

ANDRZEJ ZIĘBIK
Katedra Energetyki Ciepłej

ANALIZA DOKŁADNOŚCI PRZEWIDYWANIA WSKAZNIKÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU WIELKOPIECOWEGO

Streszczenie. Przewidywane wartości wskaźników energetycznych procesu wielkopieczowego obliczane na podstawie wyników jednorazowego pomiaru [5], przy użyciu równań empirycznych ujętych w [7] i [9] są obarczone błędami. W artykule przedstawiono metodę różnicową obliczania tych błędów. Przeprowadzona analiza pozwala ocenić wpływ błędów poszczególnych wielkości mierzonych oraz błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopieczowego.

1. Wstęp

Równania teoretyczne podane w [5] oraz równania empiryczne ujęte w [7] i [9] umożliwiają obliczenie przewidywanych wskaźników energetycznych dla różnych temperatur dmuchu podług wyników jednorazowego pomiaru ciepłego wielkiego pieca [6]. Współczynniki w równaniach empirycznych, wyznaczone na podstawie materiału statystycznego, są obarczone błędami losowymi. Wielkości wyznaczone w czasie pomiaru wielkiego pieca, z uwagi na niedoskonałość metod i przyrządów oraz subiektywność odczytów, są także obciążone błędami. Analiza wpływu błędów poszczególnych wielkości mierzonych oraz błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność obliczeń wskaźników energetycznych procesu wielkopieczowego jest niezbędna dla oceny przydatności uzyskanych równań teoretycznych ujętych w [5] i pomocniczych równań empirycznych podanych w [7] i [9].

Równania ujmujące wpływ temperatury dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopieczowego dane są w postaci skomplikowanych wyrażeń algebraicznych. Analityczne więc oblicze-

nia błędów wskaźników w oparciu o prawo przenoszenia błędów są zbyt uciążliwe. W pracy proponuje się obliczenie błędu funkcji metodą różnicową.

2. Metoda różnicowa obliczania błędów przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Podstawę do obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych dla różnych temperatur podgrzania dmuchu stanowią wyniki jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca. Dla przeprowadzenia konkretnych obliczeń wykorzystuje się pomocnicze równania empiryczne opisujące funkcje: $= V_{CO}/(V_{CO} + V_{CO_2}) = f_1(t_L)$
 $= (V_{H_2} + 2 V_{CH_4})/(V_{H_2} + X_L V_L) = f_2(t_L)$, $t_g = f_3(t_L)$ i $X_L = f_4(t_L)$ [7], [9] a ponadto równania określające ciepło właściwe gazów jako liniową funkcję temperatury [6]. Współczynniki liczbowe w równaniach pomocniczych zostały znalezione głównie za pomocą metody najmniejszych kwadratów na podstawie danych pomiarowych. Przy liniowej aproksymacji ciepła właściwego gazów od temperatury wykorzystano dane tablicowe.

Wielkości występujące w równaniach teoretycznych wyrażających wskaźniki energetyczne, ustalone przez jednorazowy pomiar oraz współczynniki pomocniczych równań empirycznych oznaczymy odpowiednio przez:

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$$

gdzie:

n - liczba wielkości mierzonych i współczynników w równaniach empirycznych.

Dowolnie wybrany różniczkowy wskaźnik energetyczny można wówczas zapisać równaniem:

$$\bar{\omega} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Jeżeli średni błąd bezwzględny danej wielkości jest dostatecznie mały należy przyjąć wprost:

$$\sigma_{x_1} = \Delta x_1 \quad (5)$$

Otrzymuje się wówczas bezpośrednio wartości błędów cząstkowych $\Delta \bar{\omega}(x_1)$, gdyż:

$$\Delta \bar{\omega}(x_1) = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 \quad (6)$$

Podstawiając wartości uzyskane z równania (4) do (2) oblicza się średni błąd bezwzględny rozpatrywanego różniczkowego wskaźnika energetycznego $\bar{\omega}$. Uzyskane z obliczeń wartości błędów cząstkowych umożliwiają przeprowadzenie analizy wrażliwości poszczególnych wzorów opisujących wskaźniki energetyczne na błędy wielkości mierzonych i błędy współczynników równań empirycznych.

