczkowy wskaźnik zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic $\bar{\omega}_N$ oblicza się z równania (40) podanego w [3] po uzyskaniu z maszyny cyfrowej wyników obliczeń $\bar{\omega}_L$.

3. Obliczenie różniczkowych wskaźników energetycznych dla badanych wielkich pieców

Przeprowadzono obliczenia wskaźników energetycznych dla pięciu wielkich pieców z dwu hut. Za podstawę do obliczeń przyjęto wyniki pomiarów dotyczące w każdym przypadku jednej temperatury dmuchu. Wyniki tych pomiarów zestawiono w tablicy 1. Badane wielkie piece oznaczono symbolami A, B, C, D, E. Dla wielkiego pieca C wykonano dwukrotnie obliczenia podług dwu pomiarów z różnych okresów czasu. Do wsadu w wielkim piecu B dodawano węgiel kamienny. Podane więc w tablicy 1 wielkości c, h, w i W_k dla pieca B były obliczone jako średnie ważone dla mieszaniny koksu i węgla kamiennego.

Następujące dane przyjęto w obliczeniach jako stałe dla wszystkich badanych pieców:

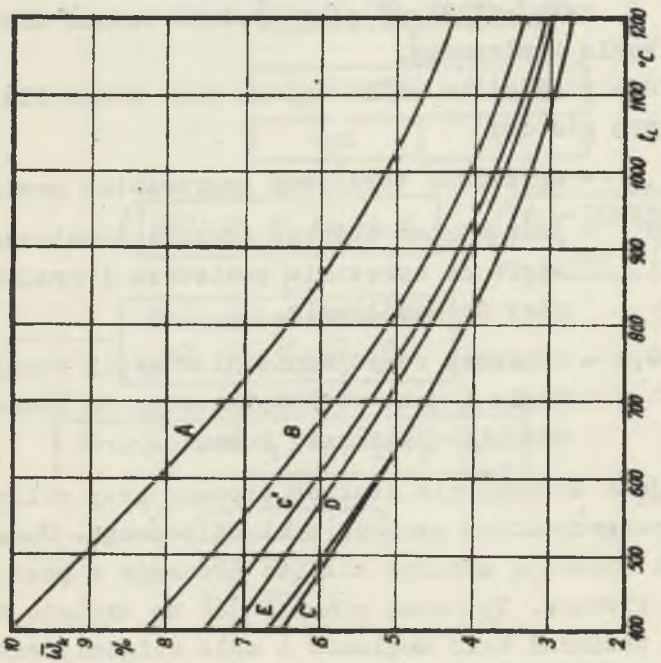
$\eta_N = 0{,}8$ – sprawność termiczna nagrzewnicy powietrza

$q_L = 1100$ kJ/m^3_n – jednostkowe zużycie energii chemicznej węgla do sprężania powietrza i produkcji pary do nawilżania,

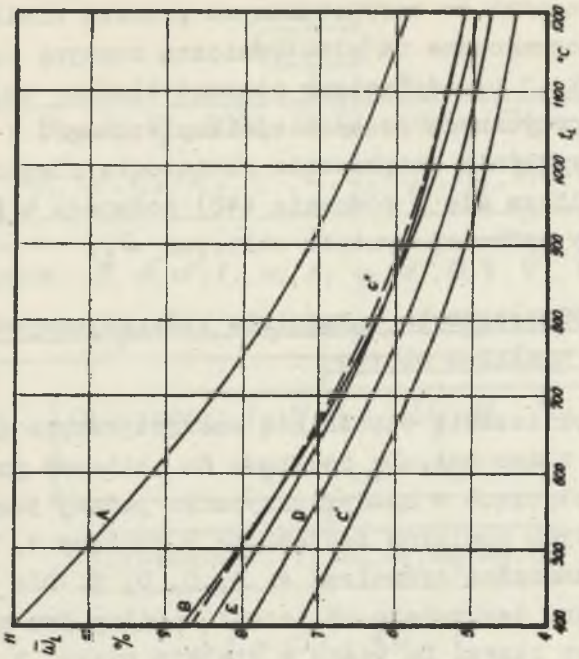
$q_x = 2800$ "

$m = 0{,}7$, $n = 0{,}4$ – stosunek ceny jednostki energii chemiczne węgla i gazu wielkopiecowego do jednostki energii chemicznej koksu.

