

Szczegółowe problemy sprawnego i ekologicznego spalania paliwa w przedpaleniskach pieców

Aleksander Szkarowski
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Nie ulega wątpliwości, że wysoki efekt ekonomiczny, jak również ekologiczny przy zużyciu paliwa w piecach przemysłowych uzyskać można poprzez udoskonalenie samego procesu spalania paliw. Przy tym wydatki na realizację technicznych przedsięwzięć okazują się znacznie mniejsze w porównaniu z utylizacją ciepła bądź oczyszczaniem spalin już po skończeniu procesu technologicznego.

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych procesów wymiany ciepła i masy w przemyśle jest osuszanie i podgrzanie różnych materiałów w bębnowych piecach rotacyjnych. Takie piece wykorzystywane są w energetyce, hutnictwie, przy produkowaniu materiałów budowlanych, w przemyśle chemicznym, spożywczym i w wielu innych branżach. Spalanie paliwa w takich urządzeniach odbywa się nie bezpośrednio w piecach, a w wolnostojących paleniskach (tzw. przedpaleniskach). Potrzeba stosowania przedpalenisk uwarunkowana jest przede wszystkim ruchomą konstrukcją samego pieca obracającego się w sposób ciągły. Poza tym wynika to z niedopuszczalności bezpośredniego oddziaływania wysokotemperaturowego płomienia na materiał obrabiany, jak również z ewentualnego pogarszania wskaźników spalania paliwa przy takim kontakcie.

2. Ocena sprawności i jakości spalania paliwa w przedpaleniskach

Mimo całej różnorodności konstrukcji przedpalenisk można je podzielić na trzy podstawowe klasy [1] różniące się radykalnie swymi charakterystykami technicznymi (tab. 1).

Za najbardziej niedoskonałe należy uznać przestarzałe konstrukcje komorowe. Mimo wielce umiarkowanej objętościowej gęstości strumienia ciepła w przestrzeni paleniska (g_v) takie konstrukcje charakteryzują się wysoką materiałochłonnością (materiały ognioodporne i izolacyjne, metal itp.) i z tego powodu są drogie. Bardziej doskonałe są paleniska cylindryczne i o konstrukcji specjalnej (jak na przykład cyklonowe). Zastosowanie palników krótkopłomieniowych i wymuszone zwiększenie burzliwości w objętości paleniska pozwala osiągać wartości $g_v > 15 \text{ MBT/m}^3$, a racjonalne wykorzystanie schładzających strumieni powietrza zapewnia większą lekkość konstrukcji obmurza aż do konstrukcji nieobmurowanych.

Tabela 1. Porównanie charakterystyk przedpalenisk pieców rotacyjnych

Table 1. Comparison of the characteristics of pre-grates for rotary furnaces

Typ konstrukcji	$g_v, \text{ MW/m}^3$	Zapotrzebowanie na cegłę, t/MW	Trwałość	Sprawność, %	Emisja NO_x , kg/GJ
1	2	3	4	5	6
Komorowe	0,5÷0,7	6÷7	Mała	80÷90	12÷15
Cylindryczne	0,9÷2,3	0÷5	Średnia	do 98	
Specjalne	1,7÷17,5	0÷3	Duża	do 96	

Zwraca na siebie uwagę jednakowo zła ocena ekologicznych wskaźników spalania paliwa w przedpaleniskach. Jednostkowa emisja NO_x w tych urządzeniach (do 0,15 kg/GJ) jest 1,5÷2 razy większa od podobnego wskaźnika dla kotłów o średniej mocy. Mała pojedyncza moc pieców sprawiła, że w kraju można zauważyć pewną niefrasobliwość w podejściu do ich charakterystyk ekologicznych. Bardzo ważne to jest w perspektywie przystąpienia do Unii Europejskiej, gdzie piecom przemysłowym stawiane są wysokie wymagania nawet wobec wywołanego przez palniki hałasu.

