

Zbigniew LORKIEWICZ

Wojciech MYŚLIWIEC

Instytut Energetyki Paliwowej

BADANIA CZASU SPALANIA WĘGLA KAMIENNEGO W WARSTWIE FLUIDALNEJ

Streszczenie. W pracy podano równanie kryterialne dla czasu spalania węgla w warstwie fluidalnej, wyznaczone metodą analizy wymiarowej. Przyjęto, że czas spalania jest równy czasowi przebywania ziaren węgla w warstwie o wysokości H . Na podstawie badań stwierdzono, że czas τ wynosi od 180 do 730 s. dla węgla kamiennego o ziarnistości $0,5+6$ mm, pochodzącego z jednej kopalni. Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym IEP o wydajności 50 kg węgla/h.

1. WSTĘP

Metodyka obliczania palenisk fluidalnych nie jest jeszcze wyczerpująco opracowana, ze względu na niepełne matematyczne poznanie procesów zachodzących podczas spalania węgla kamiennego w warstwie fluidalnej. Do określenia wymiarów geometrycznych paleniska może być przydatna znajomość czasu spalania węgla. Czas spalania węgla w warstwie fluidalnej zależy od warunków fluidyzacji, własności fizykochemicznych węgla, nadmiaru powietrza itd. Zależności występujące między tymi czynnikami, a czasem spalania mogą być określone na drodze analitycznej lub eksperymentalnej. Badania eksperymentalne czasu spalania węgla wykonano w Instytucie Energetyki Paliwowej na dużym stanowisku badawczym. Wyniki tych badań zaprezentowano w niniejszej pracy.

Czas spalania węgla, zwłaszcza w paleniskach pyłowych i rusztowych oraz w instalacjach doświadczalnych, jest przedmiotem publikacji [4], [5], [8], [9]. Prezentowane wyniki świadczą o dużym zaawansowaniu badań nad spalaniem węgla w strudze i na ruszcie. Dane na temat czasu spalania w warstwie fluidalnej można znaleźć w pracach [1], [2], [6], [7]. Większość tych informacji ma charakter opisowy lub dotyczy tylko określonych fluidalnych procesów modelowych.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- d - średnica zastępcza węgla, m,
- D - współczynnik dyfuzji, m^2/s ,
- H - wysokość warstwy fluidalnej, m,
- k - stała szybkości reakcji, m/s,

- w - średnia prędkość fluidyzacji wzdłuż wysokości H , m/s,
 W - liczba fluidyzacji,
 X - stopień wypalenia,
 φ - liczba kształtu,
 ρ_w - gęstość węgla w warstwie fluidalnej, kg/m^3 ,
 ϵ - porowatość warstwy fluidalnej.

2. METODYKA BADAŃ

W palenisku fluidalnym bez przelewu ustala się stan równowagi między strumieniem dostarczanego węgla oraz masą węgla znajdującego się w warstwie fluidalnej. Czas τ wyznaczony z równania bilansu substancji warstwy o wysokości H nazywa się czasem spalania węgla w tej warstwie:

$$\tau = \frac{H}{w} (1 - \epsilon) \rho_w \cdot A \cdot dH \quad (1)$$

gdzie \dot{m}_w - strumień węgla całkowicie odgazowanego, kg/s.

Warstwa fluidalna składa się z fazy gęstej oraz fazy rzadkiej. Dokładne zlokalizowanie wysokości H warstwy i dokonania jej bezpośredniego pomiaru jest trudne w przypadku braku możliwości ciągłej wizualizacji warstwy wzdłuż wysokości paleniska fluidalnego. Wielkość H można również wyznaczyć pośrednio na podstawie pomiaru stężenia c fazy rzadkiej. Zmianę stężenia wzdłuż wysokości opisuje zależność:

$$c = c_0 \cdot \exp(-a \cdot h). \quad (2)$$

Stałe c_0 oraz a można wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów na podstawie wyników pomiarów stężenia c_i oraz wysokości h_i liczonej od powierzchni rusztu.

Do zdefiniowania wysokości H wprowadzono wskaźnik masowego obciążenia przekroju poprzecznego fazy rzadkiej paleniska fluidalnego, określony wzorem:

$$f = \frac{c \cdot \dot{V}_{sw}}{A_f} \quad (3)$$

w którym:

\dot{V}_{sw} - strumień spalin wilgotnych, m^3/h , przepływający przez powierzchnię A_f , m^2 , fazy rzadkiej.

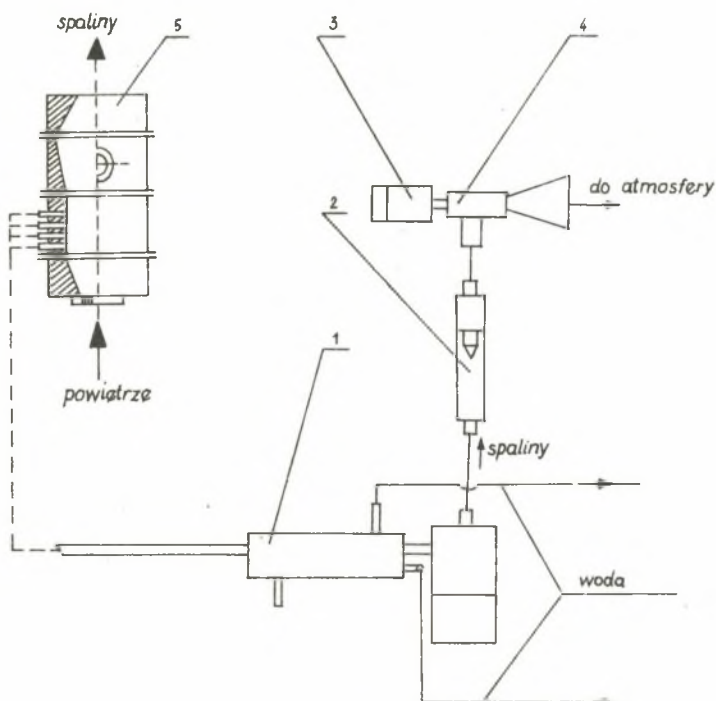
Odległość przekroju poprzecznego warstwy fluidalnej liczonej od powierzchni rusztu (rozdzielacza powietrza fluidyzującego), któremu odpowiada wartość liczbowa wskaźnika $f = 100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, nazywa się wysoko-

