

Edward KOSTOWSKI

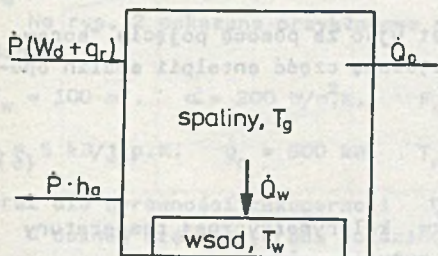
Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki ŚląskiejOPTIMALIZACJA NAGRZEWANIA WSADU  
W PIECACH GRZEJNYCH

**Streszczenie.** Przedstawiono równania bilansu energii i przepływu ciepła oraz założenia, które pozwalają otrzymać teoretyczną charakterystykę pieca komorowego. Podano rozwiązania wyznaczające optymalne parametry procesu (ze względu na maksymalną sprawność) dla chwilowej temperatury metalu oraz dla całego procesu nagrzewania. Rozpatrzono wpływ rekuperacji ciepła oraz podano rozwiązanie bliższe optymalnemu, ale dla stałego strumienia paliwa.

## 1. WSTĘP

Piece grzejne są urządzeniami, w których zużywa się znaczne ilości paliw. Jako urządzenia cieplne podlegają one również analizie termodynamicznej. Niniejsza publikacja zawiera syntetyczne ujęcie najważniejszych prac autora poświęconych temu zagadnieniu. Dotyczą one w zasadzie pieców komorowych.

## 2. RÓWNANIA PRZEPŁYWU CIEPŁA I BILANSU ENERGII



Rys. 1. Schemat pieca komorowego  
Fig. 1. Scheme of the chamber heating furnace

Przedmiotem rozważań jest przedstawiony na rys. 1 piec komorowy, dla którego przyjmuje się następujące założenia:

- spalanie jest zupełne, piec zaś jest zasilany spalinami o temperaturze kalorymetrycznej,
- temperatura spalin w piecu jest wyrównana i wynosi  $T_g$ , tyle też wynosi temperatura spalin wylotowych,

- c) współczynnik wnikania ciepła do metalu wynosi  $\alpha$  ,  
 d) nie tworzy się zgorzelina,  
 e) właściwości fizyczne spalin nie zależą od temperatury,  
 f) występują bezpośrednie straty ciepła do otoczenia.

Równania bilansu energii i przepływu ciepła mają wówczas następującą postać:

$$\dot{P}(W_d + q_r) = \dot{Q}_w + \dot{Q}_o + \dot{P} \cdot h_g, \quad (1)$$

$$\dot{Q}_w = F_w \alpha (T_g - T_w). \quad (2)$$

Po wprowadzeniu pojemności cieplnej  $S$  spalin powstałych z jednostki paliwa, która dla  $S = \text{idem}$  spełnia związek:

$$\left. \begin{aligned} W_d &= S(T_{k0} - T_n) = S \cdot \Delta T_{k0} & (a) \\ q_r &= S(T_k - T_{k0}) & (b) \\ h_g &= S(T_g - T_o) & (c) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

można równanie (1) dla  $T_n \approx T_o$  wyrazić następująco:

$$\dot{P} \cdot S(T_k - T_g) = \dot{Q}_w + \dot{Q}_o. \quad (4)$$

W analizie energetycznej pieca bardzo użyteczną wielkością jest "chwilowa sprawność termiczna", definiowana następująco:

$$\bar{\eta}_t = \frac{\dot{Q}_w}{\dot{P} \cdot W_d}. \quad (5)$$

W piecu komorowym jest ona związana z chwilową (w danym momencie) temperaturą wsadu, zależy ponadto od strumienia paliwa, strat ciepła do otoczenia oraz rekuperacji ciepła.

Wpływ rekuperacji ciepła dogodnie jest ująć za pomocą pojęcia "sprawność rekuperacji", definiowanej jako odzyskaną część entalpii spalin opuszczających piec

$$\eta_r = q_r/h_g. \quad (6)$$

która z jednej strony powoduje wzrost tzw. kalorymetrycznej temperatury spalania, a z drugiej daje zmniejszenie zużycia paliwa.