Przyczyną powstawania złych wskaźników eksploatacji pieców jest automatyczne przeniesienie na nie zasad spalania paliwa charakterystycznych dla kotłów. Mimo, że przedział wymaganej temperatury w piecach wynosi 150÷850°C (do 1000÷1100°C przy niektórych procesach wysokotemperaturowych), paliwo z reguły spalane jest ze współczynnikiem nadmiaru powietrza w palenisku $\alpha_p = 1,10\div 1,30$. Następnie dokonuje się rozrzedzenia spalin w powietrzu do wymaganej temperatury.

Wynikiem takiej technologii spalania paliwa są trzy następujące bardzo ważne skutki.

- Według danych autora dla rocznej trwałości obmurza szamotowego należy gwarantować brak powstawania całkowitego szklistego nadtopienia powierzchni, które gwałtownie obniża ogniotrwałość i odporność wibracyjną ciała glinokrzemianowego. Dla cegły z szamotu temu warunkowi odpowiada temperatura powierzchni obmurza nie wyższa niż 1300°C. Wysokotemperaturowe spalanie paliwa w urządzeniach, w których nie ma użytecznego odprowadzenia ciepła powoduje niedopuszczalne obciążenie temperaturowe obmurza – do 1600÷1650°C, co z kolei skutkuje obniżeniem trwałości, zwłaszcza w warunkach podwyższonych wibracji.
- Wspomniany wyżej przedział α odpowiada strefie bliskiej maksimum zależności $C_{NO_x} = f(\alpha)$ [2]. W połączeniu z brakiem odprowadzenia ciepła od strefy spalania i pewnym wpływem zjawiska „hartowania” [3] przy gwałtownym schłodzeniu spalin w przestrzeni pieca uwarunkowuje to wysoka jednostkową emisję NO_x .
- Wysoki temperaturowy poziom procesu powoduje podwyższone straty ciepła przez ścianki, co obniża sprawność zużycia paliwa w paleniskach o konstrukcji komorowej.

Te trzy pozycje wyznaczają zarówno bezpośrednią (ze względu na emisję NO_x), jak i pośrednią (ze względu na zużycie materiałów i energii) energo-ekologiczną niedoskonałość metod spalania paliwa w piecach.

3. Energo-ekologiczne zasady udoskonalania spalania paliw w przedpaleniskach

Można wyróżnić kilka podstawowych kierunków udoskonalania spalania paliw w paleniskach pieców:

- podwyższenie odporności termicznej i wibracyjnej ogniowych powierzchni obudowy palenisk przez stosowanie nowych materiałów ognioodpornych;
- cieplne i aerodynamiczne udoskonalanie procesów paleniskowych;
- konstrukcyjne udoskonalanie palenisk;
- opracowanie nowych konstrukcji palników.

Materiały o wysokiej ognioodporności (magnezytowe i chromo-magnezytowe) źle wytrzymują częste zmiany temperatury i obciążenia wibracyjne. Sproszkowane i chromianowe materiały, jak też samozwiązany węgiel krzemu są zbyt drogie dla tak rozpowszechnionych urządzeń, jakimi są paleniska pieców. Obniżona odporność termiczna i wibracyjna ogranicza możliwości stosowania nowoczesnych powłok ochronnych (na przykład warstw grafito-

wych na zaprawie ze szkła wodnego potasowego). Z powyższych przyczyn branża nadal zorientowana jest na szamot jako optymalny materiał ogniodporny ze względu połączenia charakterystyk i ceny.

Zatem za główne kierunki opracowań należy uznać trzy inne z wymienionych na liście, zazwyczaj w ich połączeniu. Najbardziej ekologicznym według autorskiej koncepcji [4,5] jest radykalne udoskonalanie procesów paleniskowych, co zapewnia jednocześnie podwyższenie sprawności i zdławienie powstawania składników szkodliwych.