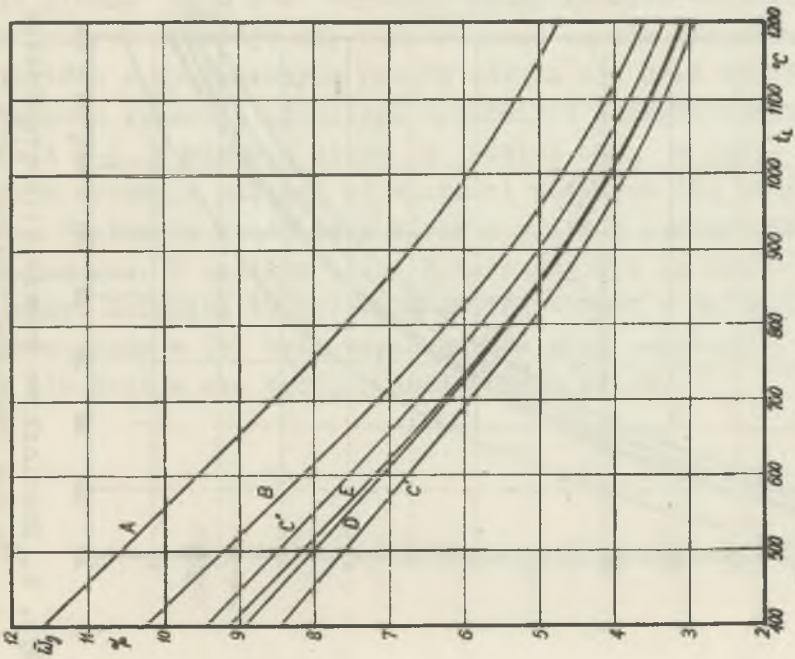
W tablicy 3 ujęto zestawienie stałych procesu przy obliczaniu wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego. Podane w tablicy wielkości obrazują wyraźne różnice procesów w poszczególnych wielkich piecach. Np. wsad pieca E [2] ze względu na duży udział spieku zawierał mało węglanów i mało wilgoci, wsad zaś pozostałych pieców zawierał dużo węglanów i dużo wilgoci.



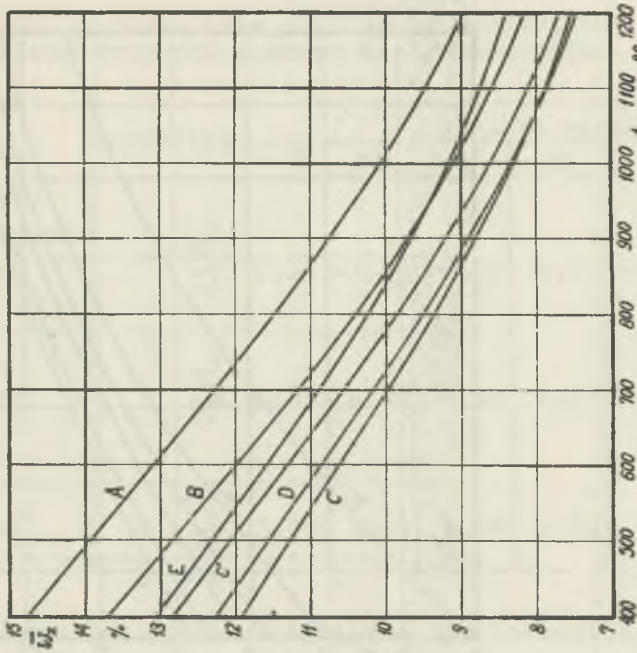
Rys. 2. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_k$ dla badanych wielkich pieców



