

Henryk RUSINOWSKI

WPŁYW PARAMETRÓW PRACY NAGRZEWNIC WIELKOPIECOWYCH NA WSKAŹNIKI ZUŻYCIA ENERGII CHEMICZNEJ PALIW

Streszczenie. W prezentowanej pracy przedstawiono metodę i wyniki analizy wpływu czasu nagrzewania oraz temperatury podgrzania dmuchu w zespole nagrzewnic wielkopicowych na jednostkowe zużycie energii chemicznej paliw. Dla symulacji pracy nagrzewnic wykorzystano analityczno-numeryczny model matematyczny nagrzewnicy Cowpera. Uwzględniono istniejące ograniczenia materiałowe. Przedstawiono wpływ analizowanych parametrów na zużycie energii chemicznej w nagrzewnicach odniesione do:

- jednostkowej ilości nagrzewanego dmuchu,
- jednostki produkcji surówki w wielkim piecu.

Obliczenia przeprowadzono dla zespołu nagrzewnic wielkiego pieca o pojemności 3200 m³.

THE INFLUENCE OF THE WORK PARAMETERS OF COWPER STOVES UPON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE CONSUMPTION OF THE CHEMICAL ENERGY OF FUEL

Summary. The paper deals with a method and the results of analysing the influence of the warm-up time and temperature of the blast in blast-furnaces upon the consumption of the chemical energy of fuels. In order to simulate the work of Cowper stoves a mathematical analytic-numerical model of a Cowper stove has been used. The existing material restrictions have been taken into account. The influence of the analyzed parameters upon the consumption of chemical energy in Cowper stoves has been presented, referred to:

- a unit of blast,
- a unit of pig-iron produce in the blast-furnace.

These calculations have been carried out on a blast-furnace with a capacity of 3200 cbm.

DER EINFLUß DER ARBEITSPARAMETER VON WINDERHITZERN AUF DIE VERBRAUCHSKENNZAHLE DER CHEMISCHEN ENERGIE VON BRENNSTOFFEN

Zusammenfassung. Der vorliegende Aufsatz befaßt sich mit einer Methode und den Ergebnissen der Analyse des Einflusses der Windzeit und Temperatur des Gebläses von Winderhitzern auf den Verbrauch der chemischen Energie von Brennstoffen. Die bestehenden Materialbeschränkungen sind berücksichtigt worden. Um die Arbeit eines Winderhitzers zu simulieren, wurde ein mathematisches analytisch-digital Winderhitzermodell verwendet. Es wurde der Einfluß der analysierten Parameter auf den Verbrauch chemischer Energie in Winderhitzern dargestellt, und zwar bezogen auf:

- die Windmenge,
- die Roheisenproduktion im Hochofen.

Die Berechnungen beziehen sich auf Winderhitzer eines Hochofens mit einem Volumen von 3200 m³.

1. WPROWADZENIE

Zadaniem zespołu nagrzewnic wielkopiecowych jest podgrzanie wymaganej przez wielki piec ilości dmuchu do wymaganej temperatury. Dzięki sterowaniu komputerowemu nagrzewnice nowoczesnych wielkich pieców pracują przy optymalnych parametrach pracy i osiągają znacznie wyższe sprawności energetyczne od nagrzewnic sterowanych bezpośrednio przez obsługę. Do podstawowych zadań systemu komputerowego należy regulacja akumulacji energii w wypełnieniu nagrzewnic oraz automatyczne przestawianie. Czasy trwania opalania nagrzewnic i nagrzewania dmuchu są wynikiem optymalizacji parametrów pracy nagrzewnic. Sterowanie strumieniem paliw zasilających palniki nagrzewnic służy osiągnięciu wymaganego poziomu akumulacji energii w nagrzewnicach po zakończeniu fazy opalania. Ponadto system komputerowy zabezpiecza przed przekroczeniem dopuszczalnych temperatur wynikających z zastosowanych materiałów ogniotrwałych oraz materiału rusztu podtrzymującego kratownicę.