## 3. TEORETYCZNA CHARAKTERYSTYKA ENERGETYCZNA PIECA KOMOROWEGO

Skojarzenie równań (1)÷(6) umożliwia wyrażenie energii chemicznej paliwa (tj. iloczynu  $\dot{P} \cdot W_d$ ) w postaci funkcji temperatury  $T_g$  spalin w piecu. Otrzymuje się:

$$\dot{P} \cdot W_d = \frac{\Delta T_{kO} [\dot{Q}_o + F_w \alpha (T_g - T_w)]}{\Delta T_{kO} - \eta_r (T_g - T_o)} \quad (7)$$

Ponieważ użyteczny strumień ciepła  $\dot{Q}_w$ , określony równaniem (2), również zależy od temperatur  $T_g$  i  $T_w$ , można tym samym określić charakterystykę energetyczną pieca w postaci  $\dot{E}_{ch} = \dot{P} W_d = f(\dot{Q}_w)$  dla danej temperatury metalu. Szczegółowa jej postać zależy od sposobu podania strat ciepła  $\dot{Q}_o$ . W dalszej analizie rozpatrzono dokładniej dwa przypadki:

$$g1) \dot{Q}_o = \text{idem}, \quad (8)$$

$$g2) \dot{Q}_o = F_o k_o (T_g - T_o). \quad (9)$$

Łatwiejszy do analizy jest pierwszy przypadek. Jeżeli do założenia g1) wprowadzi się dodatkowy zapis

$$\Delta T_o = \dot{Q}_o / (F_w \alpha) = \text{idem}, \quad (10)$$

to dla przypadku bez rekuperacji ciepła (czyli dla  $q_r = 0$ ) otrzymuje się następujące wyrażenie na  $\bar{\eta}_t$ :

$$\bar{\eta}_t = \frac{(T_g - T_w)(T_{kO} - T_g)}{\Delta T_{kO}(T_g - T_w - \Delta T_o)} \quad (11)$$

chwilowa sprawność termiczna również jest tylko funkcją temperatur  $T_g$  i  $T_w$ .

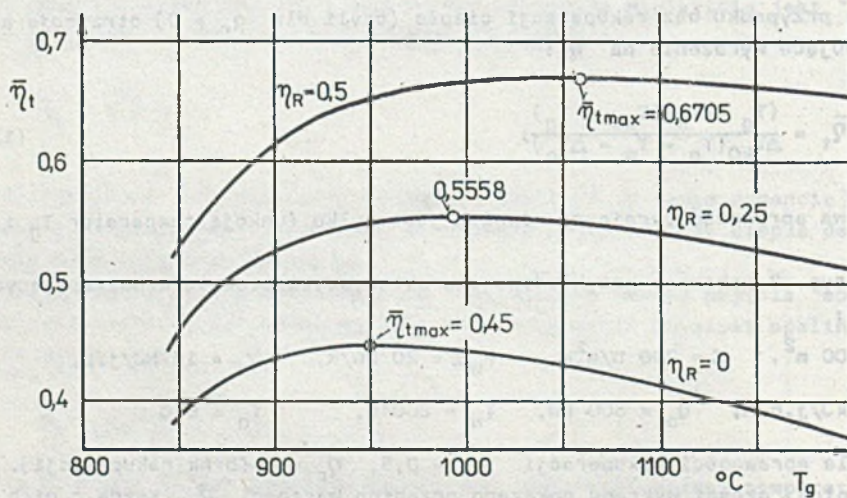
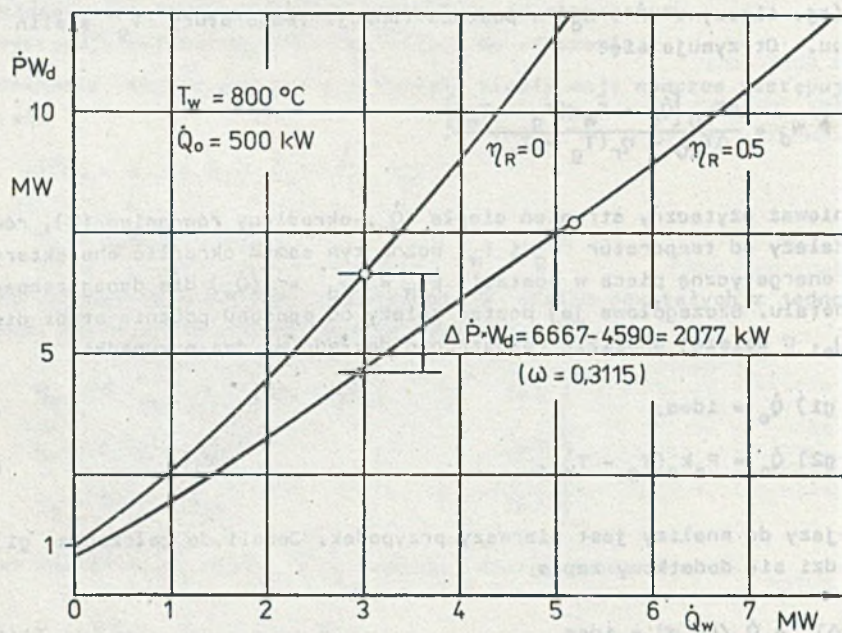
Na rys. 2 pokazano przykładowe charakterystyki pieca dla następujących danych:

$$F_w = 100 \text{ m}^2, \quad \alpha = 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, \quad F_w \alpha = 20 \text{ kW/K}, \quad W_d = 10 \text{ MJ/j.p.},$$

$$S = 5 \text{ kJ/j.p.K}, \quad \dot{Q}_o = 500 \text{ kW}, \quad T_w = 800^\circ \text{C}, \quad T_o = 0^\circ \text{C}$$

oraz dla sprawności rekuperacji  $\eta_r = 0,5$ ,  $\eta_r = 0$  (brak rekuperacji).

W dolnej części wykresu pokazano przebieg wartości  $\bar{\eta}_t$ . Każda z nich ma maksimum, które można określić analitycznie. Zwraca uwagę dość płaski przebieg tych krzywych, co oznacza, że nawet dla warunków dość znacznie odbiegających od optymalnych chwilowa sprawność termiczna (a w konsekwen-



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka energetyczna pieca grzejnego

Fig. 2. Energy characteristic of a heating furnace (example)

cji również tzw. "zużycie ciepła" na podgrzanie metalu) może mało różnić się od wartości granicznych.

#### 4. WARTOŚCI OPTIMALNE

Dla określonej temperatury metalu istniejąca taka temperatura  $T_g$  spaliny w piecu, dla której chwilowa sprawność termiczna osiąga maksimum.

Wartość  $T_g$  opt (w praktyce dogodniejsze są formuły dla różnicy  $(T_g - T_w)$  opt) wyznacza się z warunku:

$$d\bar{\eta}_t/dT_g = 0. \quad (12)$$

Rozwiązanie [7, 8] zależy od sposobu określenia strat ciepła. Dla stałych strat ciepła (założenie  $g_1$  i równanie (8)) z warunku (12) otrzymuje się równanie kwadratowe:

$$(T_g - T_w)^2 + 2\Delta T_o(T_g - T_w) - \Delta T_o(T_{k0} - T_w) = 0, \quad (13)$$

które ma jedyne fizycznie sensowne rozwiązanie:

$$(T_g - T_w)_{opt} = \Delta T_o \cdot Z(T_w), \quad (14a)$$

gdzie przez  $Z(T_w)$  oznaczono bezwymiarową wielkość pomocniczą będącą odpowiednikiem temperatury metalu (wsadu):

$$Z(T_w) = \sqrt{1 + \frac{T_{k0} - T_w}{\Delta T_o}} - 1.$$

Wielkość  $Z(T_w)$  maleje ze wzrostem  $T_w$ . Za pomocą  $Z$  można też wyrazić inne interesujące nas wielkości:

$$\dot{Q}_{wopt} = \dot{Q}_o \cdot Z, \quad (b)$$

$$\dot{P}_{opt} = \frac{F_w c c}{S} \cdot Z, \quad (c)$$

$$\bar{\eta}_{tmax} = \frac{\Delta T_o \cdot Z^2}{\Delta T_{k0}}. \quad (d)$$

Podobnie postępuje się w przypadku zmiennych strat ciepła określonych warunkiem  $g_2$  (równanie (9)). Bezwymiarowym odpowiednikiem temperatury metalu jest wielkość:

$$Y(T_w) = \sqrt{1 + \frac{T_{kO} - T_w}{T_w - T_o} K_2}, \quad (15)$$

gdzie oznaczono:

$$K = \sqrt{\frac{F_w \alpha}{F_o k_o}}, \quad K_1 = 1 + K^{-2}, \quad K_2 = 1 + K^2. \quad (16a, b, c)$$