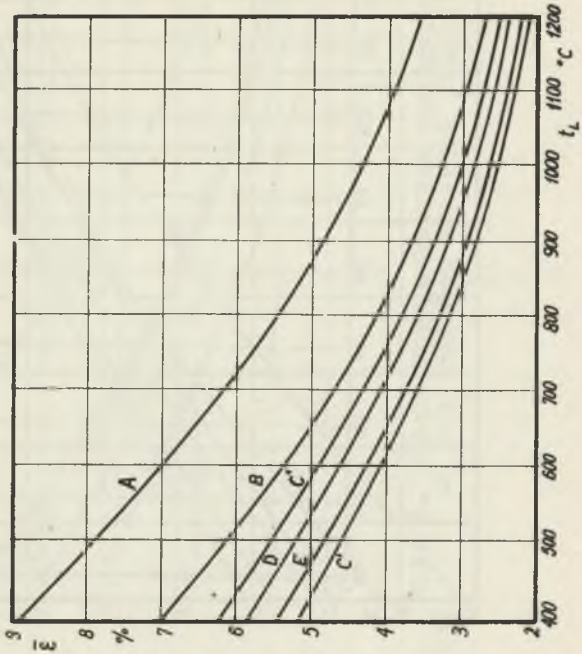
Rys. 3. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_L$ dla badanych wielkich pieców



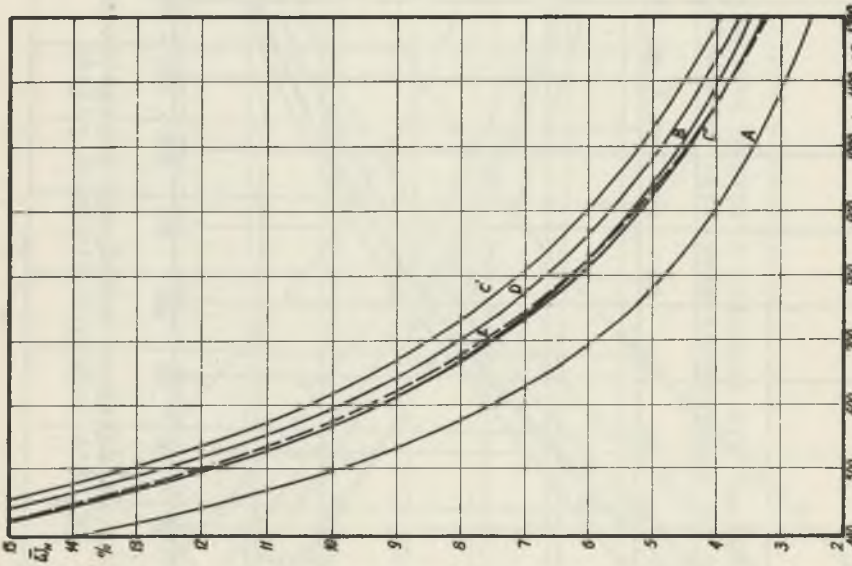
Rys. 4. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_g$ dla badanych wielkich pieców



Rys. 5. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_z$ dla badanych wielkich pieców



Rys. 7. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\varepsilon}$ dla badanych wielkich pieców



Rys. 6. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_N$ dla badanych wielkich pieców

Tablica 3

Stałe procesu przy obliczaniu wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Wielkość	Jednostka	Wielkie piece					
		A	B	C'	C"	D	E
Węgiel surówki - węgiel węglanów $\alpha \cdot 10^6$	$\frac{m_n^3}{kJ}$	0,04	-1,39	-0,32	0,21	-1,45	3,25
Tlen wsadu - tlen żużla $\beta \cdot 10^6$	$\frac{m_n^3}{kJ}$	3,64	6,18	7,48	6,25	7,30	5,76
Wilgoć wsadu (bez koksu) $\delta \cdot 10^6$	$\frac{m_n^3}{kJ}$	6,51	4,99	5,56	4,82	5,30	0,02

Na rysunkach 2-7 ujęto zestawienia różniczkowych wskaźników energetycznych dla wszystkich przebadanych wielkich pieców. Dla pieców C, D i E wartości różniczkowych wskaźników energetycznych układają się w stosunkowo wąskim obszarze, mimo że niektóre z wymienionych pieców różnią się dość wyraźnie. Odstępstwo wykazują przebiegi wskaźników energetycznych dla pieców A i B. W wielkim piecu A udział CO_2 w gazie wielkopiecowym wyraźnie odbiega od wartości podanych dla innych pieców. Wynika to stąd, że w wielkim piecu A produkowany był żelazomangan. W wielkim piecu B dodawany był do wsadu węgiel kamienny. Zwiększa to wyraźnie udział wodoru w paliwie. Równania teoretyczne w [3] były wyprowadzone przy założeniu, że do wsadu nie dodaje się żadnych dodatkowych paliw.