W sumie wykonuje się $(n + 1)$ indywidualnych obliczeń wskaźników energetycznych dla każdej rozpatrywanej temperatury dmuchu. Obliczenia przeprowadza się za pomocą maszyny cyfrowej według algorytmu zamieszczonego w [6].

3. Średnie błędy bezwzględne wielkości mierzonych

Jako przykład do konkretnych obliczeń błędów wskaźników energetycznych wzięto dane pomiarowe dla wielkiego pieca C' [6]. Przy badaniu tego pieca nie dokonywano bezpośredniego pomiaru ilości dmuchu wielkopiecowego. W związku z tym ilość V_g gazu wielkopiecowego była obliczana z bilansu pierwiastka węgla, zaś ilość V_L dmuchu obliczano z bilansu azotu. Ten sposób wyznaczania ilości gazu i dmuchu jest niekorzystny, gdyż obarcza obliczane wielkości poważnymi błędami, które wynikają z niedokładności ważenia oraz błędów analizy chemicznej materiałów wsadowych i produktów procesu wielkopiecowego.

Średnie błędy bezwzględne ważenia materiałów wsadowych i produktów stałych procesu wielkopiecowego obliczano z równania:

$$\Delta G = \sqrt{n^2 \Delta G_d^2 + n(\Delta G_p^2 + \Delta G_o^2)} \quad (7)$$

gdzie:

- ΔG - średni błąd bezwzględny ważenia,
- ΔG_d - średni błąd bezwzględny nastawienia dozownika,
- ΔG_p - średni błąd bezwzględny przyrządu,
- ΔG_o - średni błąd bezwzględny odczytu,
- n - liczba odważen (porcji).

Średnie błędy bezwzględne wyników analizy chemicznej obliczono z równania:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_m^2 + \Delta x_{oz}^2} \quad (8)$$

gdzie:

- Δx - średni błąd bezwzględny udziału substancjalnego,
- Δx_m - średni błąd bezwzględny metody (błąd poboru próby),
- Δx_{oz} - średni błąd oznaczenia (błąd przyrządu i odczytu).

Średni błąd bezwzględny pomiaru temperatury obliczono z równania:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_p^2 + \Delta x_o^2 + \Delta x_z^2} \quad (9)$$

gdzie:

- Δx_p - średni błąd bezwzględny przyrządu,
- Δx_o - średni błąd bezwzględny odczytu,
- Δx_z - średni błąd bezwzględny zabudowy termometru.

Obliczenia średnich błędów bezwzględnych wielkości mierzonych przeprowadzono na podstawie publikacji [1], [3], [4], [8]. W tabelicy 1 umieszczono wartości wielkości mierzonych oraz ich średnie błędy bezwzględne.

Średnie błędy bezwzględne wyznaczenia ilości V_g gazu wielkopieczowego i ilości V_L dmuchu obliczono w oparciu o prawo przenoszenia błędów.

Tablica 1

Wielkości mierzone i obliczeniowe oraz ich średnie błędy bezwzględne dla jednorazowego pomiaru wielkiego pieca C^w [6]

Materiał	Wielkość mierzona lub obliczeniowa	Jednostka	Wynik pomiaru lub obliczenia	Średni błąd bezwzględny
Koks suchy	Udziały gramowe:			
	węgiel c	%	87,99	± 0,34
	wodór h	%	0,92	± 0,075
	wilgość w	%	6,35	± 0,40
	Wartość opałowa \bar{W}_k	kJ/kg	30 803	± 117
Gaz wielkopiecowy	Ilość gazu suchego V_g	m_n^3/kg koksu	4,001	± 0,063
	Udziały molowe w gazie suchym:			
	CO	%	31,0	± 0,3
	CO ₂	%	9,8	± 0,3
	H ₂	%	2,1	± 0,4
	CH ₄	%	0,6	± 0,3
	N ₂	%	56,1	± 0,3
	O ₂	%	0,4	± 0,3
Stopień zawilżenia X_g	$m_n^3 H_2O/m_n^3 g.s$	0,1036	± 0,0010	
Temperatura t_g	°C	300	± 23	
Dmuch	Ilość dmuchu suchego V_L	m_n^3/kg koksu	2,842	± 0,047
	Stopień zawilżenia X_L	$m_n^3 H_2O/m_n^3 d.s.$	0,0349	± 0,0015
	Temperatura t_L	°C	770	± 23