Rozwiązania mają postać:

$$\left. \begin{aligned} (T_g - T_w)_{opt} &= \frac{T_{kO} - T_w}{1 + Y}, & (a) \\ \dot{Q}_{wopt} &= F_w \alpha (T_g - T_w)_{opt}, & (b) \\ \dot{P}_{opt} &= \frac{F_w \alpha + F_o k_o}{S(Y - 1)}, & (c) \\ \bar{\eta}_{tmax} &= \frac{(Y - 1)(T_{kO} - T_w)}{(Y + 1) \Delta T_{kO} K_1} & (d) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Wzory (14)-(17) umożliwiają łatwe analityczne określenie parametrów optymalnych.

## 5. WPŁYW REKUPERACJI CIEPŁA

Podane rozwiązania dotyczą przypadku  $q_r = 0$ . Mogą one być stosowane również dla  $q_r = \text{idem}$ , co wymaga podstawienia w miejsce  $T_{kO}$  także stałej temperatury  $T_k$ . Podniesienie temperatury kalorymetrycznej pociąga za sobą zwiększenie wartości  $Z$  i w konsekwencji:

- podwyższenie optymalnej temperatury spalin w piecu,
- zwiększenie strumienia ciepła do metalu.

Ciepło rekuperacji jest jednak zwykle zależne od temperatury spalin wylotowych. Do jego obliczenia wykorzystuje się pojęcie sprawności rekuperacji określone wzorem (6). Można napisać:

$$q_r = \eta_r \cdot S(T_g - T_o) = f(T_g), \quad (18)$$

przy czym przyjmuje się zwykle  $\eta_r = \text{idem}$ .

Podstawienie (18) do (1) daje:

$$\dot{P} \varepsilon_r (T_{kR} - T_g) = \dot{Q}_w + \dot{Q}_o, \quad (19)$$

gdzie:  $\varepsilon_r = 1 - \eta_r$ , wielkość zaś

$$T_{kR} = \frac{T_{kO} - \eta_r T_o}{\varepsilon_r} \quad (20)$$

jest skorygowaną temperaturą kalorymetryczną uwzględniającą wpływ zmien-  
nego ciepła rekuperacji. W sensie fizycznym jest to graniczna, teore-  
tycznie w danych warunkach osiągalna kalorymetryczna temperatura spala-  
nia.

Dalsze postępowanie prowadzi do podobnych jak dla  $q_r = 0$  rozwiązań,  
z tym że w funkcji  $Z(T_w)$  lub  $Y(T_w)$  zamiast  $T_{kO}$  występuje  $T_{kR}$ .

Rozwiązania (14) i (17) nie zmieniają się, jedynie wzory (14c,d) przyj-  
mują nieco inną postać:

$$\dot{P}_{opt} = \frac{F_w \alpha}{\varepsilon_r S Z}, \quad (14\text{f})$$

$$\eta_{tmax} = \varepsilon_r \frac{\Delta T_o \cdot Z^2}{\Delta T_{kO}} \quad (14\text{g})$$

przy czym wielkość  $Z$  jest oczywiście wyznaczana dla temperatury  $T_{kR}$ .

## 6. MINIMALNE ZUŻYCIE PALIWA PODCZAS NAGRZEWANIA METALU

Zużycie paliwa podczas nagrzewania metalu zależy od takich czynników,  
jak: temperatury (początkowa i końcowa) metalu, rodzaju paliwa, strat  
ciepła do otoczenia, rekuperacji ciepła. Zależy ono też od przebiegu pro-  
cesu, który można sterować przez dobór strumienia paliwa  $\dot{P}$  i związe-  
nych z nim wielkości. Wśród możliwych do realizacji istnieje taki prze-  
bieg  $\dot{P}(t)$ , dla którego zużycie paliwa jest minimalne

$$P = \int_0^k \dot{P}(t) dt = \min, \quad (21a)$$

przy czym górna granica całkowania, czyli czas nagrzewania jest określona  
warunkowo:

$$T_w(t_k) = T_{wk}. \quad (21b)$$

Po wykorzystaniu chwilowej sprawności termicznej (5) oraz równania przepływu ciepła do wsadu (o wyrównanej temperaturze)

$$\dot{Q}_W dt = W_W dT_W \quad (22)$$

warunek (21a) można przekształcić do postaci:

$$P = \frac{W_W}{W_D} \int_{T_{wp}}^{T_{wk}} \frac{dT_W}{\bar{\eta}_t} = \min. \quad (22a)$$