4. Przybliżone równania ujmujące wpływ podgrzania dmuchu na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego

Do rozważań nad możliwościami ustalenia przybliżonych równań na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego wzięto pod uwagę wyniki badań wielkich pieców C, D i E.

Spotykane w literaturze uproszczone wzory ujmują wpływ temperatury dmuchu na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego w postaci równania przesuniętej hiperboli [1]. Analiza przydatności tego typu równania dla omawianych wyników obliczeń wykazała, że krzywa ta przybliża dość dobrze wyniki obliczeń jedynie w zakresie wysokich temperatur dmuchu (powyżej 700°C). Poniżej zaś tej temperatury wyniki obliczeń wykazują znaczne odstępstwa od równania hiperboli.

Zdecydowano się więc poszukiwać uogólnionych równań ujmujących wpływ temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego w postaci funkcji wykładniczej:

$$\bar{\omega} = K e^{-L \frac{t_L}{1000}} + M \tag{11}$$

Obliczenia współczynników K, L, M przeprowadzono za pomocą metody najmniejszych kwadratów na elektronicznej maszynie cyfrowej ZAM-2 analogicznie jak przy wyznaczaniu współczynników funkcji Φ [4]. Otrzymano następujące przybliżone równania ujmujące wpływ temperatury dmuchu na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego.

Różniczkowy wskaźnik oszczędności koksu:

$$\bar{\omega}_k = 10{,}9\, e^{-0{,}00130\, t_L} + 0{,}5 \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{12}$$

Różniczkowy wskaźnik oszczędności dmuchu:

$$\bar{\omega}_L = 8{,}6\, e^{-0{,}00148\, t_L} + 3{,}4 \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{13}$$

Różniczkowy wskaźnik zmniejszenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego:

$$\bar{\omega}_g = 16{,}4\ e^{-0{,}00098\ t_L} - 2{,}0 \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{14}$$

Różniczkowy wskaźnik zmniejszenia energii chemicznej gazu oddawanego zewnętrznym odbiorcom:

$$\bar{\omega}_z = 14{,}3\ e^{-0{,}00078\ t_L} + 2{,}1 \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{15}$$

Różniczkowy wskaźnik zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic:

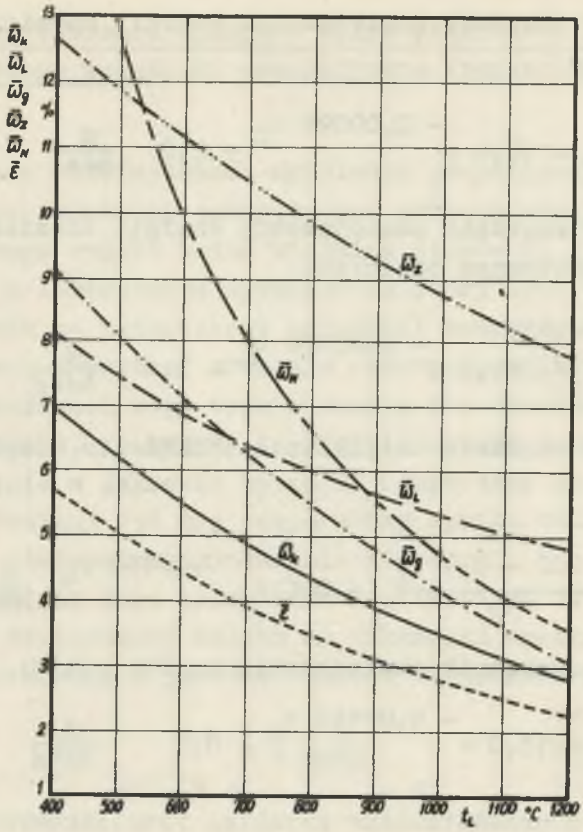
$$\bar{\omega}_N = \frac{10\ 000 - 3{,}4\ t_L}{t_L} - 8{,}6\ e^{-0{,}00148\ t_L} \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{16}$$

Różniczkowy wskaźnik zmniejszenia kosztu paliw:

$$\bar{\varepsilon} = 15{,}0\ e^{-0{,}00147\ t_L} + 0{,}7 \quad \frac{\%}{\text{hdeg}} \tag{17}$$

Na rysunku 8 przedstawiono przebieg różniczkowych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego według przybliżonych równań.