W prezentowanej pracy przedstawiono analizę wpływu temperatury podgrzania dmuchu w nagrzewnicach przy zróżnicowanych czasach przestawiania nagrzewnic na wskaźniki zużycia energii chemicznej paliw. Przyjęto, że nagrzewnice są opalane gazem wielkopiecowym i koksowniczym. Stopień wzbogacenia gazu wielkopiecowego nie był przedmiotem analizy. Wielkość tę wyznaczano przyjmując, że różnica pomiędzy temperaturą spalania w szybie nagrzewnicy i temperaturą dmuchu po stabilizacji powinna wynosić 250 K. Strumień dmuchu dopływającego do zespołu nagrzewnic obliczano na podstawie wydajności wielkiego pieca oraz jednostkowego wskaźnika zużycia dmu-

chu w wielkim piecu [7]. Uwzględniono ograniczenia w pracy nagrzewnic wynikające z:

- maksymalnej dopuszczalnej temperatury kopuły,
- maksymalnej dopuszczalnej temperatury spalin odpływających z nagrzewnicy,
- minimalnej dopuszczalnej temperatury styku warstw krzemionkowych i szamotowych wypełnienia kratownicy.

Obliczenia przeprowadzono dla zespołu trzech nagrzewnic wielkiego pieca o objętości 3200 m^3 , działających w szeregowym systemie eksploatacji.

2. CYFROWA SYMULACJA PRACY NAGRZEWNIC

W celu określenia wpływu parametrów pracy na przebiegi czasowe temperatury czynników gazowych i wypełnienia w nagrzewnicy należy dysponować symulacyjnym modelem matematycznym. Problemom obliczeń cieplnych nagrzewnic wielkopiecowych poświęcono dotychczas wiele prac, przy czym zadowalającą dokładność obliczeń dawały modele numeryczne [6] lub analityczno-numeryczne [1, 3, 5]. Wykorzystany w niniejszej pracy model matematyczny nagrzewnicy zaliczany jest do modeli analityczno-numerycznych. Przeprowadza się w nim podział różnicowy zastępczego wypełnienia płytowego nagrzewnicy na strefy i warstwy przy zachowaniu ciągłości funkcji czasu.

Założenia modelu:

1. Nagrzewnicę dzieli się na σ stref, przy czym strefa $k = 1$ jest strefą najwyższych temperatur.
2. Rzeczywiste wypełnienie nagrzewnicy zastępuje się równoważnym wypełnieniem płytowym.
3. Zastępcze wypełnienie płytowe w strefie nagrzewnicy dzieli się na y warstw. Warstwa $j = y$ jest położona przy powierzchni płyty.
4. Cykl pracy nagrzewnicy (faza nagrzewania i ochładzania wypełnienia) dzieli się na l_0 przedziałów czasu, w których strumienie czynników grzejącego i podgrzewanego mają stałą wartość $l = 1, 2, \dots, l_0$.
5. Temperatura dmuchu ma przy dopływie do wypełnienia nagrzewnicy stałą wartość T_A .
6. Własności termiczne płynów i wypełnienia w nagrzewnicy są w obrębie danej strefy i przedziału czasu stałe.
7. Temperatura czynnika gazowego jest wyrównana w przekroju prostopadłym do jego przepływu.
8. Pomija się przewodzenie ciepła w wypełnieniu w kierunku równoległym do przepływu gazów.

Model służy do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych, tj. do obliczeń temperatury gazów odpływających z nagrzewnicy przy znanych strumieniach

i parametrach czynników gazowych zasilających nagrzewnicę i znanych parametrach materiałowo-konstrukcyjnych nagrzewnicy.

