Seria: ENERGETYKA z. 120

Nr kol. 1260

Zbigniew BIS, Władysław GAJEWSKI Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Czestochowska Henryk RADOMIAK Katedra Pieców Przemysłowych, Politechnika Częstochowska

SPALANIE ODOSOBNIONEGO ZIARNA WEGLA W CYRKULACYJNEJ WARSTWIE FLUIDALNEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań spalania odosobnionego ziarna węgla w warunkach zbliżonych do cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.

COMBUSTION OF A SINGLE COAL PARTICLE IN A CFB

Summary. The experimental results of combustion of a single coal particle in conditions similar to those in a CFB were presented. It was found that the combustion process of coal particles increases when compare with combustion in pure air.

VERBRENNUNG DES VEREINZELTEN KOHLEKORNS IN DER ZWSF

Zusammenfassung. In der Arbeit sind die Verbrennungsergebnisse des vereinzelten Kohlenkorns in Bedingungen angenäherten dem zirkullieenden Fluidalbett vorgestellt.

1. WSTEP

Zastosowanie cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej (CWF) do spalania różnego rodzaju paliw pozwoliło rozwiązać wiele problemów dotyczących ochrony środowiska oraz podnieść wydajność i efektywność kotła. Struktura przepływu w CWF charakteryzuje się występowaniem cyrkulacyjnego przepływu ziaren materiału sypkiego w układzie komora spalania, "goracy cyklon", układ nawrotu, komora spalania. Na ten cyrkulacyjny przepływ nakłada się chaotyczny ruch ziaren i ich aglomeratów wynikający m.in. ze zmiennej koncentracji materiału sypkiego w przestrzeni komory spalania.

Niniejsza praca stanowi podsumowanie pewnego etapu prac nad poznaniem mechanizmu i kinetyki spalania ziaren węgla w warunkach CWF.

2. WARUNKI SPALANIA ODOSOBNIONEGO ZIARNA WĘGLA W CWF

Kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną można podzielić na dwie grupy:

- kotły z CWF utworzoną z ziaren materiału sypkiego o wąskim przedziale średnic,
- kotły z CWF utworzoną z ziaren materiału sypkiego o szerokim składzie frakcyjnym.

Pierwszą grupę reprezentują np. kotły Pyropower, drugą zaś kotły MSFB (Multi Solid Fluidized Bed) [3, 5]. Te ostatnie wyróżniają się dodatkiem do warstwy ceramicznych kul o średnicy $10 \div 15$ mm. Do palenisk tego rodzaju kotłów mogą być wprowadzane ziarna węgla o średnicy do 50 mm. Cyrkulujący drobny materiał inertny ma średnice ziaren mieszczące się w przedziale $50 \div 500 \mu$ m. Tworząca się w tych warunkach w dolnej części paleniska gęsta warstwa stanowi mieszaninę wszystkich wymienionych rodzajów ziaren. Jej obecność przyczynia się do poprawy stabilności procesu spalania oraz wydłuża czas pobytu drobnych ziaren węgla w komorze spalania.

Wszystkie konstrukcje kotłów cechuje cyrkulacyjny przepływ fazy stałej, łącznie z płonącymi ziarnami węgla, które wchodząc do układu nawrotu, wskutek braku tlenu oraz ewentualnego schłodzenia [5] przerwą proces spalania, by następnie, po powtórnym wejściu do komory spalania, ponownie go kontynuować. Ten cyrkulacyjny ruch ziarna węgla powoduje, że proces jego spalania przybiera cechy procesu cyklicznego, polegającego na wielokrotnym jego nagrzewaniu, zapalaniu, chłodzeniu i gaszeniu. Cyrkulacyjny przepływ ziaren inertnego materiału sypkiego zmienia także warunki ruchu "grubych" ziaren węgla wprowadzanych do paleniska [1, 2, 5, 7], co wykorzystano w konstrukcji kotłów MSFB. Wzajemne zderzenia obu frakcji – płonących ziaren węgla i drobnych ziaren materiału inertnego – sprzyjają z jednej strony poprawie warunków wymiany ciepła pomiędzy ziarnem węgla a jego otoczeniem [6], z drugiej zaś zmieniają jego prędkość unoszenia na tyle, że poddaje się ono cyrkulacyjnemu przepływowi całej masy materiału sypkiego i łatwiej rozpada się na drobniejsze frakcje.