Przybliżone równania na różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego należy stosować tylko przy obliczeniach orientacyjnych. W razie wymagania większej dokładności należy przeprowadzić na elektronicznej maszynie cyfrowej obliczenia indywidualne dla badanego wielkiego piecy wykorzystując program opracowany w Katedrze Energetyki Cieplnej.

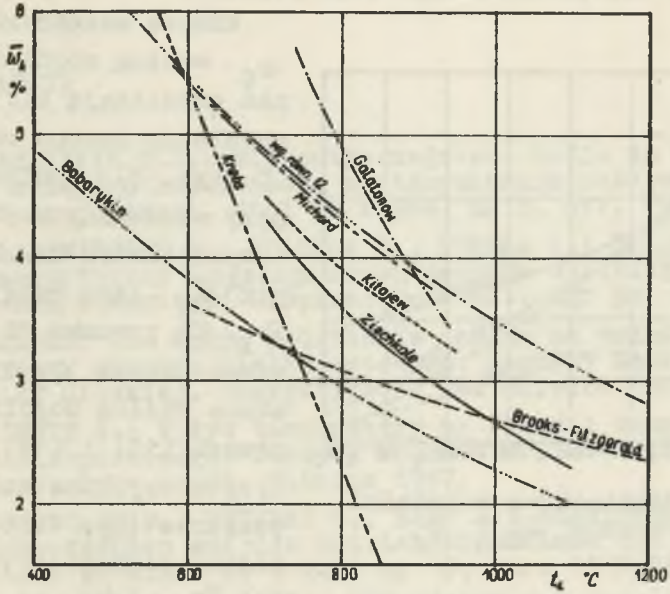


Rys. 8. Różniczkowe wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego podług przybliżonych równań

5. Wnioski oraz porównanie otrzymanych wyników z badaniami zagranicznymi

Porównanie otrzymanych wyników z danymi literatury jest najłatwiejsze przy rozpatrywaniu wskaźnika $\bar{\omega}_k$, gdyż tylko dla tego wskaźnika można znaleźć dużo danych w literaturze.
Z porównania położenia krzywych na rysunku 2 widać, że krzywa $\bar{\omega}_k$ przebiega przez tym mniejsze wartości, im bardziej sprawny jest badany wielki piec. Największe wartości $\bar{\omega}_k$ otrzymano bowiem dla tych przypadków, w których stała C w równaniu (21) podanym w [4] ma dużą wartość. Stała C charakteryzuje sprawność procesu redukcji w wielkim piecu. W wysoko sprawnych

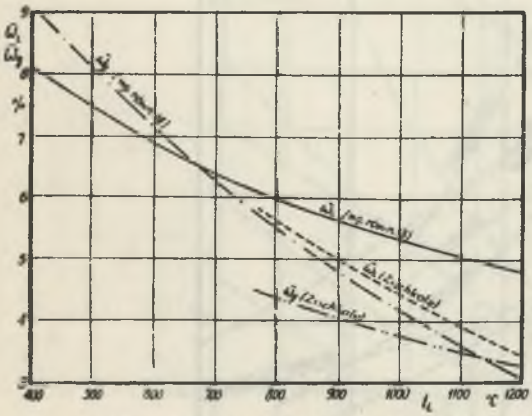
wielkich piecach wpływ temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne jest więc mniejszy niż w piecach mało sprawnych.



Rys. 9. Różniczkowy wskaźnik oszczędności koksu $\bar{\omega}_k$

Na rysunku 9 naniesiono przebieg różniczkowego wskaźnika oszczędności koksu $\bar{\omega}_k$ w zależności od temperatury dmuchu według różnych autorów oraz krzywą uzyskaną na podstawie równania (12). Przebieg krzywej według uogólnionego równania (12) jest bardzo zbliżony do krzywej Micharda. Kształt krzywej opisanej równaniem (12) jest podobny do kształtu krzywych Kitajewa, Zischkalego i Babarykina z tym, że według teorii podanej w [3] otrzymuje się wyższe wartości $\bar{\omega}_k$. Należy jednak zwrócić uwagę, że uogólnione równanie na $\bar{\omega}_k$ otrzymano w niniejszej pracy głównie podług wyników pomiarów pieców stosunkowo mało sprawnych. Tym też tłumaczy się wyższe położenie krzywej $\bar{\omega}_k$ według równania (12) w stosunku do większości krzywych uzyskanych przez innych autorów. Inni autorzy opierali się przeważnie na pomiarach nowoczesnych wielkich pieców o bardzo dużych pojemnościach.