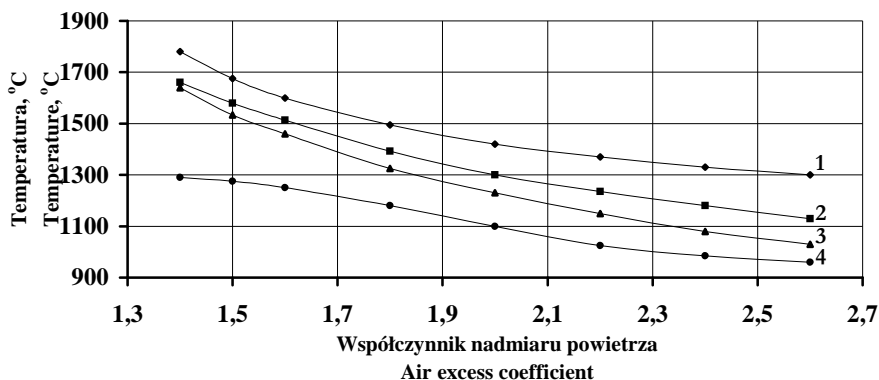
Taką możliwość daje proste i technologiczne rozwiązanie – obniżenie ogólnego poziomu temperaturowego procesu paleniskowego za pomocą doprowadzenia maksymalnie możliwej ilości powietrza zarówno na spalanie paliwa jak i na rozrzedzanie spalin **bezpośrednio do palników**.

To podejście znane jest od dawna, jednak w piecach praktycznie nie było realizowane, ponieważ potrzebowało specjalnych palników, skutecznie pracujących przy wysokich i zmiennych nadmiarach powietrza. Zastosowanie palników z rozszerzonymi możliwościami regulacji pozwala zaopatrywać piece w czynnik grzejny o początkowej temperaturze 500÷1100°C **dostarczając cały strumień powietrza bezpośrednio do palnika**. To pozwala jednocześnie:

- znacznie zwiększyć sprawność zużycia paliwa w wyniku zmniejszenia strat ciepła przez obudowę palenisk;
- zmniejszyć rozmiary i materiałochłonność palenisk dzięki podwyższonej burzliwości i mniejszym wymiarom płomienia przy wysokich α ;
- uprościć konstrukcję palenisk rezygnując z urządzeń do mieszania spalin z powietrzem;
- zapewnić dopuszczalny poziom temperaturowy eksploatacji obmurza i jego trwałość.

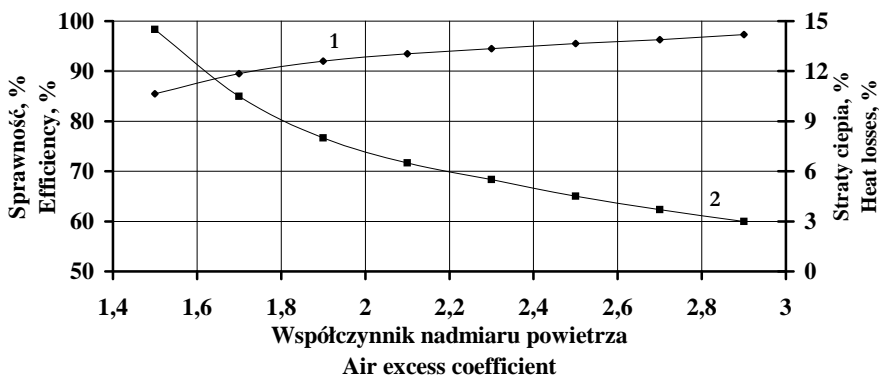
Dane przedstawione na rys. 1 otrzymane są na komorowym palenisku wyposażonym w palnik spalający paliwo przy wysokich α i obsługującym rotacyjny piec dla produkcji asfaltobetonu. Wykresy pokazują, jak radykalnie zmieniają się przy tym ważniejsze charakterystyki temperaturowe procesu paleniskowego [1].