Niewątpliwie te wyspecyfikowane wyżej czynniki nie pozostają bez wpływu na przebieg procesu spalania. Ocenie wpływu tych czynników na proces spalania ziarna węgla poświęcono opisane dalej badania.

48

3. SPALANIE ODOSOBNIONEGO ZIARNA WĘGLA W STRUMIENIU POWIETRZA UNOSZĄCEGO DROBNE ZIARNA MATERIAŁU INERTNEGO

Zasadniczym celem tej części badań było określenie wpływu na proces spalania ziarna węgla, warunków fizycznych występujących podczas jego opływu strumieniem dwufazowym (powietrze + drobne ziarna materiału inertnego). Badania te podzielono na trzy zasadnicze etapy:

1) spalanie w strumieniu czystego powietrza,

2) spalanie w strumieniu powietrza unoszącego ziarna materiału inertnego,

3) spalanie z cyklicznym nagrzewaniem i chłodzeniem ziarna.

Stanowisko badawcze i metodyka badań zostały szczegółowo opisane w pracy [5]. Rozmiar ziaren węgla użytych w badaniach mieścił się w przedziale d_c = 0,006 \div 0,01 m i masach m_0 = $3\cdot10^{-4}$ \div 6 $\cdot10^{-4}$ kg. Średnią prędkość przepływu powietrza utrzymywano w zakresie 9,4 \div 9,8 m/s. Jako materiału inertnego użyto piasku kwarcowego o średniej średnicy d_f = $184\cdot10^{-6}$ m. Jednostkowy strumień masy cyrkulującego piasku wynosił G_s = 62 kg/(m²s).

Spalany węgiel cechowały następujące parametry:

- wartość opałowa 31000 kJ/kg,
- zawartość części lotnych 31%,
- zawartość wilgoci 2,0%,
- zawartość węgla 59,5%.

Badania rozpoczęto od spalania ziaren węgla w czystym powietrzu przepływającym z podaną wyżej prędkością. Przykładowy, typowy przebieg zmian masy płonącego ziarna oraz temperatury jego powierzchni przedstawia rys. 1. Dane podobne do tych, które prezentują rys. 1 i 2, zebrane dla innych rozmiarów ziaren, posłużyły jako odniesienie do porównania z podobnymi zależnościami uzyskanymi w przypadku spalania w strumieniu dwufazowym. Przykładowe przebiegi zmian masy i temperatury ziarna węgla spalanego w takich warunkach prezentuje rys. 2. Podobnie jak na rys. 1 można tu wyróżnić charakterystyczne etapy procesu spalania. Zasadnicza różnica dotyczy czasu trwania poszczególnych etapów, szybkości ubytku masy oraz wzrostu temperatury powierzchni ziarna. Na rys. 3 zestawiono ze sobą przebiegi zmian ubytku masy podobnych ziaren węgla spalanych w strumieniu czystego powietrza (linia 1) oraz strumieniu dwufazowym (linia 2), natomiast rys. 4 prezentuje podobne zestawienie dla temperatur powierzchni obu ziaren.

Porównanie to wykazuje zróżnicowany przebieg odpowiednich zależności w różnych etapach procesu spalania. Nagrzewanie, zapłon i utrata masy wskutek wychodzenia części lotnych następuje wyraźnie szybciej w strumieniu dwufazowym. Jest to skutek zdecydowanie wyższej szybkości nagrzewania ziarna w tych warunkach. Według pracy [6] współczynnik przejmowania ciepła przy opływie ciał strumieniem dwufazowym wzrasta nawet o rząd



Rys. 1. Spalanie ziarna węgla w strumieniu powietrza: a) ubytek masy, b) temperatura powierzchni. I – nagrzewanie i zapłon, II – spalanie części lotnych, III – spalanie pozostałości koksowej