4. Średnie błędy bezwzględne współczynników w równaniach empirycznych

Funkcja φ , która ujmuje wpływ temperatury t_L dmuchu na stosunek $V_{CO}/(V_{CO} + V_{CO_2})$ w gazie wielkopieczowym była początkowo ujęta równaniem podanym w [9]:

$$\varphi = 1 - \frac{1}{(\alpha + \beta C) e^{-\frac{\bar{B} t_L}{1000}} + C + 1} \quad (10)$$

gdzie:

$$\alpha = -5,09,$$

$$\beta = 4,56,$$

$$\bar{B} = 2,88,$$

C = stała wyznaczana na podstawie wyników jednorazowego pomiaru wielkiego pieca.

Współczynnik \bar{B} został obliczony jako średnia ważona z wykładników B_k w równaniach na funkcję φ wyznaczonych dla poszczególnych serii pomiarowych. Dla tak obliczonego współczynnika \bar{B} można wyznaczyć przedział ufności, który z przyjętym prawdopodobieństwem p_0 (poziomem ufności) określa błąd współczynnika. Przyjęto do obliczeń prawdopodobieństwo odpowiadające średniemu błędowi kwadratowemu tzn. $p_0 = 0,68$. Przedział ufności w przypadku średniej ważonej oblicza się z równania [2]:

$$\Delta \bar{B} = \sqrt{\frac{1}{l} \frac{\sum_{k=1}^4 w_k (B_k - \bar{B})^2}{\sum_{k=1}^4 w_k}} \quad (11)$$

gdzie:

$\Delta \bar{B}$ - średni błąd bezwzględny wykładnika \bar{B} ,

l - współczynnik rozkładu t Studenta,

4 - liczba stopni swobody,

w_k - waga dla k-tej serii pomiarowej.

Średni błąd bezwzględny wykładnika \bar{B} wynosi:

$$\Delta \bar{B} = \pm 0,74$$

Średnie błędy bezwzględne współczynników α i β oblicza się z równań [2]:

$$\Delta \alpha = \sqrt{q_{11} \frac{\sum_{k=1}^4 w_k (\alpha + \beta C_k - A_k)^2}{1}} \quad (12)$$

$$\Delta \beta = \sqrt{q_{22} \frac{\sum_{k=1}^4 w_k (\alpha + \beta C_k - A_k)^2}{1}} \quad (13)$$

gdzie:

- $\Delta \alpha, \Delta \beta$ - średnie błędy bezwzględne współczynników α i β ,
- q_{11}, q_{22} - elementy głównej przekątnej macierzy odwrotnej układu równań normalnych,
- A_k, C_k - współczynniki w równaniu opisującym funkcję φ dla k-tej serii pomiarowej.

Po wykonaniu obliczeń stwierdzono, że współczynniki α i β są obarczone dużymi błędami. Wynika to przede wszystkim z małej ilości wiarygodnych serii pomiarowych, którymi dysponowano. Stosunkowo duże błędy współczynników α i β powodują, że wartości funkcji φ uzyskane z równania (10) są mało dokładne. Znacznie lepsze przybliżenie uzyskuje się przyjmując uśredniony współczynnik \bar{A} . Nowe równanie empiryczne opisujące funkcję φ ma postać [7]:

$$\varphi = 1 - \frac{1}{\bar{A} e^{-\bar{B} \frac{t_L}{1000}} + C + 1} \quad (14)$$

gdzie:

- $\bar{A} = 2,51$ - średnia ważona ze współczynników A_k dla poszczególnych serii pomiarowych.

Średni błąd bezwzględny $\Delta \bar{A}$ oblicza się analogicznie jak w przypadku współczynnika \bar{B} . Ma on wartość:

$$\Delta \bar{A} = \pm 0,34$$

Stałą C wyznacza się na podstawie wyników jednorazowego pomiaru z równania:

$$C = \frac{[\text{CO}]_1}{[\text{CO}_2]_1} - \bar{A} e^{-\bar{B} \frac{t_{L1}}{1000}} \quad (15)$$

Ponieważ stałą C wprowadza się w bloku danych programu obliczeń wskaźników energetycznych [6], przeto przy każdej zmianie wielkości występujących w równaniu (15) należy każdorazowo obliczać nową stałą C .