Jest to już minimum bezwarunkowe o określonych, stałych granicach całkowania. Wynika z niego jednoznacznie, że jeżeli  $\bar{\eta}_t$  jest funkcją temperatury  $T_W$ , to zużycie paliwa podczas nagrzewania będzie minimalne wtedy, gdy dla każdej temperatury metalu chwilowa sprawność termiczna osiągnie wartość maksymalną. W przypadku, gdy współczynnik wnikania ciepła jest zmienny (jest funkcją  $T_g$  i  $T_W$ ), rozwiązanie otrzymuje się numerycznie [6], ale dla  $\alpha = \text{idem}$  można otrzymać też rozwiązanie analityczne [7, 8]. Rozwiązanie takie, jako ogólniejsze, lepiej nadaje się do jakościowej analizy procesu nagrzewania metalu.

W celu otrzymania rozwiązania całki (22a) wykorzystuje się wielkości podane w p. 4 oraz stosuje zamiast zmiennych ( $Z$  lub  $Y$  zamiast  $T_W$  itd.) i całkuje w nowych granicach.

Na przykład dla  $\dot{Q}_0 = \text{idem}$  jest [7]:

$$P_{\min} = \frac{W_W}{S} \int_{Z_k}^{Z_p} \frac{2(Z+1)}{Z^2} dZ. \quad (23)$$

W wyniku całkowania otrzymuje się:

$$P_{\min} = \frac{W_W}{S} \cdot 2 \left( \ln \frac{Z_p}{Z_k} + \frac{1}{Z_k} - \frac{1}{Z_p} \right), \quad (24)$$

gdzie  $Z_p$  odpowiada  $T_{wp}$  oraz  $Z_k \sim T_{wk}$ .

Znajomość  $P_{\min}$  pozwala obliczyć maksymalną sprawność termiczną całego procesu nagrzewania. Ciepło użyteczne pochłonięte przez metal wynosi bowiem:

$$Q_W = W_W (T_{wk} - T_{wp}), \quad (25)$$

a energia chemiczna paliwa:

$$Q_{ch} = P \cdot W_D = PS\Delta T_{k0}, \quad (26)$$



co daje:

$$\eta_{tmax} = \frac{Q_w}{Q_{chmin}} = \frac{T_{wk} - T_{wp}}{\Delta T_{k0} \cdot F(Z_p, Z_k)}, \quad (27)$$

gdzie oznaczono:

$$F(Z_p, Z_k) = 2 \left( \ln \frac{Z_p}{Z_k} + \frac{1}{Z_k} - \frac{1}{Z_p} \right). \quad (28)$$

Sprawność termiczna zależy tylko od poziomu temperatur (metal i kalorymetrycznej spalania) oraz poziomu strat ciepła. W przypadku braku strat ciepła (dla tzw. pieca idealnego) dochodzi się do rezultatów granicznych podanych już w [5].

Drugą wielkością, którą można wyliczyć, jest czas nagrzewania metalu - wynika on z równania (22). Po wykorzystaniu funkcji  $Z$  i wykonaniu działań otrzymuje się:

$$t_k = \frac{W}{F_w \alpha} \cdot 2 \left( \ln \frac{Z_p}{Z_k} + Z_p - Z_k \right), \quad (29)$$

co można też zapisać w formie bezwymiarowej:

$$\frac{F_w \alpha t_k}{W} = 2 \left( \ln \frac{Z_p}{Z_k} + Z_p - Z_k \right). \quad (29a)$$

Jeżeli wprowadzi się charakterystyczny rozmiar liniowy

$$L = V/F_w, \quad (30)$$

to lewą stronę równania (29a) można zapisać w postaci iloczynu dwóch liczb kryterialnych