Fig. 1. Coal combustion in air flow: a) mass loss, b) surface temperature. I – heating and ignition, II – volatile matter combustion, III – coke combustion



Rys. 2. Spalanie ziarna węgla w strumieniu powietrza unoszącego drobne ziarna materiału sypkiego: a) ubytek masy, b) temperatura powierzchni. I – nagrzewanie i zapłon, II – spalanie części lotnych, III – spalanie pozostałości koksowej, IV – rozpad ziarna

Fig. 2. Combustion of a coal particle in air transporting inert particles: a) mass loss, b) surface temperature. I – heating and ignition, II – volatile matter combustion, III – coke combustion, IV – fragmentation of a coal particle



Rys. 3. Zmiany ubytku masy podczas spalania ziarna w strumieniu powietrza (linia 1) oraz w przepływie dwufazowym (linia 2)

Fig. 3. Changes of the mass loss in air (curve 1) and in two – phase flow (curve 2)

wielkości w porównaniu z przepływem czystego gazu. Jednak poprawa warunków wymiany ciepła powoduje także bardziej intensywny odbiór ciepła od płonącego ziarna, co powoduje, że jego temperatura wyraźnie obniża się w porównaniu do opływu czystym powietrzem (rys. 4). Niższa temperatura pozostałości koksowej to oczywiście dłuższy czas jej wypalanià się, co wyraźnie widoczne jest na rys. 3.

Należy także podkreślić fakt często występującego zjawiska rozpadu ziarna węgla spalanego w strumieniu dwufazowym. Najprawdopodobniej jest to skutek oddziaływania na płonące ziarna węgla dodatkowej siły wynikającej ze zmiany pędu uderzających w jego powierzchnię drobnych ziaren materiału inertnego [5].

Ostatnia część badań, szczegółowo opisanych w pracy [5], poświęcona była spalaniu ziarna węgla w warunkach cyklicznego nagrzewania i chłodzenia. Realizacja takiego procesu polegała na naprzemiennym wprowadzaniu ziarna węgla do komory spalania na okres 8 + 10 s, po czym ziarno wyprowadzano z komory i gaszono w strumieniu CO₂ przez ten sam okres. Przebieg zmian



Rys. 4. Zmiany temperatury powierzchni ziarna spalanego w strumieniu powietrza (linia 1) oraz strumieniu dwufazowym (linia 2)

Fig. 4. Changes of the particle surface temperature in air (curve 1) and in two – phase flow (curve 2)

masy ziarna węgla spalanego w takich warunkach oraz temperatury jego powierzchni przedstawia rys. 5. Należy zwrócić uwagę na fakt, że poza pierwszym cyklem, w pozostałych ziarno nie było schładzane do temperatury otoczenia. Maksymalna wartość amplitudy zmian temperatury powierzchni ziarna wynosiła $T_{max} - T_{min} \equiv 400$ K. Taki charakter zmian temperatury powierzchni ziarna powodował, że w okresie wychodzenia i spalania części lotnych masa ziarna stale zmniejszała się mimo gaszenia ziarna. Dopiero w okresie spalania pozostałości koksowej przerwy w ubytku masy pokrywają się z okresami gaszenia.

Aby ocenić dynamikę ubytku masy ziarna spalanego w tych warunkach, dokonano porównania widocznego na rys. 6. Do tego zestawienia wybrano tylko zmiany masy w tych okresach, gdy ziarno przebywało w komorze spalania (tzw. efektywne spalanie). Zestawienie to wykazuje, że periodyczny proces spalania przyspiesza proces wychodzenia części lotnych (nie oznacza to ich spalania). Wskutek średnio obniżonej temperatury ziarna (rys. 7), będącej następstwem każdorazowego nagrzewania po uprzednim chłodzeniu, całkowity czas spalania ulega wydłużeniu.