Zależność temperatury t_g gazu od temperatury t_L dmuchu została ujęta równaniem pęku prostych [7]:

$$t_g = D(1 - \bar{b} \frac{t_L}{1000}) \quad (16)$$

gdzie:

$$\bar{b} = 0,323,$$

D - stała wyznaczana podług wyników jednorazowego pomiaru.

Współczynnik \bar{b} został wyznaczony jako średnia ważona ze współczynników b_k dla poszczególnych serii pomiarowych.

Średni błąd bezwzględny $\Delta \bar{b}$ obliczony podług równania (11) wynosi:

$$\Delta \bar{b} = \pm 0,055$$

Na podstawie danych z literatury przyjęto, że stosunek $\psi/\varphi = 0,98$ [9]. Wartości stosunku ψ/φ podawane w literaturze zmieniają się średnio w granicach 0,90-1,06. Zatem błąd jaki można popełnić przyjmując stałą wartość $\psi/\varphi = 0,98$ wynosi:

$$\Delta(\frac{\psi}{\varphi}) = \pm 0,08$$

Zawilżenie X_L dmuchu zmienia się liniowo z temperaturą t_L dmuchu [5]:

$$X_L = \xi t_L + 0,005 \frac{\text{m}^3}{\text{n}} \text{H}_2\text{O} / \frac{\text{m}^3}{\text{n}} \text{p.s.} \quad (17)$$

gdzie:

ξ - stała wyznaczona podług wyników jednorazowego pomiaru.

Współczynnik 0,005 został wyznaczony dla przeciętnych warunków atmosferycznych. Wpływ błędu tego współczynnika na wartość X_L oraz ξ a co za tym następuje i na wyniki obliczeń wskaźników energetycznych jest pomijalny w porównaniu z wpływem błędu pomiaru temperatury t_L i stopnia zawilżenia X_{L1} dmuchu.

W obliczeniach przyjęto, że średnie ciepło właściwe gazów zmienia się liniowo z temperaturą [6]. Współczynniki liczbowe w równaniach aproksymacyjnych zostały wyznaczone na podstawie tablic średniego ciepła właściwego dla gazów półdoskonałych za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Dla oceny błędów entalpii jakie popełnia się na skutek liniowej aproksymacji i niedokładności pomiaru temperatury przeprowadzono porównanie z danymi tablicowymi. Błąd względny entalpii wynikający z niedokładności pomiaru temperatury jest średnio kilkadziesiąt razy większy od błędu względnego entalpii spowodowanego liniową aproksymacją. W związku z tym postanowiono nie uwzględniać błędów współczynników w równaniach opisujących zależność średniego ciepła właściwego gazów od temperatury.

5. Obliczenia błędów przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopicowego

Analizę wpływu błędów wielkości mierzonych i błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopicowego przeprowadzono na przykładzie wielkiego pieca C" [6]. Za pomocą przedstawionej w rozdziale 2 metody różnicowej obliczono

błędy cząstkowe dla poszczególnych wskaźników energetycznych. W tablicach 2-7 umieszczono wyniki obliczeń.

Oznaczenia użyte w tablicach:

$\Delta\bar{\omega}_c$ - średni błąd bezwzględny całkowity,

$\Delta\bar{\omega}_m$ - średni błąd bezwzględny zależny od dokładności pomiarów,

$\Delta\bar{\omega}_w$ - średni błąd bezwzględny zależny od dokładności współczynników w równaniach empirycznych,

f_c, f_m, f_w, f_i - średnie błędy względne.

Na oznaczenie różniczkowego wskaźnika zmniejszenia kosztu paliw użyto symbolu ϵ .