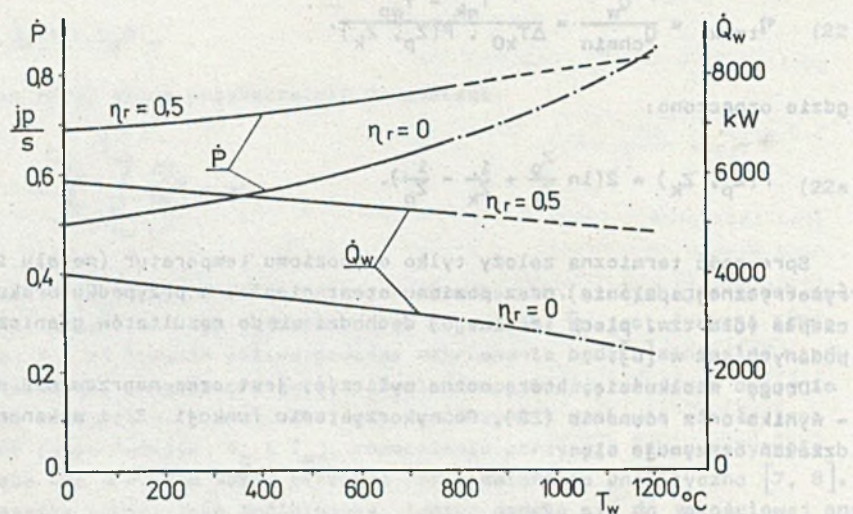
$$\frac{F_w \alpha t_k}{W} = B1 \cdot Fo, \quad (31)$$

a równanie (29) przyjmuje postać:

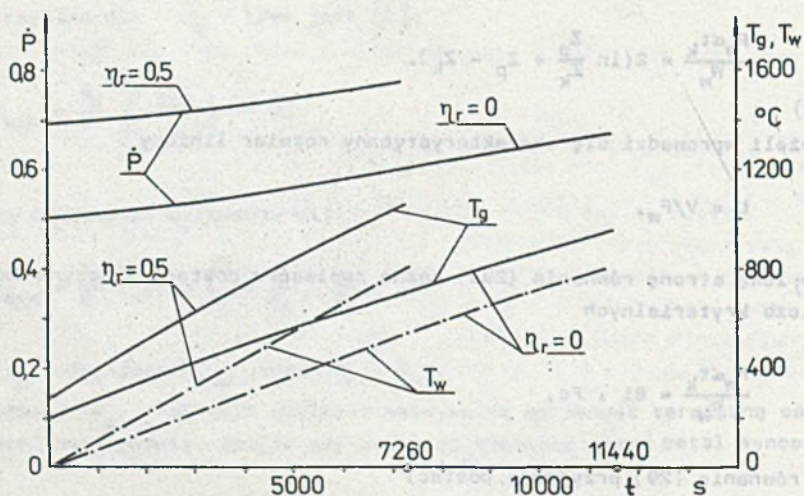
$$(B1 \cdot Fo) = \Phi(Z_p, Z_k). \quad (32)$$

Powyższe zależności są jednocześnie zależnością  $t = \varphi(T_w)$ , wyrażoną za pomocą funkcji elementarnych, nie można jednak w niej wyznaczyć funk-

a)



b)



Rys. 3. Przebieg przykładowego procesu nagrzewania

a) w zależności od temperatury metalu, b) jako funkcja czasu

Fig. 3. Course of the heating process (example)

a) dependence on metal temperature, b) function of time

cji odwrotnej (temperatura metalu jako funkcja czasu nagrzewania) potrzebnej do bezpośredniego rozwiązywania funkcjonału (21a). Powyższe rozwiązanie pokazuje też, że próba wyznaczenia minimum zużycia paliwa przy narzuconym czasie nagrzewania daje tylko rozwiązanie cząstkowe, o ograniczonej przydatności, i do tego otrzymywane w sposób o wiele bardziej skomplikowany [1, 9, 10]. Na rys. 3 pokazano przebieg przykładowego procesu nagrzewania.

### 6.1. Rozwiązania dla zmiennych strat ciepła

W przypadku zmiennych strat ciepła, określonych wzorem (9), wykorzystuje się bezwymiarową wielkość  $Y$ , zaś rozwiązania chwilowe są dane wzorami (17). W dalszym rozwiązaniu postępuje się podobnie jak poprzednio. Po wykonaniu działań otrzymuje się rozwiązanie o postaci:

$$P_{\min} = \frac{W_w}{S} \left[ \frac{K^2 - 1}{K^2} \ln \frac{(Y_p - 1)^2 (Y_k^2 + K^2)}{(Y_k - 1)^2 (Y_p^2 + K^2)} + 2 K_1 \left( \frac{1}{Y_k - 1} - \frac{1}{Y_p - 1} \right) + \frac{4}{K} (\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Y_k}{K} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Y_p}{K}) \right]. \quad (33)$$