Rys. 5. Spalanie ziarna węgla w warunkach cyklicznego nagrzewania i chłodzenia (H–nagrzewanie, C–chłodzenie)

Fig. 5. Periodical combustion of a single coal particle (H-heating, C-caoling)



Rys. 6. Porównanie warunków spalania ciągłego (linia 1) i cyklicznego (linia 2). Zmiana ubytku masy

Fig. 6. Comparison of combustion conditions in the continuous (curve 1) and the intermittent process (curve 2). Changes of mass loss

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz analiza ich wyników pozwalają sformułować następujące wnioski:

- 1) Czas nagrzewania ziaren węgla w warunkach opływu gorącym strumieniem dwufazowym ulega skróceniu co najmniej o połowę w porównaniu ze spalaniem w strumieniu czystego powietrza.
- Obecność drobnych ziaren materiału inertnego zmienia temperaturę zapłonu ziarna węgla, która mieściła się w przedziale 973 ÷ 1020 K. Zaobserwowano niewielki wzrost temperatury zapłonu w przypadku strumienia dwufazowego.
- 3) W początkowym okresie wychodzenia i spalania części lotnych szybkość ubytku masy ziarna węgla podczas opływu strumieniem dwufazowym jest wyraźnie wyższa. Jednakże wskutek bardziej intensywnego chłodzenia ziarna w trakcie spalania pozostałości koksowej szybkość jego wypalania



Rys. 7. Porównanie warunków spalania ciągłego (linia 1) i cyklicznego (linia 2). Zmiana temperatury powierzchni ziarna

Fig. 7. Comparison of combustion conditions in the continuous (curve 1) and intermittent process (curve 2). Changes of the particle surface temperature

się w tym okresie wyraźnie obniża się, co prowadzi do wydłużenia całkowitego czasu spalania.

- 4) Temperatura powierzchni ziarna podczas jego spalania w strumieniu dwufazowym jest co najmniej o 200 – 250 K niższa w porównaniu ze spalaniem w czystym powietrzu. Maksymalna nadwyżka temperatury ziarna ponad temperaturę otoczenia wynosiła:
 - 400 ÷ 450 K podczas spalania w czystym powietrzu,
 - 150 ÷ 200 K podczas spalania w strumieniu dwufazowym.
- 5) Niższa temperatura powoduje obniżenie szybkości spalania pozostałości koksowej zarówno w ciągłym, jak też cyklicznym procesie spalania ziarna węgla, co prowadzi ostatecznie do wydłużenia czasu jego wypalania się w porównaniu ze spalaniem w czystym powietrzu.

LITERATURA

- Arastopour A., Wang Ch.H., Weil S.A.: Particle Particle Interaction Force in a Dilute Gas – Solid System. Chem. Engng. Sci. 37, 9p. 1379, 1982.
- [2] Bis Z.: Aerodynamika cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. Monografia 21, Politechnika Częstochowska, 1991.
- [3] Bis Z., Gajewski W., Nowak W.: CFB Combustion and Hydrodynamic Modelling. Proc. 2nd International INTERFLUID WORKSHOP, Nagoya (Japan) 1994.
- [4] Chakaborty R.K., Howard J.R.: Carbon Combustion Rates and Temperatures in Schallow Fluidized Beds. Chem.Eng. Commun. 4, 705, 1980.
- [5] Gajewski W. i in.: Badania kinetyki spalania ziaren wegla w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej. Sprawozdanie z pracy BS-03-302/91, Częstochowa 1994.
- [6] Linjewile T.M., Agarwal K.P.: Heat Transfer Behaviour and Temperatures of Freely Moveing Burning Carbonaceons Particles in Fluidized Beds. Twenty-Third Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute p. 917-925, 1990.
- [7] Satija S., Fan L.S.: Terminal Velocity of Dense Particles in the Multisolid Pneumatic Transport Bed. Chem. Engng. Sci. vol. 40, 2, p. 259, 1985.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji 10. 08. 1994 r.

Abstract

The experimental results of combustion of a single coal particle in conditions similar to those in CFB were presented.

The specific feature of a CFB combustion process is:

- inert fine particles flow around a burnig particle,
- periodic process of heating and cooling of a coal particle due to its circulation in the CFB system.

The changes of mass loss and surface temperature of burnig coal particle were registered. The results were compared with those obtained in pure air under the same flow conditions.

It was found that the combustion process of coal particles in the CFB increases when compare with combustion in air.