Średni błąd bezwzględny wskaźnika $\bar{\omega}_N$ jest równy średniemu błędowi bezwzględnemu wskaźnika $\bar{\omega}_L$. Wynika to ze sposobu obliczania wskaźnika $\bar{\omega}_N$. Różniczkowy wskaźnik $\bar{\omega}_N$ zwiększenia obciążenia cieplnego nagrzewnic oblicza się bowiem z równania [5]:

$$\bar{\omega}_N \cong \frac{10\,000}{t_L} - \bar{\omega}_L \frac{\%}{\text{hdeg}} \quad (18)$$

Temperatura t_L dmuchu jest w równaniu (18) zakładana.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że średnie błędy przewidywanych wskaźników energetycznych mają wartości umiarkowane. Średnie błędy względne tych wskaźników dla rozpatrywanych temperatur podgrzania dmuchu nie przekraczają na ogół 10%. Wyjątek stanowią jedynie wskaźniki $\bar{\omega}_g$ i $\bar{\omega}_N$ dla wyższych temperatur podgrzania dmuchu. Wartości średnich błędów względnych wskaźników $\bar{\omega}_k, \bar{\omega}_L, \bar{\omega}_z$ i ϵ nie wykazują przeciętnie większych rozbieżności dla różnych temperatur podgrzania dmuchu. Średnie błędy względne wskaźnika $\bar{\omega}_N$ rosną wyraźnie z temperaturą podgrzania dmuchu. Stosunkowo najbardziej niestabilizowany charakter mają wartości średnich błędów względnych wskaźnika $\bar{\omega}_g$.

Stosunek błędu wynikającego z narzuconego poziomu ufności dla współczynników w równaniach empirycznych do błędu wynikającego z niedokładności pomiarów kształtuje się średnio w granicach 2÷4.

Tablica 2

Błędy różniczkowego wskaźnika $\bar{\omega}_k$ oszczędności koksu

t_L	$\bar{\omega}_k$	$\Delta\bar{\omega}_{k c}$	$\Delta\bar{\omega}_{k m}$	$\Delta\bar{\omega}_{k w}$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	5,14	$\pm 0,29$	$\pm 0,17$	$\pm 0,23$	$\pm 5,6$	$\pm 3,3$	$\pm 4,5$
600	4,12	$\pm 0,31$	$\pm 0,12$	$\pm 0,29$	$\pm 7,6$	$\pm 2,9$	$\pm 7,0$
800	3,39	$\pm 0,27$	$\pm 0,11$	$\pm 0,25$	$\pm 8,0$	$\pm 3,2$	$\pm 7,3$
1000	2,90	$\pm 0,23$	$\pm 0,08$	$\pm 0,22$	$\pm 8,0$	$\pm 2,7$	$\pm 7,5$
1200	2,55	$\pm 0,17$	$\pm 0,07$	$\pm 0,16$	$\pm 6,7$	$\pm 2,7$	$\pm 6,2$

Tablica 3

Błędy różniczkowego wskaźnika $\bar{\omega}_L$ oszczędności dmuchu

t_L	$\bar{\omega}_L$	$\Delta\bar{\omega}_{L c}$	$\Delta\bar{\omega}_{L m}$	$\Delta\bar{\omega}_{L w}$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	6,77	$\pm 0,42$	$\pm 0,23$	$\pm 0,35$	$\pm 6,2$	$\pm 3,4$	$\pm 5,2$
600	5,93	$\pm 0,34$	$\pm 0,17$	$\pm 0,30$	$\pm 5,8$	$\pm 2,9$	$\pm 5,0$
800	5,35	$\pm 0,38$	$\pm 0,16$	$\pm 0,34$	$\pm 7,1$	$\pm 3,0$	$\pm 6,4$
1000	4,95	$\pm 0,35$	$\pm 0,14$	$\pm 0,32$	$\pm 7,1$	$\pm 2,8$	$\pm 6,5$
1200	4,66	$\pm 0,41$	$\pm 0,12$	$\pm 0,39$	$\pm 8,8$	$\pm 2,6$	$\pm 8,4$