Podobnie wyznacza się czas nagrzewania, który w bezwymiarowej formie wynosi:

$$(B1 \cdot Fo) = \ln \frac{(Y_p - 1)^2 (Y_k^2 + K^2)}{(Y_k - 1)^2 (Y_p^2 + K^2)} + 2 K (\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Y_p}{K} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Y_k}{K}). \quad (34)$$

Ponadto można jeszcze obliczyć łączne straty ciepła dla całego procesu nagrzewania [7].

## 7. PRZYBLIŻONE ROZWIĄZANIE DLA STAŁEGO STRUMIENIA PALIWA

Otrzymane rozwiązania charakteryzują się tym, że strumień paliwa  $\dot{P}$  podczas procesu nagrzewania jest zmienny - zwiększa się ze wzrostem temperatury. Jest to bardzo niewygodne w aspekcie praktycznej realizacji procesu. Z drugiej strony, ze względu na mały wpływ  $\dot{P}$  na chwilową sprawność termiczną, można się spodziewać, że przyjęcie stałego strumienia paliwa w czasie całego procesu stosunkowo mało wpłynie na łączne zużycie paliwa i sprawność całego procesu. Obliczenia pokazują, że tak jest w istocie. W obu omawianych przypadkach otrzymuje się równania przestępne,

z których numerycznie wyznacza się optymalny stały strumień paliwa, a następnie przez proste całkowanie wyznacza się czas  $t_k$  całego procesu nagrzewania [7, 8]. łączne zużycie paliwa wynika z zależności elementarnej:

$$P = \dot{P}_{opt} \cdot t_k \quad (35)$$

i jest nieco większe od wartości określonej wzorem (24) względnie (33). Z tego powodu sprawność termiczna takiego nagrzewania jest nieznacznie mniejsza w porównaniu z procesem optymalnym.

## 8. POSUMOWANIE

Przedstawiono teoretyczne rozwiązanie omawianego problemu pokazując sposób kojarzenia równań bilansu energii i przepływu ciepła (a więc wyrażających I i II zasadę termodynamiki) i ich zastosowanie do analizy szczególnego procesu cieplnego, jakim jest nagrzewanie metalu w piecu. Otrzymane rozwiązanie może służyć przede wszystkim do analizy jakościowej wpływu różnych parametrów na dany proces. Powyższą analizę można rozbudować o inne elementy (np. różnica temperatur w metalu, rzeczywista charakterystyka pieca, zmiana współczynnika wnikania ciepła itd.), ale w takim przypadku rozwiązanie otrzymuje się już tylko z reguły sposobem numerycznym. Analiza termodynamiczna jest jednak zwykle podstawą analizy termoeconomicznej, wskazuje przy tym ograniczenia, których nie można przekroczyć.

### Wykaz oznaczeń

- $c$  - właściwa pojemność cieplna (ciepło właściwe)
- $F$  - powierzchnia ( $F_w$  - wsadu czyli metalu,  $F_o$  - ścian pieca)
- $h_g$  - entalpia spalin odniesiona do jednostki paliwa
- $jp$  - jednostka paliwa
- $K_1$  - wielkości pomocnicze
- $k_o$  - współczynnik przenikania ciepła (z pieca do otoczenia)
- $m$  - masa
- $\dot{P}$  - strumień paliwa (jp/s)
- $\dot{Q}$  - strumień ciepła ( $\dot{Q}_w$  - użyteczny, do wsadu,  $\dot{Q}_o$  - strat do otoczenia)
- $q_r$  - ciepło rekuperacji (odniesione do jednostki paliwa)
- $S$  - pojemność cieplna spalin odniesiona do jednostki paliwa
- $T$  - temperatura
- $t$  - czas ( $t_k$  - czas nagrzewania od  $T_{wp}$  do  $T_{wk}$ )

