

Zbigniew LORKIEWICZ

Jerzy TOMECZEK

Instytut Energetyki Paliwowej

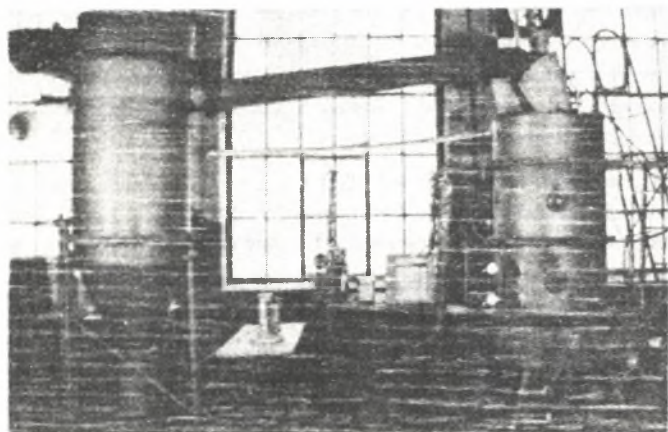
MECHANIZM SPALANIA WĘGLA I WIĄZANIA SIARKI W WARSTWIE FLUIDALNEJ
Z ZANURZONYM WYMIENNIKIEM CIEPŁA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań procesu spalania, odsiarczania i wymiany ciepła w palenisku fluidalnym. Badanie prowadzono na stanowisku o wydajności 50 kg/h węgla przy jego ziarnistości do 6 mm.

1. Wstęp

Struktura warstwy fluidalnej i jej rozmiary zależne są od intensywności generacji ciepła oraz jego odbioru przez wymiennik ciepła. Opis zjawisk zachodzących w palącej się warstwie fluidalnej wymaga znajomości stałych kinetycznych reakcji chemicznych oraz współczynników wnikania ciepła między warstwą i wymiennikiem ciepła oraz między fazą stałą i gazową warstwy.

Charakter i ilość ukazujących się informacji na temat spalania węgla w warstwie fluidalnej świadczy o wadze problematyki badawczej [2, 6, 7, 8, 9]. Publikowane dane są rozbieżne, jednak ostatnio pojawiają się już prace syntetyczne oraz próby uporządkowania niektórych zagadnień.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze Instytutu Energetyki Paliwowej zostało zbudowane w celu zebrania szerokiej informacji o kinetyce reakcji chemicznych i przekazywania ciepła w warunkach zbliżonych do półtechnicznych. Rys. 1 przedstawia fragment laboratorium z fluidalną komorą spalania. Wymiary komory są następujące: średnica wewnętrzna 500 mm, wysokość 1600 mm, średnica rusztu 100 mm. Komora wyposażona jest w dwa wymienniki ciepła: poziomy i pionowy. Wymiennik poziomy usytuowany jest w warstwie fluidalnej, natomiast pionowy zanurzony jest częściowo.

Ważniejsze oznaczenia:

A	- pole przekroju poprzecznego warstwy, m^2 ,
H	- wysokość warstwy, m,
a_r	- jednostkowa powierzchnia reakcji spalania, m^2/kg ,
c_{O_2}	- molowa koncentracja tlenu, $kmol/m^3$,
$k_{ef}, k_{ef,s}$	- stała szybkości reakcji spalania i wiązania tlenków siarki, m/s,
\dot{n}	- molowy strumień czynnika fluidyzującego, $kmol/s$,
ξ	- porowatpść warstwy,
ρ_w	- gęstość węgla w warstwie, kg/m^3 .