Podwyższenie sprawności zużycia paliwa wraz ze zwiększeniem α_p ilustrują dane na rys. 2. Obniżenie temperatury obmurza powoduje zmniejszenie strat ciepła przez ścianki, wskutek czego sprawność paleniska zwiększa się średnio z 85÷90% do 94÷96% (trzeba tu zauważyć, że w odróżnieniu od urządzeń cieplnych wykorzystujących ciepło, dla przedpalenisk dyspozycyjne ciepło spalin jest ciepłem użytecznym).



Rys. 1. Temperaturowe charakterystyki w przedpalenisku komorowym w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza: 1 – maksymalna temperatura płomienia; 2 – maksymalna temperatura ścianek; 3 – obliczeniowa temperatura spalin; 4 – rzeczywista temperatura spalin na wyjściu z paleniska

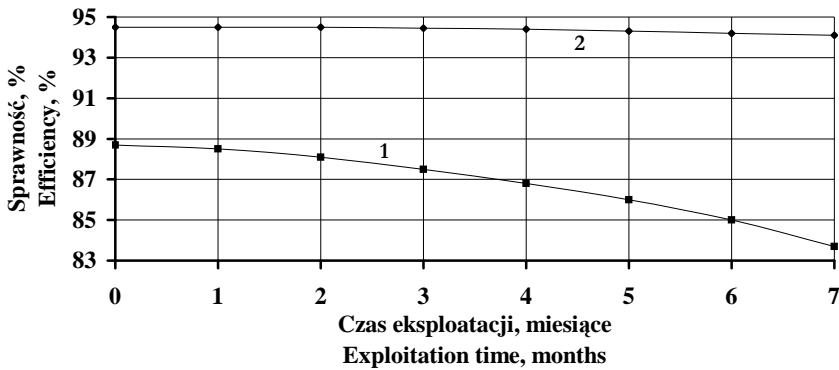
Fig. 1. Temperature characteristics of a chamber pre-grate depending on air excess coefficient: 1 – maximum flame temperature; 2 – maximum walls temperature; 3 – calculated flue gas temperature; 4 – actual flue gas temperature



Rys. 2. Wskaźniki sprawności przedpaleniska komorowego w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza doprowadzanego do palnika: 1 – sprawność paleniska; 2 – straty ciepła przez obudowę paleniska

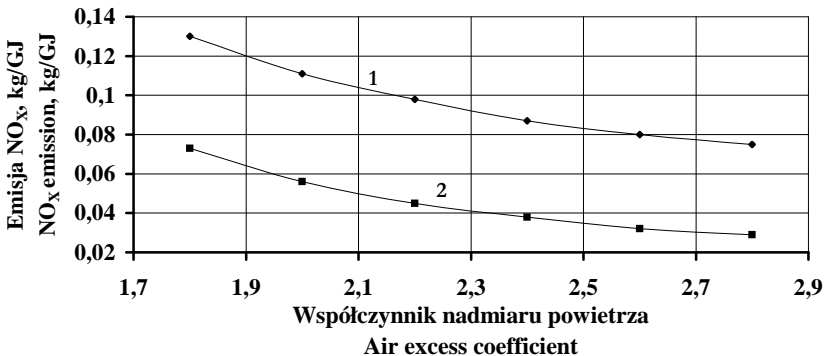
Fig. 2. Chamber pre-grate efficiency indexes depending on air excess coefficient: 1 – grate efficiency; 2 – heat losses through grate housing

Obniżenie obciążenia cieplnego obmurza istotnie zwiększa czas jego użytkowania. Krzywa 2 na rys. 1 pokazuje, że przy $\alpha_p > 2,0$ nawet w paleniskach komorowych maksymalna temperatura obmurza nie przekracza 1300°C (właśnie ten poziom uważany jest za dopuszczalny dla szamotu). Dane rys. 3 charakteryzują równocześnie wskaźniki sprawności paleniska i długotrwałości eksploatacji obmurza przy wysokich α .