Tablica 4

Błędy różniczkowego wskaźnika ω_g zmniejszenia energii chemicznej gazu wielkopiecowego

t_L	ω_g	$\Delta\omega_g c$	$\Delta\omega_g m$	$\Delta\omega_g w$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	5,99	$\pm 0,46$	$\pm 0,20$	$\pm 0,41$	$\pm 7,7$	$\pm 3,3$	$\pm 6,9$
600	4,57	$\pm 0,39$	$\pm 0,16$	$\pm 0,36$	$\pm 8,6$	$\pm 3,5$	$\pm 7,9$
800	3,56	$\pm 0,50$	$\pm 0,12$	$\pm 0,49$	$\pm 14,2$	$\pm 3,4$	$\pm 13,8$
1000	2,88	$\pm 0,34$	$\pm 0,10$	$\pm 0,32$	$\pm 11,7$	$\pm 3,5$	$\pm 11,2$
1200	2,43	$\pm 0,31$	$\pm 0,07$	$\pm 0,30$	$\pm 12,8$	$\pm 3,0$	$\pm 12,4$

Tablica 5

Błędy różniczkowego wskaźnika ω_z zmniejszenia energii chemicznej gazu oddawanego zewnętrznym odbiorcom

t_L	ω_z	$\Delta\omega_z c$	$\Delta\omega_z m$	$\Delta\omega_z w$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	9,38	$\pm 0,52$	$\pm 0,26$	$\pm 0,45$	$\pm 5,5$	$\pm 2,8$	$\pm 4,8$
600	8,15	$\pm 0,44$	$\pm 0,24$	$\pm 0,37$	$\pm 5,4$	$\pm 2,9$	$\pm 4,5$
800	7,26	$\pm 0,59$	$\pm 0,21$	$\pm 0,55$	$\pm 8,1$	$\pm 2,9$	$\pm 7,6$
1000	6,68	$\pm 0,45$	$\pm 0,22$	$\pm 0,39$	$\pm 6,7$	$\pm 3,3$	$\pm 5,8$
1200	6,31	$\pm 0,50$	$\pm 0,25$	$\pm 0,43$	$\pm 7,9$	$\pm 4,0$	$\pm 6,8$

Tablica 6

Błędy różniczkowego wskaźnika $\bar{\omega}_N$ zwiększenia
obciążenia cieplnego nagrzewnic

t_L	$\bar{\omega}_N$	$\Delta\bar{\omega}_N c$	$\Delta\bar{\omega}_N m$	$\Delta\bar{\omega}_N w$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	18,23	$\pm 0,42$	$\pm 0,23$	$\pm 0,35$	$\pm 2,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,9$
600	10,73	$\pm 0,34$	$\pm 0,17$	$\pm 0,30$	$\pm 3,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,8$
800	7,15	$\pm 0,38$	$\pm 0,16$	$\pm 0,34$	$\pm 5,3$	$\pm 2,2$	$\pm 4,8$
1000	5,05	$\pm 0,35$	$\pm 0,14$	$\pm 0,32$	$\pm 6,9$	$\pm 2,8$	$\pm 6,3$
1200	3,68	$\pm 0,41$	$\pm 0,12$	$\pm 0,39$	$\pm 11,1$	$\pm 3,3$	$\pm 10,6$

Tablica 7

Błędy różniczkowego wskaźnika $\bar{\varepsilon}$ zmniejszenia kosztu paliw .

t_L	$\bar{\varepsilon}$	$\Delta\bar{\varepsilon}_c$	$\Delta\bar{\varepsilon}_m$	$\Delta\bar{\varepsilon}_w$	f_c	f_m	f_w
$^{\circ}C$	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%/hdeg	%	%	%
400	4,26	$\pm 0,26$	$\pm 0,16$	$\pm 0,21$	$\pm 6,1$	$\pm 3,7$	$\pm 4,9$
600	3,40	$\pm 0,30$	$\pm 0,12$	$\pm 0,27$	$\pm 8,7$	$\pm 3,5$	$\pm 8,0$
800	2,80	$\pm 0,24$	$\pm 0,11$	$\pm 0,21$	$\pm 8,5$	$\pm 3,9$	$\pm 7,5$
1000	2,40	$\pm 0,23$	$\pm 0,09$	$\pm 0,21$	$\pm 9,6$	$\pm 3,8$	$\pm 8,8$
1200	2,12	$\pm 0,17$	$\pm 0,06$	$\pm 0,16$	$\pm 8,0$	$\pm 2,8$	$\pm 7,5$

6. Wpływ błędów wielkości mierzonych i błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Metoda różnicowa, poprzez obliczenie błędów cząstkowych, pozwala również ocenić wpływ błędów poszczególnych wielkości mierzonych i błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność obliczeń przewidywanych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego. W tabelicy 8 umieszczono wyniki analizy błędów dla najczęściej spotykanej w warunkach krajowych temperatury podgrzania dmuchu.