2. Spalanie węgla

Proces spalania ma złożony charakter z powodu skomplikowanej struktury fizykochemicznej węgla oraz złożoności zjawisk aerodynamicznych w warstwie fluidalnej. Zachodzą w niej nierozłączne procesy podgrzewania, suszenia, odgazowania, zgazowania oraz spalania ziaren węgla i lotnych produktów odgazowania i zgazowania. Dominującym procesem decydującym o intensywności procesu spalania jest spalanie ziaren węgla. Jest to typowy proces heterogeniczny. Mechanizm takiego procesu można przedstawić za pomocą trzech procesów cząstkowych [10]:

- dyfuzja tlenu do powierzchni reakcji,
- właściwa reakcja chemiczna między tlenem i węglem,
- dyfuzja produktów reakcji z powierzchni reakcji do fazy gazowej.

Szybkość reakcji heterogenicznej zależy od szybkości najpowolniejszego procesu cząstkowego. Szybkość ta uwarunkowana jest rodzajem reakcji, rozkładem temperatur w granicznej warstwie ziarna węgla, lokalnymi warunkami wymiany ciepła i masy itp.

Próba ilościowego opisu procesu spalania węgla w warstwie wymaga przyjęcia założeń upraszczających, prowadzących do stworzenia procesu modelo-

wego. Porównanie szybkości reakcji chemicznych w warstwie fluidalnej oraz szybkości dyfuzji tlenu między ziarnem i fazą gazową wskazuje, że w temperaturze warstwy fluidalnej (około 900°C) proces jest typu kinetycznego, zaś dominującą jest reakcja: $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ [8]. Celem sformułowania modelu procesu przyjęto następujące założenia:

- spalanie węgla kamiennego traktuje się jako prostą reakcję heterogeniczną $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$, która w odniesieniu do tlenu jest reakcją pierwszego rzędu,
- temperatura warstwy jest wyrównana, $T = \text{idem}$,
- warstwę charakteryzują wielkości średnie: $\varepsilon = \text{idem}$, $\rho_w = \text{idem}$, $\dot{n} = \text{idem}$, $p = \text{idem}$,
- zagadnienie jest jednowymiarowe.

O intensywności spalania decyduje intensywność zużycia tlenu. Dla warstwy o wysokości dH zawierającej dm węgla, molowy strumień tlenu dn_{O_2} zużyty do spalania określa równanie:

$$\begin{aligned} \dot{dn}_{O_2} &= k_{ef} \cdot a_r \cdot c_{O_2} \cdot dm = \\ &= k_{ef} \cdot a_r \cdot c_{O_2} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_w \cdot A \cdot dH \end{aligned} \quad (1)$$

Wyrażając strumień tlenu poprzez koncentrację:

$$\dot{dn}_{O_2} = -\dot{V} dc_{O_2} = -\frac{\dot{n}(MR) T}{p} dc_{O_2} \quad (2)$$

otrzymuje się równanie różniczkowe, którego rozwiązaniem dla procesu modelowego jest zależność:

$$\ln c_{O_2} = -\frac{k_{ef} \cdot \delta}{\dot{n} \cdot T} \cdot H + C, \quad (3)$$

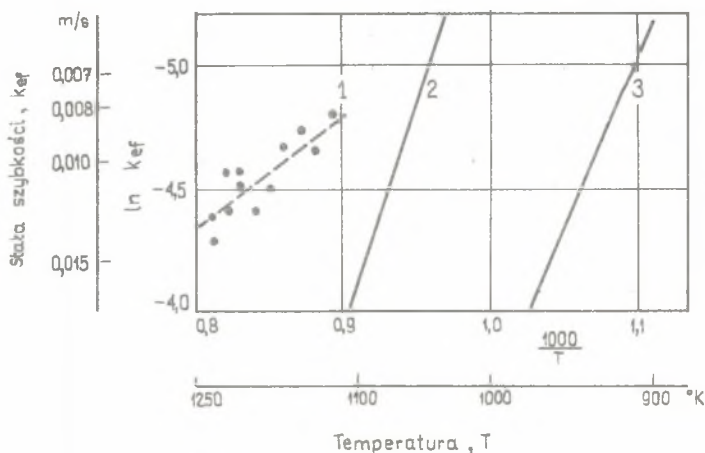
gdzie:

$$\delta = \frac{1}{(MR)} \cdot p \cdot a_r \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_w \cdot A_z \quad (4)$$