Rys. 3. Zależność sprawności paleniska komorowego od czasu eksploatacji: 1 – przy $\alpha = 1,6$ i $q_v = 465 \text{ kW/m}^3$; 2 – przy $\alpha = 2,3$ i $q_v = 490 \text{ kW/m}^3$

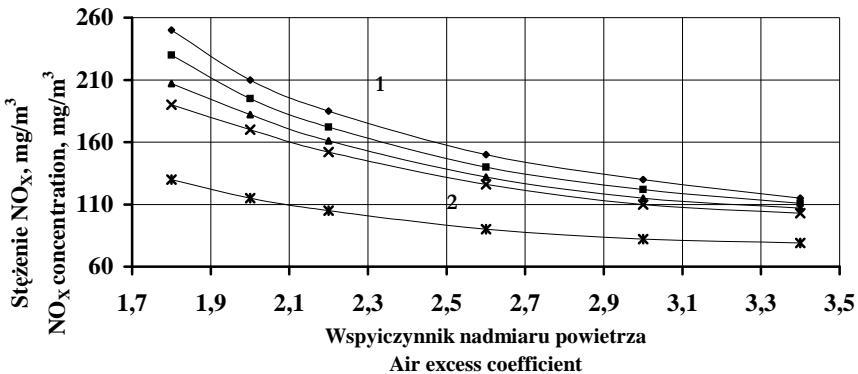
Fig. 3. Dependence of chamber grate efficiency on exploitation time: 1 – at $\alpha = 1,6$ & $q_v = 465 \text{ kW/m}^3$; 2 – at $\alpha = 2,3$ & $q_v = 490 \text{ kW/m}^3$



Rys. 4. Jednostkowa emisja NO_x w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza: 1 – palenisko komorowe; 2 – palenisko cylindryczne autorskiej konstrukcji

Fig. 4. Unit NO_x emission depending on air excess coefficient: 1 – chamber grate; 2 – cylindrical grate of author's design

Poza tym spalanie paliwa przy wysokim nadmiarze powietrza jest prostym i efektywnym sposobem na zdławienie powstawania NO_x według „termicznego” mechanizmu (patrz rys. 4) [2]. Samo przejście na doprowadzanie całego strumienia powietrza bezpośrednio do palnika zapewnia zmniejszenie emisji NO_x o 35÷50%. Dowolne polepszenie zmieszania w płomieniu przy podwyższonych α przyczynia się do obniżenia temperatury w strefach intensywnej generacji tlenków azotu i do zmniejszania emisji NO_x . Na rys. 5 zostały uporządkowane dane doświadczalnych badań dotyczących wpływu charakterystyk zmieszania w płomieniu na stężenie NO_x w spalinach. Z wykresów wyraźnie widać, że doprowadzanie 10÷15% powietrza do wewnętrznego łopatkowego zawirowywacza palnika (tzw. „pierwotne” powietrze) zmniejsza emisję NO_x o 10÷15%, a zastosowanie w konstrukcji planików ze złożonym osiowo-poprzecznym wpływem gazu – o 6÷8% przy niezmiennych innych warunkach.



Rys. 5. Wpływ warunków zmieszania na stężenie NO_x w spalinach (mg/m^3 , $\text{O}_2 = 0\%$): 1 – palnik osiowy, 0% powietrza pierwotnego; 2 – palnik osiowo-poprzeczny, 0% powietrza pierwotnego; 3 – palnik osiowy, 10÷15% powietrza pierwotnego; 4 – palnik osiowo-poprzeczny 10÷15% powietrza pierwotnego (1 do 4 – przedpalenisko komorowe, $q_v = 0,48 \text{ MW}/\text{m}^3$); 5 – palenisko konstrukcji autora, $q_v = 2,38 \text{ MW}/\text{m}^3$