Zagadnienie wyjściowe opisane jest w strefie k i przedziale czasu l równaniami:

- bilansu energii przestrzeni gazowych

$$- \dot{n}^l (Mc_p)_k^l \frac{\partial T_k^l(z, \tau)}{\partial z} = \alpha_k^l \frac{F_k}{H_k} \left[T_k^l(z, \tau) - \vartheta_k^l(d_k, \tau) \right] \quad (1)$$

- Fouriera-Kirchhoffa dla zastępczego wypełnienia płytowego

$$c_k^l \rho_k \frac{\partial \vartheta_k^l(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_k^l \frac{\partial \vartheta_k^l(x, \tau)}{\partial x} \right] \quad (2)$$

gdzie:

T_k^l – temperatura gazu,

ϑ_k^l – temperatura wypełnienia,

\dot{n}^l – strumień gazu,

$(Mc_p)_k^l$ – pojemność cieplna gazu,

c_k^l – pojemność cieplna materiału wypełnienia,

α_k^l – współczynnik wnikania ciepła,

λ_k^l – współczynnik przewodzenia ciepła,

ρ_k – gęstość materiału wypełnienia,

H_k, F_k – wysokość i powierzchnia strefy,

d_k – połowa grubości zastępczego wypełnienia płytowego,

x, z – współrzędna prostopadła i równoległa do kierunku przepływu gazów,

τ – czas.

Równania (1) i (2) uzupełnione są warunkami początkowymi:

- dla temperatury czynnika gazowego

$$T_k^l(0, \tau) = T_{dk}^l(\tau) \quad (3)$$

- dla temperatury wypełnienia

$$\vartheta_k^l(x, 0) = \vartheta_{0k}^l(x) \quad (4)$$

oraz warunkami brzegowymi:

- drugiego rodzaju w płaszczyźnie symetrii zastępczego wypełnienia płytowego

$$\left. \frac{\partial \vartheta_k^l(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (5)$$

– trzeciego rodzaju na powierzchni zewnętrznej zastępczego wypełnienia płytowego

$$-\lambda_k^l \left. \frac{\partial \vartheta_k^l(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=d_k} = \alpha_k^l [\vartheta_k^l(d_k, \tau) - T_{mk}^l(\tau)], \quad (6)$$

gdzie:

$$T_{mk}^l(\tau) = \frac{1}{H_k} \int_0^{H_k} T_k^l(z, \tau) dz. \quad (7)$$

Do rozwiązania zadania nieustalonego przewodzenia ciepła w ekwiwalentnym wypełnieniu płytowym zastosowano metodę dyskretnej transformacji spektralnej (DTS) [2, 4]. Zastępcze wypełnienie płytowe w strefie podzielono na warstw, a następnie wykorzystując metodę bilansów elementarnych równanie (2) przekształcono do postaci ciągło-dyskretnej uzyskując układ równań różniczkowych zwyczajnych, który w zapisie macierzowym ma postać:

$$\frac{d\vartheta_k^\lambda(\tau)}{d\tau} = \mathbf{A}_k^l \vartheta_k^\lambda(\tau) + b_k^l \mathbf{T}_{dk}^l(\tau) \mathbf{N} \quad (8)$$

gdzie \mathbf{A}_k^l jest macierzą współczynników układu równań, a b_k^l współczynnikiem; współczynniki wynikają z przekształcenia. W metodzie DTS przeprowadza się transformację układu równań różniczkowych w układ niezależnych równań różniczkowych wykorzystując diagonalizację macierzy \mathbf{A} . Po rozwiązaniu i retransformacji uzyskuje się równania opisujące przebiegi czasowe temperatury elementów różnicowych wypełnienia w strefie i temperatury gazu odpływającego ze strefy nagrzewnicy:

$$\vartheta_k^\lambda(\tau) = \mathbf{H}_k^l(\tau) \vartheta_{0k}^\lambda + b_k^l [\mathbf{H}_k^l(\tau)] \cdot [\mathbf{T}_{dk}^l(\tau)] \mathbf{N}, \quad (9)$$

$$\mathbf{T}_{wk}^l(\tau) \mathbf{N} = d_k^l \mathbf{I} \mathbf{H}_k^l \vartheta_{0k}^\lambda + [(1 - d_k^l) + b_k^l d_k^l \mathbf{H}_{k\gamma\gamma}^l(\tau)] \cdot [\mathbf{T}_{wk-1}^l(\tau)] \mathbf{N} \quad (10)$$

gdzie:

$$\mathbf{H}_k^1 = \begin{bmatrix} H_{k11}^1(\tau) & H_{k12}^1(\tau) & \dots & H_{k1\gamma-1}^1(\tau) & H_{k1\gamma}^1(\tau) \\ H_{k21}^1(\tau) & H_{k22}^1(\tau) & \dots & H_{k2\gamma-1}^1(\tau) & H_{k2\gamma}^1(\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{k\gamma 1}^1(\tau) & H_{k\gamma 2}^1(\tau) & \dots & H_{k\gamma\gamma-1}^1(\tau) & H_{k\gamma\gamma}^1(\tau) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\vartheta_{0k}^\lambda = \begin{bmatrix} \vartheta_{0k1}^1 \\ \vartheta_{0k2}^1 \\ \dots \\ \dots \\ \vartheta_{0k\gamma}^1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_{kmp}^1(\tau) = \sum_{s=1}^{\gamma} g_{kms}^1 \tilde{g}_{ksp}^1 \exp(\lambda_{ks}^1 \tau)$$

gdzie:

$g_{kms}^1, \tilde{g}_{ksp}^1$ – elementy macierzy transformacji \mathbf{G}_k^1 utworzonej przez wektory własne macierzy \mathbf{A} i elementy macierzy odwrotnej do macierzy transformacji $(\mathbf{G}_k^1)^{-1}$,

λ_{ks}^1 – wartości własne macierzy \mathbf{A} .

Wykorzystując warunek ciągłości funkcji temperatury gazu w nagrzewnicy uzyskuje się na podstawie (9) i (10) dla fazy opalania nagrzewnicy:

$$\mathbf{T}_{wk}^1(\tau) = \sum_{i=1}^{\sigma} \sum_{p=1}^{\gamma} \mathbf{U}_{ki\gamma p}^1(\tau) \vartheta_{0ip}^1 + [\varphi_k^1(\tau)] \cdot [\mathbf{T}_{Sd}^1(\tau)] \quad (11)$$

$$\vartheta_k^l(\tau) = \sum_{i=1}^{\sigma} \mathbf{W}_{ki}^l(\tau) \vartheta_{0i}^l + [\Psi_k^l(\tau)] \cdot [T_{Sd}^l(\tau)] \quad (12)$$

gdzie:

$$U_{ki\gamma p}^l(\tau) = \sum_{r=i}^k \sum_{s=1}^{\gamma} A_{ki\gamma prs} \exp(\lambda_{rs}^l \tau)$$

$$W_{kimpr}^l(\tau) = \sum_{r=i}^k \sum_{s=1}^{\gamma} C_{kimpr} \exp(\lambda_{rs}^l \tau)$$

$$\Phi_k^l(\tau) = B_{k0}^l + \sum_{r=i}^k \sum_{s=1}^{\gamma} B_{kr} \exp(\lambda_{rs}^l \tau)$$

$$\Psi_{km}^l(\tau) = \sum_{r=i}^k \sum_{s=1}^{\gamma} D_{kmrs} \exp(\lambda_{rs}^l \tau)$$

W analogiczny sposób dla fazy nagrzewania dmuchu otrzymuje się:

$$T_{wk}^l(\tau) = \sum_{i=1}^{\sigma} \sum_{p=1}^{\gamma} \hat{U}_{ki\gamma p}^l(\tau) \vartheta_{0ip}^l + T_A \hat{\Phi}_k^l(\tau) \quad (13)$$

$$\vartheta_k^l(\tau) = \sum_{i=1}^{\sigma} \hat{W}_{ki}^l(\tau) \vartheta_{0i}^l + T_A \hat{\Psi}_k^l(\tau) \quad (14)$$

Z zależności (11), dla $k = \sigma$, wyznacza się średnią i maksymalną temperaturę spalin odpływających z nagrzewnicy. Zależności (12) i (14) pozwalają wyznaczyć maksymalną temperaturę kopuły oraz minimalną temperaturę styku warstw krzemionkowych i szamotowych. Zależność (13) dla $k = 1$ opisuje przebieg czasowy temperatury dmuchu odpływającego z nagrzewnicy.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując opisany w pkt. 2 model matematyczny przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla zespołu trzech nagrzewnic wielkiego pieca o objętości 3200 m^3 pracujących w systemie szeregowym. Nagrzewnice o wysokości 52 m i średnicy 11,5 m posiadają wewnętrzny szyb spalania o profilu kołowym. Kratownica o powierzchni ogrzewalnej $70 \text{ } 800 \text{ m}^2$ zbudowana jest

z dwunastokanałowych kształtek, przy czym górne obszary wykonane są z materiału krzemionkowego, reszta zaś z szamotu.