Stałą całkowania C otrzymuje się z warunku brzegowego $c_{O_2} = c_{O_2}^*$ dla $H = 0$. Mamy więc:

$$c_{O_2} = c_{O_2}^* \cdot \exp\left(-\frac{k_{ef} \cdot \delta}{\dot{n} \cdot T} \cdot H\right) \quad (5)$$

Równanie (5) wykorzystano do eksperymentalnego wyznaczenia stałej k_{ef} szybkości spalania węgla w warstwie fluidalnej. Na rysunku 2 przedstawiono wielkość k_{ef} na podstawie własnych wyników badań (prosta 1) oraz da-



Rys. 2. Stała szybkości reakcji modelowej spalania węgla:
1 - warstwa fluidalna, 2 i 3 - $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ według [3] i [4]

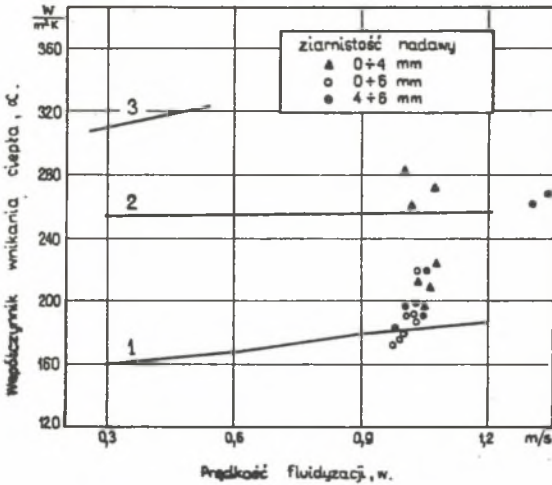
nych podanych w pracach [3] i [4] (proste 2 i 3). Stała k_{ef} otrzymana dla modelowej reakcji w warstwie fluidalnej nie przewyższa w zakresie temperatur występujących w warstwie wartości literaturowych uzyskanych dla procesu nie fluidalnego. Została ona uzyskana dla węgla kamiennego o ziarnistości 0 ± 6 mm, pochodzącego z jednej kopalni.

3. Badania eksperymentalne przekazywania ciepła oraz wiązania siarki

3.1. Współczynnik wnikania ciepła

Dotychczasowe badania pozwoliły określić współczynnik α wnikania ciepła od warstwy fluidalnej do wymiennika ciepła [5, 6, 9]. Z uwagi na trudności w oddzieleniu efektu konwekcyjnego i radiacyjnego przekazywania ciepła przyjęto powszechnie posługiwać się całkowitym współczynnikiem wnikania ciepła.

Przeprowadzono pomiary współczynnika wnikania ciepła dla poziomego wymiennika rurowego o średnicy 20 mm całkowicie zanurzonego w warstwie fluidalnej o temperaturze $850\pm 950^\circ\text{C}$. Rysunek 3 ilustruje wyniki badań własnych oraz obcych. Linie 1 i 2 wyznaczają obszar danych eksperymentalnych przedstawionych w pracy [7]. Użytkano je dla wymienników ciepła o średnicy rur 35 i 60 mm ułożonych w 2 do 8 rzędów. Linia 3 została wykreślona



Rys. 3. Współczynnik wnikania ciepła od warstwy fluidalnej do rury

1 - 35 mm [7], 2 - 60 mm [7], 3 - 9,6 mm [1]
 ▲ ○ ● - 20 mm (badania własne)