Fig. 5. Influence of mixing conditions on NO_x concentration in flue gas (mg/m^3 , $\text{O}_2 = 0\%$): 1 – axial burner, 0% of primary air; 2 – axial-cross burner, 0% of primary air; 3 – axial burner, 10÷15% of primary air; 2 – axial-cross burner, 10÷15% of primary air (1 to 4 – chamber grate, $q_v = 0,48 \text{ MW}/\text{m}^3$); 5 – grate of author's design, $q_v = 2,38 \text{ MW}/\text{m}^3$

4. Konstrukcyjne udoskonalanie przedpalenisk

Analiza doświadczalnych danych spalania gazu przy wysokich α udowadnia, że za pomocą specjalnych palników można spalać paliwo przy objętościowej gęstości strumienia ciepła do $3\div 4 \text{ MW/m}^3$, jak też przy wysokim stopniu ściśnięcia płomienia D_{ekw}/d do 5,0, gdzie D_{ekw} – ekwiwalentna średnica komory paleniska, d - rozmiar charakterystyczny (ze względu na dokładnie opisywanie aerodynamiki płomienia autor w tym przypadku przyjął jako d średnicę pierścienia dysz gazowych palnika skierowanych wzdłuż jego osi).

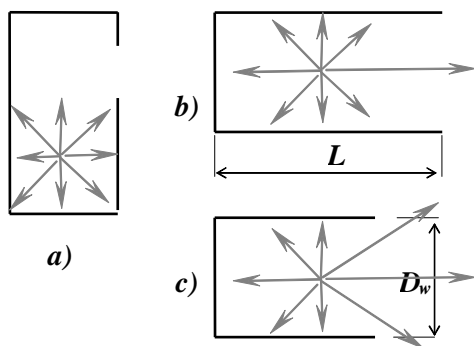
Przy takiej intensyfikacji procesu spalania długość płomienia zbadanych palników zmniejsza się z $2,0\div 2,5 \text{ m}$ do $1,5\div 1,6 \text{ m}$, co daje unikatowe możliwości w sprawie opracowania bardziej kompaktowych palenisk. Dodatkowym czynnikiem obniżenia temperatury w przestrzeni paleniska okazał się wcześniej nie brany pod uwagę efekt odprowadzenia ciepła przez promieniowanie z objętości paleniska do roboczej przestrzeni pieca.

W przedpaleniskach komorowych wymiana ciepła przez promieniowanie jest bardzo zbliżona do modelu ciała doskonale czarnego. W kompaktowych przedpaleniskach o specjalnej konstrukcji wypromieniowanie w sposób istotny wpływa na temperaturę płomienia. W celu uwzględnienia tego zjawiska autor wprowadził pojęcie **stopnia otwartości przestrzeni paleniska** (rys. 6), charakteryzujące wpływ wypromieniowania na ogólny przebieg procesów wymiany ciepła w urządzeniach niemających technologicznego odprowadzenia ciepła. Dla przedpalenisk cylindrycznych ten wskaźnik określa się ze wzoru:

$$K_o = k_g \left(1 - \frac{F_p - F_w}{F_p} \right), \quad (1)$$

gdzie:

- F_p – powierzchnia pola przekroju komory paleniska;
- F_w – powierzchnia pola przekroju wylotowego otworu paleniska;
- k_g – korygujący współczynnik głębokości komory spalania.