Z przeprowadzonej analizy wypływa generalny wniosek, że zasadniczy wpływ na dokładność obliczeń wskaźników energetycznych mają błędy współczynników w równaniach empirycznych opisujących funkcje: $\varphi = f_1(t_L)$ i $t_g = f_3(t_L)$. Z uwagi na to zmieniono pierwotne ujęcie funkcji φ [7]. Wpływ temperatury t_L dmuchu na temperaturę t_g gazu wielkopiecowego ustalono poprzednio na podstawie dwu serii pomiarowych [9]. Obecnie dla zwiększenia dokładności wykorzystano dodatkowe cztery serie pomiarowe [7]. Błąd przyjętego stałego stosunku ψ/φ tylko w przypadku $\bar{\omega}_Z$ ma duży wpływ na dokładność obliczeń. Na dokładność obliczeń pozostałych wskaźników wpływ błędu stałego stosunku ψ/φ jest mały. Stosunek błędów f_w/f_m waha się zasadniczo w granicach 2+4.

Spośród wielkości mierzonych duży wpływ na dokładność obliczeń wskaźników $\bar{\omega}_g$, $\bar{\omega}_L$, $\bar{\omega}_N$ i $\bar{\epsilon}$ ma błąd pomiaru temperatury t_g gazu. Na wskaźniki $\bar{\omega}_g$ i $\bar{\omega}_Z$ wpływ niedokładności pomiaru t_g ma mały wpływ. W przypadku obliczeń $\bar{\omega}_Z$ duży wpływ na dokładność obliczeń ma błąd wyznaczenia ilości V_L dmuchu. Nieznaczny wpływ na dokładność obliczeń wszystkich wskaźników energetycznych mają niedokładności pomiarów w , X_g , O_2 , N_2 . Wpływ błędów pomiarów pozostałych wielkości jest dla różnych wskaźników energetycznych mały lub nieznaczny. W tabelicy 8 uszeregowano poszczególne współczynniki pomocniczych równań empirycznych i wielkości mierzone podług malejącego wpływu na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego.

Tablica 8

Wpływ błędów wielkości mierzonych i błędów współczynników w równaniach empirycznych na dokładność przewidywania wskaźników energetycznych procesu wielkopięcowego dla $t_L = 800^\circ\text{C}$

Wskaźnik energetyczny	Wartość wskaźnika $\frac{g}{ndeg}$	f_c		$\frac{f_w}{f_m}$	Wpływ na błędy wskaźników		
		%			Duży $\frac{f_1}{f_c} \geq 0,2$	Mały $0,05 < \frac{f_1}{f_c} < 0,2$	Nieznaczny $\frac{f_1}{f_c} \leq 0,05$
ω_k	3,39	$\pm 8,0$		2,3	$B, \bar{b}, \bar{A}, t, g$	$V_L, t_L, W_k, CH_4, H_2, CO_2, V, v/\%, h$	$X_L, c, CO, N_2, O_2, X_g, w$
ω_l	5,35	$\pm 7,1$		2,1	$\bar{b}, \bar{B}, t, g, \bar{A}$	$CH_4, H_2, W_k, c, h, CO_2, v/\%$	$X_L, t_L, V_g, O_2, CO, V_L, N_2, X_g, w$
ω_g	3,56	$\pm 14,2$		4,1	$\bar{B}, \bar{b}, \bar{A}$	$t, g, v/\%, t_L, V_L, V_g, X_L, CO_2$	$W_k, h, c, CO, H_2, O_2, N_2, X_g, CH_4, w$
ω_n	7,26	$\pm 8,1$		2,6	$\bar{B}, \bar{b}, \bar{A}, V_L, v/\%$	$V_g, t, g, CO, t_L, X_L, CO_2, H_2$	$CH_4, W_k, c, h, N_2, O_2, X_g, w$
ω_N	7,15	$\pm 5,3$		2,2	$\bar{b}, \bar{B}, t, g, \bar{A}$	$CH_4, H_2, W_k, c, h, CO_2, v/\%$	$X_L, t_L, V_g, O_2, CO, V_L, N_2, X_g, w$
δ	2,60	$\pm 8,5$		1,9	$B, \bar{b}, t, g, \bar{A}$	$CH_4, V_L, t_L, V_g, W_k, H_2, h, CO_2, CO$	$c, O_2, X_L, N_2, v/\%, X_g, w$