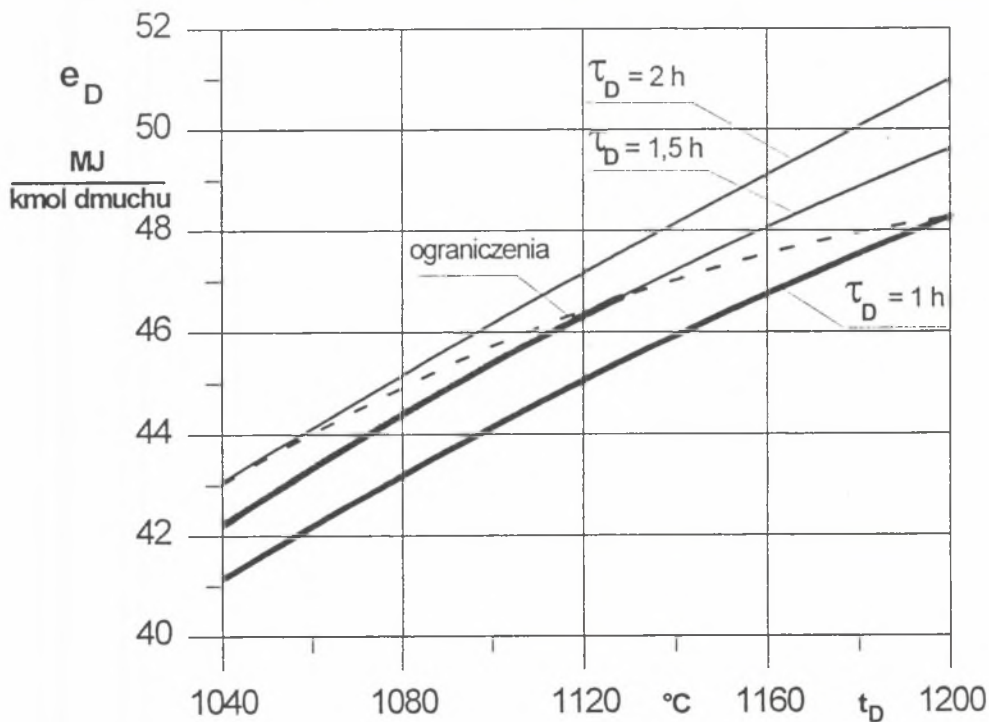
Dla rozpatrywanych nagrzewnic obowiązują następujące ograniczenia materiałowe:

- dopuszczalna maksymalna temperatura kopuły nagrzewnicy – 1400°C,
- dopuszczalna maksymalna temperatura spalin odpływających z nagrzewnicy – 350°C,
- dopuszczalna minimalna temperatura na styku materiału krzemionkowego i szamotowego kratownicy – 650°C.

Przeprowadzono wielowariantowe obliczenia symulacyjne wychodząc z aktualnych parametrów eksploatacyjnych nagrzewnic:

- temperatura podgrzania dmuchu w zespole nagrzewnic – 1040°C,
- czas trwania fazy nagrzewania dmuchu – 2 h.