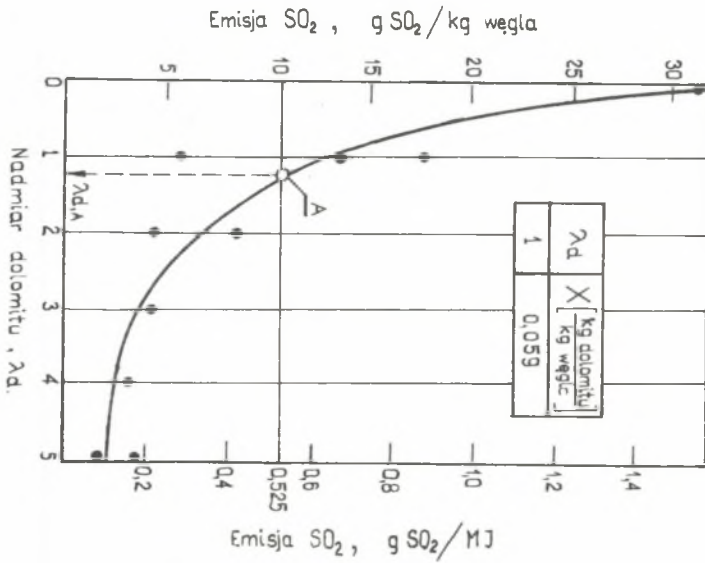
na podstawie równania opisującego wpływ prędkości fluidyzacji na współczynnik wnikania ciepła zamieszczonego w pracy [1]. Równanie to opracowano na podstawie eksperymentów dla węgla o ziarnistości poniżej 0,3 mm przy temperaturze warstwy fluidalnej 800°C i dla rury o średnicy wewnętrznej 9,6 mm. Natomiast punkty przedstawiają wyniki badań własnych.

Wyniki badań potwierdzają możliwość praktycznego uzyskania wysokich wartości współczynników α dla powierzchni ogrzewalnych, zanurzonych całkowicie w warstwie fluidalnej. Otrzymane wartości współczynników wnikania ciepła dla rury o średnicy 20 mm mieszczą się zasadniczo w przedziale wartości podanych przez Skinera [7].

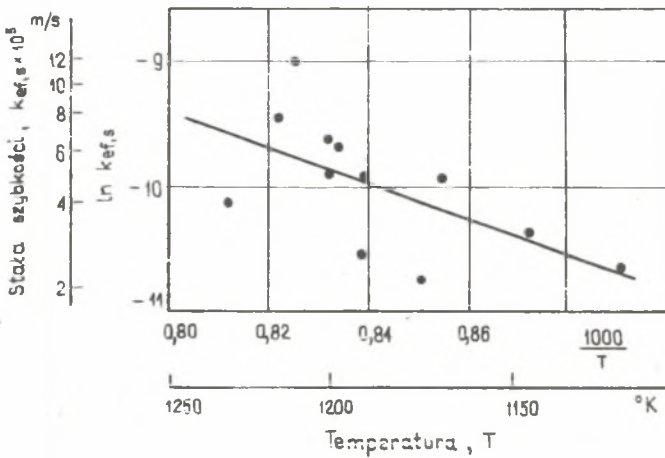
3.2. Wiązanie tlenków siarki

W przypadku spalania fluidalnego węgla stosuje się wiązanie tlenków siarki za pomocą związków wapnia i magnezu. Zostało to potwierdzone również własnymi badaniami eksperymentalnymi [6, 9]. Eksperymenty przeprowadzono z węglem kamiennym o wartości opałowej $W_d = 20,2$ MJ/kg i zawartości siarki całkowitej $s_c = 2,45\%$ oraz dolomitem prażonym zawierającym 56% CaO i 33% MgO. Ziarnistość węgla wynosiła od 0 do 6 mm, natomiast dolomitu $0,5 \pm 2$ mm. W warstwie fluidalnej utrzymywano temperaturę $850 \pm 960^\circ\text{C}$ oraz liczbę nadmiaru powietrza $\lambda = 1,1$.

Na rysunku 4 pokazano wpływ dodatku dolomitu na emisję tlenków siarki z fluidalnej komory spalania. Współrzędne punktu A wyznaczają dopuszczalną emisję SO_2 według norm amerykańskich w przypadku spalania węgla energetycznych oraz odpowiadający jej nadmiar dolomitu λ_{dA} .