Rys. 6. Pojęcie stopnia otwartości przestrzeni przedpaleniska: a – palenisko zamknięte; b – półotwarte; c – otwarte

Fig. 6. Concept of a pre-grate space openness degree: a – closed grate; b – semi-opened; c – opened

W zależności od stosunku średnicy otworu wylotowego i długości przedpaleniska cylindrycznego D_w/L ten współczynnik określa się w następujący sposób:

$$k_g = 1,0, \text{ jeśli } \frac{D_w}{L} \geq 0,75 \quad (2)$$

$$k_g = \sqrt[3]{1,33 \frac{D_w}{L}}, \text{ jeśli } \frac{D_w}{L} < 0,75 \quad (3)$$

5. Matematyczne opisywanie charakterystyk procesu paleniskowego

A.M. Gurwicz opracował prosty i wygodny wzór do opisywania profilu temperaturowego w ekranowanej przestrzeni palenisk kotłów parowych [6]:

$$\Theta^4 = e^{-mX} - e^{-nX}, \quad (4)$$

gdzie:

- $\Theta = T_{sr}/T_t$ – temperatura bezwymiarowa (stosunek średniej w przekroju i teoretycznej temperatury spalania);
- X – względna współrzędna (względna długość) płomienia;
- m i n – mnożniki empiryczne.

Na skutek braku odprowadzenia ciepła w przedpaleniskach nie ma charakterystycznego spadku krzywej temperaturowej po osiągnięciu maksimum. To nie pozwala stosować wzoru (4) w przypadku przedpalenisk. Autor w [1] założył, że w warunkach przedpaleniska z obmurzem ognioodpornym, gdy

średnia temperatura ścianek jest bliska średniej temperatury płomienia, profil temperaturowy wyznacza się nie promieniowaniem a konwekcyjną wymianą ciepła. Najpierw temperatura rośnie w wyniku wydzielania ciepła spalania paliwa, a potem – na skutek konwekcyjnej wymiany ciepła z nadmiarem powietrza. Zakręcony strumień tego powietrza przepływa wzdłuż ścianek paleniska i zachowuje swoje odosobnienie aerodynamiczne aż do wartości $X = 0,4 \div 0,5$.

Zatem można stwierdzić, że temperaturowy obraz płomienia powinien być opisywany nie czwartą, lecz pierwszą potęgą temperatury bezwymiarowej, co było udowodnione w sposób doświadczalny. Poza tym jako poziom odniesienia przez autora była przyjęta nie teoretyczna, a rzeczywista maksymalna temperatura płomienia:

$$\Theta = T_{sr} / T_{max} \quad (5)$$

Charakterystyczny profil temperaturowy w przedpaleniskach może teraz być opisany z wysokim stopniem wiarygodności za pomocą wzoru:

$$\Theta = A(e^{-mX} - Be^{-nX}), \quad (6)$$

skąd łatwo można wyprowadzić następujące główne integralne charakterystyki procesu spalania paliwa:

- ✓ średnią względną temperaturę w przestrzeni paleniska:

$$\bar{\Theta} = \int_0^1 \Theta dX = A \left(\frac{B}{n} e^{-n} - \frac{1}{n} e^{-m} + \frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right) \quad (7)$$

- ✓ współrzędną maksimum temperatury:

$$X_{max} = \frac{(\ln m - \ln n - \ln B)}{m - n} \quad (8)$$

- ✓ początkową względną temperaturę czynnika suszącego na wylocie z paleniska (przy $X=1$)

$$\Theta_{wyl.} = A(e^{-m} - Be^{-n}) \quad (9)$$

Dla przedpaleniska konstrukcji autora (przy $\alpha = 1,5 \div 3,0$, średnim obciążeniu cieplnym 70%, i stopniu ściśnięcia płomienia $D_{ekw}/d = 8,0$) otrzymano następujące przedziały wartości stałych: $A = 1,40 \div 1,15$; $B = 0,85 \div 1,0$; $m = 0,45 \div 0,60$; $n = 4 \div 5$; $T_{max} = 1,1 \cdot T_t$ (teoretyczną temperaturę należy określać przy współczynniku nadmiaru powietrza doprowadzanego do palnika).

Wyżej wymienione wartości stałych można łatwo uściślić ze wzoru (9), ponieważ temperatura spalin na wylocie z paleniska z reguły jest wiadoma.