Wyniki obliczeń wpływu temperatury podgrzania dmuchu i czasu przestawiania nagrzewnic na wskaźnik zużycia energii chemicznej paliw w nagrzewnicach przedstawiono na rys. 1. Naniesiono linię ograniczającą działanie nagrzewnicy ze względu na ograniczenia materiałowe. Przy czasie trwania



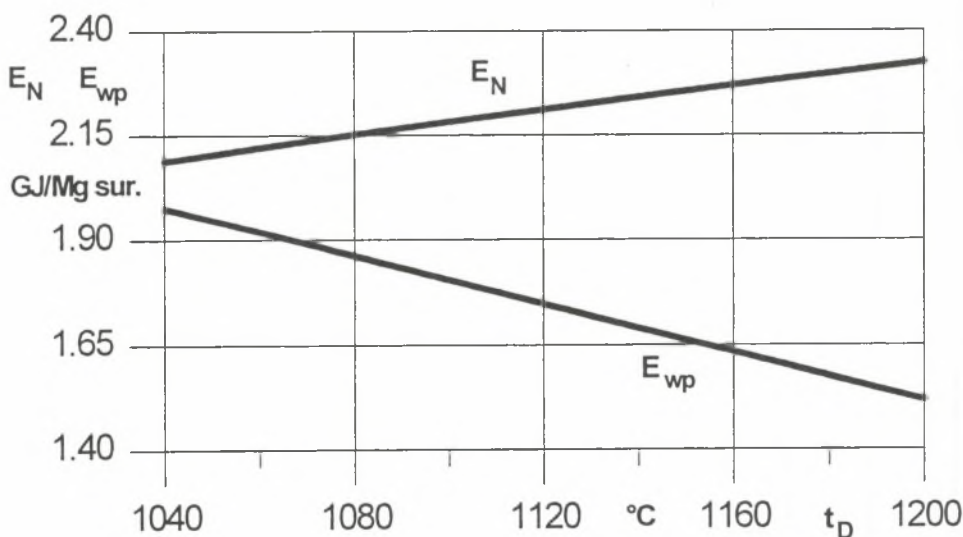
Rys. 1. Wskaźnik zużycia energii chemicznej paliw w nagrzewnicach w odniesieniu do jednostki dmuchu

Fig. 1. Specific consumption of the chemical energy of fuel gases per unit of blast

fazy nagrzewania dmuchu $\tau_D = 2$ h podgrzanie dmuchu do temperatury wyższej od 1040°C wiąże się z przekroczeniem maksymalnej dopuszczalnej temperatury spalin odpływających z nagrzewnicy przy rozpatrywanym stopniu wzbogacenia gazu wielkopiecowego. Obniżenie czasu nagrzewania dmuchu do $\tau_D = 1,5$ h umożliwi podgrzanie dmuchu do 1120°C , a przy $\tau_D = 1$ h możliwe jest podgrzanie dmuchu do 1200°C . Istniejąca armatura przestawiania nagrzewnic nie pozwala na dalsze zwiększanie częstości rewersji (obniżanie czasów trwania faz pracy). Przy symulacji pracy nagrzewnic dla osiągnięcia temperatury podgrzania dmuchu powyżej 1200°C zaobserwowano przekroczenie dopuszczalnej maksymalnej temperatury kopuły.

Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wskazują, że w badanym obszarze pracy obniżanie czasów trwania faz (zwiększanie częstości rewersji) przyczynia się do obniżania jednostkowego zużycia energii chemicznej paliw. Najniższe jednostkowe zużycie występuje na granicy dopuszczalnych wartości parametrów eksploatacyjnych istniejących nagrzewnic.

Na rys. 2 przedstawiono przebieg zmian zużycia energii chemicznej gazu mieszkankowego E_N (gaz wielkopiecowy i koksowniczy) oraz gazu wielkopiecowego E_{wp} w nagrzewnicach w odniesieniu do jednostki produkcji surówki w wielkim piecu przy pracy nagrzewnic z czasem nagrzewania dmuchu $\tau_D = 1$ h. Wraz ze wzrostem temperatury podgrzania dmuchu w zespole nagrzewnic maleje jednostkowe zużycie gazu wielkopiecowego, a rośnie zużycie gazu



Rys. 2. Wskaźnik zużycia energii chemicznej gazu mieszkankowego (gaz wielkopiecowy i koksowniczy) E_N oraz wskaźnik zużycia gazu wielkopiecowego E_{wp} w nagrzewnicach

Fig. 2. Specific consumption of fuel gases (top-gas and coke-oven gas) E_N and specific consumption of top-gas E_{wp} in Cowper stoves

bogatego. Wynika to z konieczności podwyższenia temperatury spalania w szybie nagrzewnicy.