- $\Delta T_{k0}$  - kalorymetryczny przyrost temperatury (bez rekuperacji ciepła)
- $\Delta T_0$  - wielkość pomocnicza ( $\Delta T_0 = \dot{Q}_0 / F_W \alpha$ )
- $W_D$  - wartość opałowa
- $W_W$  - pojemność cieplna wsadu (metal),  $W_W = m_W \cdot c$
- $Y, Z$  - bezwymiarowe wielkości pomocnicze, odpowiadające temperaturze  $T_W$  metalu
- $\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła (do wsadu)
- $\eta_r$  - sprawność (stopień) rekuperacji ( $\epsilon_r = 1 - \eta_r$ )
- $\bar{\eta}_t$  - chwilowa sprawność termiczna
- $Bi$  - liczba Biota,
- $Fo$  - liczba Fouriera

### Indekey

- g - spaliny,
- k - kalorymetryczny,
- k0 - kal. bez rekuperacji ciepła,
- R - z rekuperacją,
- p - początek,
- k - koniec,
- w - dotyczy wsadu (metal),
- o - dot. ścian pieca.

### LITERATURA

- [1] Butkowskij A.G., Małyj S.A., Andriejew J.H.: Optimalnoje upravlieniye nagriewom metalla. Izd. Metallurgija, Moskwa 1972.
- [2] Glinkow M.A.: Osnovy obszczey teorii pieczey. Metallurgizdat, Moskwa 1962.
- [3] Heiligenstaedt W.: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen. Stahl Eisen Verlag, Düsseldorf 1955.
- [4] Köhlgrüber K., Woelk G.: Energetische Optimierung von Industrieöfen. Gas wärme int. 34 (1985, Heft 4), s. 140.
- [5] Kostowski E.: Analiza czynników wpływających na zużycie paliwa podczas nagrzewania wsadu w piecu wglębnym. ZN Pol. Śl., Energetyka z. 49 (praca habilitacyjna), Gliwice 1973.
- [6] Kostowski E.: Minimaler Brennstoffverbrauch beim Erwärmen von Metallen. Gas wärme internat. 27 (1978, Heft 10), s. 559.
- [7] Kostowski E.: Minimaler Brennstoffverbrauch beim Erwärmen von Metallen - Analytische Lösung. Gas wärme int. 29 (1980, Heft 1), s. 23 oraz ditto-Teil 2, jak wyżej - 34 (1985, Heft 4), s. 155.
- [8] Kostowski E.: Thermodynamische Analyse des Erwärmungsprozesses von metallischem Einsatz. Neue Hütte 31 (1986, Heft 12), s. 464.
- [9] Stefanik J.: Optymalizacja procesu nagrzewania wsadu w piecu wglębnym, praca doktorska, Pol. Śląska, Gliwice 1979.

- [10] Stefanik J.: Minimalizacja zużycia paliwa przy nagrzewaniu wsadu. Arch. Hutnictwa, t. 26 (1981), z. 3, s. 517.
- [11] Tajc J.: Technologia nagriewa stali, Metalurgizdat, Moskwa 1962.
- [12] Thiring M.W.: The science of flames and furnaces, Chapman and Hall Ltd., London 1952.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

#### Резюме

Процесс нагрева металла можно математически описать уравнением энергетического баланса и уравнением теплопередачи. Особенно простое решение получается в случае уравновешенной температуры газов в печи. Для любой температуры металла можно определить оптимальные параметры (расход топлива, температура газов в печи, для которых мгновенный КПД достигает максимума). Эти параметры зависят от тепловых потерь, коэффициента теплопередачи и рекуперации тепла. Если коэффициент теплопередачи во время нагрева металла постоянный, можно получить решение для целого процесса. Такие решения даны для двух случаев потерь тепла, определенных уравнениями (8) и (9). Представленные решения можно использовать для качественного анализа процесса нагрева металла в камерной печи.

#### OPTIMISATION OF THE METALS HEATING PROCESS IN A CHAMBER FURNACE

#### Summary

The phenomena attending the heating of metals can be represented mathematically with the aid of energy balances equations and heat transfer equations. Particularly simple equations obtain in the case of chamber furnaces having a balanced waste gas temperature. For every metal temperature the instantaneous thermal efficiency can be determined which if maximized permits the optimum values for fuel flow and the associated waste gas temperature to be determined. These variables are, among other things, dependent on the heat loss, the heat transfer coefficient and the recuperation of heat. The assumption that some coefficients are constant enables a solution to be found for the entire heating process. Solution are shown for two cases of heat losses (given by equations (8) or (9)) and for different recuperation variants. The relationships presented can be used for the qualitative analysis of reheating furnaces.