Spotyka się w literaturze pogląd, że istnieje graniczna temperatura podgrzania dmuchu, powyżej której nie można oczekiwać dalszych oszczędności koksu. Wyniki uzyskane w niniejszej pracy nie potwierdzają tego poglądu.



Rys. 10. Różniczkowe wskaźniki energetyczne $\bar{\omega}_L$ i $\bar{\omega}_g$

Krzywe wskaźników $\bar{\omega}_L$ i $\bar{\omega}_g$ według uogólnionych równań przecinają się przy temperaturze dmuchu około 670 °C (rys. 8). Wynika stąd, że przy stosowanych obecnie temperaturach dmuchu wskaźnik $\bar{\omega}_g$ jest mniejszy niż $\bar{\omega}_L$. Na rysunku 10 przedstawiono krzywe $\bar{\omega}_L$ i $\bar{\omega}_g$ uzyskane według uogólnionych równań (13) i (14) oraz krzywe uzyskane na drodze pomiarów [5]. Wartości $\bar{\omega}_L$ według równania (13) są w zakresie temperatur dmuchu 800 - 1200 °C wyższe niż podług [5]. Wartości $\bar{\omega}_g$ według równania (14) są do temperatury dmuchu 1130 °C również wyższe niż podług publikacji [5].

Różniczkowy wskaźnik $\bar{\omega}_z$ zmniejszenia energii chemicznej gazu dla zewnętrznych odbiorców jest wyraźnie większy od wskaźnika $\bar{\omega}_g$ (rys. 8). Wynika to stąd, że zwiększone podgrzanie dmuchu jest związane ze zwiększonym zużyciem gazu wielkopiecowego.

Wskaźnik zmniejszenia kosztu paliw $\bar{\varepsilon}$ jest mniejszy od wskaźnika $\bar{\omega}_k$ (rys. 8). Podwyższenie bowiem temperatury dmuchu uzyskuje się kosztem zwiększonego zużycia paliwa w procesie nagrzewania dmuchu.

Różniczkowy wskaźnik $\bar{\omega}_N$ zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic bardzo szybko zmniejsza się z temperaturą dmuchu. Widać stąd, że wpływ wzrostu temperatury dmuchu jest bardzo wyraźnie kompensowany przez zmniejszenie ilości dmuchu.

Wskaźników $\bar{\omega}_z$, $\bar{\omega}_N$, i $\bar{\tau}$ nie spotyka się w literaturze. Wynika stąd brak możliwości porównania z badaniami zagranicznymi.

LITERATURA

[1] BABARYKIN N.N.: Wlijanije nagriewa dutja na raschod koksa i stiepień koswiennogo wostanowlenija okisłow żeleza w domiennoj pieczi. Stal 24 (1964) nr 9, str. 778/84.

[2] BŁASZKIEWICZ E., KOLENDA Z., TOBOŁA J.: Bilans materiałowy, energetyczny i egzergetyczny zespołu wielkiego pieca. Katedra Energetyki Cieplnej Pol. Śl., mgr pr. dypl.

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

[4] ZIĘBIK A.: Wpływ temperatury na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka nr 26. Gliwice 1967.

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

ПРИБЛИЖЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА ДУТЬЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Р е з ю м е

Используя теоретические [3] а также эмпирические [4] уравнения составлена программа расчетов на электронно-вычислительную машину. Расчеты были проведены для пяти доменных печей. На основании результатов этих вычислений выведены приближенные уравнения представляющие влияние подогрева дутья на дифференциальные энергетические показатели доменного процесса.

THE APPROXIMATE EQUATIONS DESCRIBING THE INFLUENCE OF HEATING BLAST ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF BLAST FURNACE PROCESS

S u m m a r y

Using the theoretical [3] and empirical [6] equations, the authors worked out the routine calculations of the energy characteristics on the digital computer. The calculations are performed for five blast furnaces. The results of the calculations are the basis to form the approximate equations describing the influence of heating blast on the differential energy characteristics of blast furnace process.