4. PODSUMOWANIE

Podwyższenie temperatury podgrzania dmuchu w nagrzewnicach jest najbardziej efektywną metodą zmniejszania zużycia koksu w wielkim piecu. W prezentowanej pracy przedstawiono wpływ czasu nagrzewania oraz temperatury podgrzania dmuchu w zespole nagrzewnic na zużycie energii chemicznej paliw odniesione do jednostki nagrzewanego dmuchu oraz jednostki produkcji surówki w wielkim piecu. Podwyższanie temperatury podgrzania dmuchu powinno się łączyć z obniżaniem czasu nagrzewania dmuchu. W badanym obszarze pracy nagrzewnic najniższe jednostkowe zużycie energii w nagrzewnicach osiąga się przy obniżaniu czasu nagrzewania dmuchu do granicznej wartości dopuszczalnej. Istniejące ograniczenia materiałowe ograniczają możliwości podwyższania temperatury dmuchu do wartości 1200°C.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 9 S 603 052 04 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Ziębik

Wpłynęło do Redakcji: 20. 02. 1995 r.

LITERATURA

- [1] Imer S., Hofman E.: Entwicklung einiger mathematischer digitaler Winderhitzermodelle-Zweidimensionale Modelle. Archiv für des Eisenhüttenwesen (1975), H.3.
- [2] Niederliński A.: Systemy i sterowanie. Wstęp do automatyki i cybernetyki technicznej. PWN, Warszawa 1983.
- [3] Rusinowski H.: Model matematyczny przepływu ciepła w nagrzewnicy wielkopiecowej w stanie pseudoustalonym. Archiwum Hutnictwa (1984), nr 3.
- [4] Szargut J. (red.): Modelowanie numeryczne pól temperatury. WNT, Warszawa 1992.
- [5] Szargut J., Cofała J.: Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung des Wärmeübergangs in Hochofenwinderhitzern. Gas-Wärme International (1975), H. 10.

- [6] Szargut J., Guzik A.: Anwendung des Differenzverfahrens zur Bestimmung der Wärmedurchgangszahl in Regeneratoren. Archiv für des Eisenhüttenwesen (1968), nr 1.
- [7] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Ossolineum, Wrocław 1984.
- [8] Willmot A.J.: The Regenerative Heat Exchanger Computer Representation. Intern. Journal of Heat and Mass Transfer (1969), nr 1.

Abstract

The paper presents a method and the results of the thermodynamic analysis of the influence of the warm-up time of the blast and its temperature on the operation of Cowper stoves and on the energy characteristics of the blast-furnace process. In order to determine the admissible range of exploitation parameters an analytical-discrete mathematical model of a Cowper stove has been applied. The space coordinates are discretized, the time variable remaining continuous. Basing on this model the blast temperature range for every warm-up time of the blast has been determined.

Applying the mathematical model described in the former section simulating calculations have been carried out for a set of three operating Cowper stoves arranged in series at a blast-furnace with a volume of 3200 m^3 . Cowper stoves are equipped with an inner combustion shaft. The upper part of the filling is made up of silica, the medium one as well as the bottom part of chamotte. For the considered Cowper stoves the following material limitations are binding:

- admissible maximum temperature of cupola – 1400°C ,
- admissible maximum temperature of the combustion gases leaving the Cowper stove – 350°C ,
- admissible maximum temperature at the interphase of the silica and chamotte layers – 650°C .

Finally – the paper contains the results of simulating calculations of the influence of the temperature of preheating the blast in Cowper stoves on the following energy characteristics of a blast-furnace plant:

- specific consumption of the chemical energy of fuel gases per unit of blast,
- specific consumption of fuel gases (top-gas and coke-oven gas) in Cowper stoves,
- specific consumption of top-gas in Cowper stoves.