Przeprowadzona analiza błędów pozwoliła stwierdzić całkowitą przydatność do celów praktycznych teorii wpływu podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopieczowego podanej w [5]. Metoda ta oparta o dwa podstawowe prawa fizyki: prawo zachowania ilości substancji i prawo zachowania energii jest mało wrażliwa na błędy jednorazowego pomiaru cieplnego wielkiego pieca. Średnie błędy względne wskaźników mają przeciętnie wartość $\sim 8\%$. Zasadniczy jednak udział mają tutaj błędy współczynników w równaniach empirycznych. Przy przyjętym poziomie ufności (prawdopodobieństwo $p_0 = 0,68$) dokładność funkcji empirycznych można zwiększyć jedynie przez wykorzystanie dodatkowych wiarygodnych serii pomiarowych.

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

LITERATURA

- [1] KOTLEWSKI F.: Podstawowe pomiary w technice cieplnej. WNT, Warszawa 1962.
- [2] LINNIK J.W.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania doświadczeń. PWN, Warszawa 1962.
- [3] POLSKIE NORMY:
 - [3.1] PN-64/C-04300. Koks i półkoks z węgla kamiennego i brunatnego. Oznaczanie zawartości wilgoci.
 - [3.2] PN-59/C-04339. Paliwa stałe. Oznaczanie węgla i wodoru metodą Sheffield.
 - [3.3] PN-63/M-34128. Kotły parowe. Wymaganie i badanie odbiorcze.
 - [3.4] PN-54/H-04120. Analiza chemiczna rud. Oznaczanie węgla.
 - [3.5] PN-57/H-04130. Analiza chemiczna topników. Kamień wapienny i dolomit.
 - [3.6] PN-66/H-04011. Analiza chemiczna surówki, żeliwa i stali.
 - [3.7] PN-54/H-04100. Analiza chemiczna rud żelaznych. Oznaczanie wilgotności.

- [4] ROGA B., WNEKOWSKA L.: Analiza węgla i koksu. WNT, Warszawa 1966.
- [5] SZARGUT J.: Wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 26. Gliwice 1967.
- [6] SZARGUT J., ZIĘBIK A.: Przybliżone równania ujmujące wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 26. Gliwice 1967.
- [7] SZARGUT J., ZIĘBIK A.: Równania praktyczne ujmujące wpływ podgrzania dmuchu na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 29. Gliwice 1968.
- [8] WOJCIECHOWSKI J.: Pomiary w elektrowniach ciepłych. PWT, Warszawa 1958.
- [9] ZIĘBIK A.: Wpływ temperatury dmuchu na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 26. Gliwice 1967.

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРЕДСКАЗЫВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Р е з ю м е

Расчётные значения энергетических показателей доменного процесса, предсказанные на основе результатов единичного теплового измерения доменного процесса [5], при использовании эмпирических уравнений [7], [9], подвержены влиянию ошибок измерений и ошибок вспомогательных эмпирических уравнений. В статье представлен разностный метод вычисления парциальных ошибок, который даёт возможность оценить влияние ошибок отдельных измеряемых величин и ошибок численных коэффициентов эмпирических уравнений. Проведенный анализ показывает преимущественное влияние ошибок численных коэффициентов эмпирических уравнений.

THE ANALYSIS OF FORESIGHT ACCURACY
OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF BLAST FURNACE PROCESS

S u m m a r y

The foreseen values of the energy characteristics of blast furnace process calculated on the base of the single measurement results and by means of the theoretical [5] and empirical [7], [9] equations, are error - laden. In the article, the differential method of calculations of these errors is represented. By means of this analysis, the influence of the errors of individual measurement results and the errors of coefficients in the empirical equations, on the accuracy of calculations of the foreseen energy characteristics of blast furnace process, can be estimated.