Rys. 4. Emisja dwutlenku siarki z fluidalnej komory spalania



Rys. 5. Stała szybkości reakcji wiązania tlenków siarki za pomocą dolomitu prażonego

Wyniki obliczeń stałej $k_{ef,s}$ szybkości reakcji wiązania tlenków siarki za pomocą dolomitu prażonego przedstawiono na rysunku 5 [9]. W przyjętym układzie współrzędnych zależność stałej $k_{ef,s}$ od temperatury jest liniowa i określona zależnością używaną metodą najmniejszych kwadratów:

$$\ln k_{ef,s} = 1,768 - 13,978 \cdot \left(\frac{1000}{T}\right). \quad (6)$$

4. Uwagi końcowe

Podane wartości stałych szybkości reakcji spalania i wiązania tlenków siarki umożliwiają określenie geometrii warstwy fluidalnej oraz niezbędnego nadmiaru dolomitu dla uzyskania odpowiedniej skuteczności odsiarczania.

Przedstawione współczynniki wnikania ciepła potwierdzają dane literaturowe i wskazują na możliwość zmniejszenia powierzchni ogrzewalnych.

Odsiarczanie węgla podczas fluidalnego spalania odznacza się wysoką efektywnością wiązania tlenków siarki.

Wyznaczone stałe kinetyczne uzyskano dla jednostkowych powierzchni reakcji ziaren węgla $a_r = 2,05 \text{ m}^2/\text{kg}$ oraz $a_{r,s} = 474 \text{ m}^2/\text{kg}$ dla ziaren dolomitu. Wykorzystanie stałej $k_{ef,s}$ dla wyznaczenia nadmiaru dolomitu wymaga również przyjęcia czasu przebywania ziaren dolomitu w warstwie, jako równego czasowi przebywania ziaren węgla.

Badania fluidalnego spalania węgla są kontynuowane w Instytucie Energetyki Paliwowej w celu zebrania pełnej informacji o zjawiskach zachodzących w tym procesie.

LITERATURA

- [1] Botterill J., Whellock J.: Inżynieria-fizyczny żurnal, t.25,1973, nr 3.
- [2] Fluidised Combustion Conference, London, September 1975.
- [3] Frank-Kamieniecki D.A.: Diffuzja i ciepłopieredacza w chemiczkiej kinetyce, Nauka, Moskwa 1976.
- [4] Jesin O.A., Gield P.W.: Chemia fizyczna procesów pirometalurgicznych cz. I, Śląsk, Katowice 1966.
- [5] Lorkiewicz Z., Jastrząb Z.: V-th International Symposium on Combustion Processes, Kraków, September 1977.
- [6] Praca badawcza, Instytut Energetyki Paliwowej, Dąbrowa Górnicza, listopad 1977, nie publikowana.
- [7] Skinner D.: The Fluidised Combustion of Coal, London 1971, Mills and Boon Ltd.
- [8] Tomczek J., Remarczyk L.: Archiwum Termodynamiki i Spalania, vol. 7 1976, nr 1.

- [9] Tomczek J., Lorkiewicz Z. i inni: Gospodarka paliwami i energią 1977, nr 7.
- [10] Walas S.M.: Kinetyka reakcji, WNT, Warszawa 1963.

МЕХАНИЗМ СЖИГАНИЯ УГЛЯ И ЗАДЕРЖИВАНИЯ СЕРЫ
В ТОПКЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты исследований механизма сжигания угля, задерживания серы и коэффициента теплообмена в топке с псевдооживленным слоем. Исследования проведены на собственной экспериментальной установке с потреблением угля 50 кг/ч при его зернистости до 6 мм.

COAL COMBUSTION AND SULPHUR REMOVAL IN A FLUIDISED BED
WITH A SUBMERGED HEAT EXCHANGER

S u m m a r y

Experimental results of the combustion process, desulphurisation and heat transfer in a fluidised combustor are presented. A 50 kg/h coal fluidised combustor and coal of up to 6 mm size have been used.