6. Wnioski

Przedpaleniska pieców są osobnym rodzajem urządzeń techniki cieplej, ponieważ nie następuje w nich użyteczne odprowadzenie ciepła. Powoduje to krótki czas użytkowania przedpalenisk i wysoką emisję tlenków azotu.

Metoda spalania paliwa z wysokim nadmiarem powietrza jest efektywnym sposobem podwyższenia sprawności i ekologicznych wskaźników zużycia paliwa w urządzeniach tego typu, pozwala również na zmniejszenie rozmiarów przedpalenisk i odpowiednio nakładów inwestycyjnych, radykalnie zwiększa czas ich użytkowania.

Literatura

1. **Szkarowski A.L.:** *Podwyższenie efektywności ochrony atmosfery przy spalaniu paliwa gazowego i ciekłego*. Autoreferat rozprawy habilitacyjnej. Sankt-Petersburg, 1997.
2. **Wolikow A.N., Szkarowski A.L.:** *Metody zdławienia emisji tlenków azotu przy spalaniu gazu i mazutu w kotłach o małej i średniej mocy*. Moskwa. Wyd. IRC Gazprom, 1993.
3. **Szkarowski A.:** *Technologia redukcji emisji NO_x metodą dozowanego skierowanego balastowania płomienia*. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 3. – Koszalin, Polska, s. 51-73, 2001.
4. **Szkarowski A.:** *Interrelation of a global and local level of analysis in environment protection for countries under development*. ISWA 2002. Appropriate Environmental and Solid Waste Managements and Technologies for Developing Countries. Proceeding of the ISWA World Environment Congress & Exhibition. Istanbul – Turkey, p. 115-120, 2002.
5. **Szkarowski A.:** *Ocena współczesnych tendencji zanieczyszczenia środowiska naturalnego*. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 1. – Koszalin, Polska, s. 137-142, 1999.
6. **Gurwicz A.M., Błoch A.G.:** *O temperaturze przestrzeni paleniskowej*. Energomašzynostrojenije, Moskwa, 1956, Nr 7, s. 11-15

Detailed Problems of the Effective and Ecologically Clean Combustion of Fuel in the Pre-grates of the Furnaces

Abstract

One of the most common industrial thermal processes is drying or heating diverse materials in the rotary drum furnaces. The combustion of fuel in such furnaces is accomplished by using pre-grates (extension).

The high-temperature combustion of fuel in devices without useful heat withdrawal under the conditions of the high vibration loadings results in transitoriness of the grate brick lining. For the same there is high emission of nitrogen oxides and heightened heat losses.

This paper presents the results of studies of the simple and technologically effective solution, which solves this problem. Such solution is a decrease of the overall temperature level of burning process due to supply of a maximum possible quantity of air both for the fuel combustion and for the dilution of combustion products directly into the burners.

The use of burners with the extended regulation possibilities makes possible to prepare the drying agent with the temperature of 500-1100°C directly in the furnace. This simultaneously allows:

- to increase the effectiveness of the use of the fuel as a result of the heat losses reduction;
- to decrease the size and the material consumption of furnaces and to simplify its construction;
- to ensure the permissible temperature working level of brick lining and its longevity.

A change in the characteristics of burning process with the high air excess is shown in Fig. 1. Fig. 2 and Fig. 3 demonstrate the appropriate increase of efficiency in grates and the period of its service.

Combustion of fuel with the high air excess is the simple and efficient method of the suppression of nitrogen oxides (NO_x) formation by the “thermal” mechanism. The supply of entire air through the burner ensures reduction of NO_x emission up to 35÷50%. The results of studies on NO_x emission are generalized in Fig. 4 and Fig. 5.

In the chamber grates the radiation heat exchange comes nearer to a model of blackbody. In the compact grates radiant heat emission substantially influences the temperature of flame. To consider this factor the author proposed the concept of **the pre-grate openness degree** (formula 1-3). Author proposed also mathematical model allowing to describe the most important temperature characteristics of burning process (formula 4-9) in the external grates.