ścią H warstwy fluidalnej. Za przyjęciem podanej wartości liczbowej wskaźnika przemawiały wyniki analizy warunków działania paleniska fluidalnego: określanie wysokości warstwy metodą wizualizacji, badania eksperymentalne procesów towarzyszących, np. współczynników wnikania ciepła od warstwy fluidalnej do zanurzonego w niej wymiennika ciepła.

Porowatość ξ określano z wykresu $\log \xi = f(\log w)$, do sporządzenia którego wykorzystano zależności podane przez A. Baerga i J. Ciborowskiego 10 (prędkości krytyczna i graniczna) oraz wyniki badań Instytutu Energetyki Paliwowej (porowatość krytyczna, gęstość węgla w warstwie).

3. WYNIKI BADAŃ

Pewne informacje o wartościach czasu τ spalania węgla w warstwie fluidalnej daje metoda pomiaru zastosowana w Instytucie Energetyki Paliwowej. Metoda ta polega na pomiarze stężenia fazy rzadkiej, obliczeniu wysokości H na podstawie równań (2), (3) i przyjętej definicji wysokości, a następnie na numerycznym wyznaczeniu czasu τ z zależności (1).



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

1 - sonda pomiarowa, 2 - rotametr, 3 - wentylator, 4 - smoczek, 5 - stanowisko badawcze

Na rysunku 1 pokazano schemat układu pomiarowego. Prędkość zasysania spalin i ziaren węgla była tak dobierana, aby w przekroju wlotowym sondy zachować warunki zbliżone do warunków zasysania izokinetycznego.

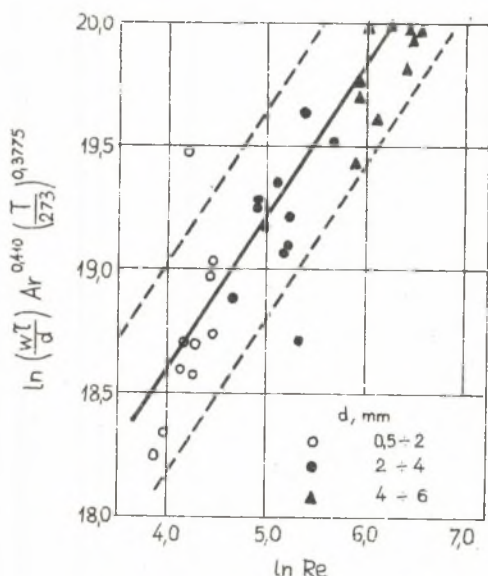
Przeprowadzone eksperymenty uwzględniały wpływ średnicy zastępczej węgla dostarczanego do paleniska (liczby nadmiaru powietrza, prędkości fluidyzacji, temperatury warstwy fluidalnej itp.) na czas τ spalania węgla. Zależność funkcyjna czasu τ od tych wielkości jest bardzo złożona. Jej postać można określić za pomocą analizy wymiarowej.

Stałe równania kryterialnego wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów z zastosowaniem metody ortogonalizacji:

$$\frac{w \cdot \tau}{d} = 115 \cdot 10^5 \cdot \text{Re}^{0,583} \cdot \text{Ar}^{-0,410} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{-0,3775} \quad (4)$$

gdzie:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad \text{Ar} = \frac{g \cdot d^3 (\rho_w - \rho) \cdot \varphi}{\eta^2}$$



Rys. 2. Porównanie wyników pomiarów [3] z równaniem kryterialnym

ziarnistości węgla dostarczanego do paleniska, która w miarę wzrostu zwiększa czas spalania węgla. Zależności te odnoszą się do stałego strumienia węgla dostarczonego do paleniska fluidalnego, $\dot{m} = \text{idem}$.

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki obliczeń czasu spalania τ za pomocą trzech wybranych równań, dotyczących techniki fluidalnej. Wszystkie obliczenia wykonano dla tych samych warunków działania paleniska fluidalnego.

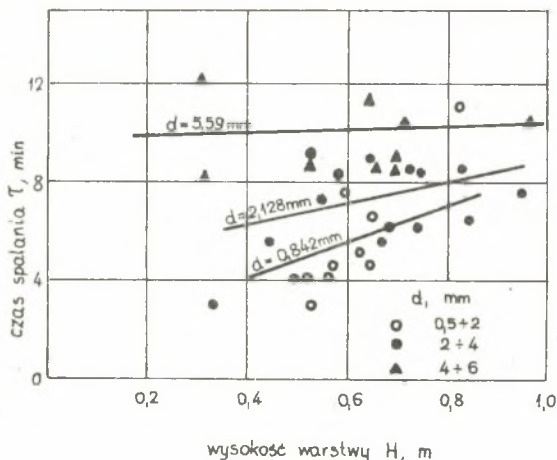
Zmienność równania kryterialnego przedstawiono na rysunku 2. Linie kreskowe wyznaczają pas rozrzutu danych eksperymentalnych w stosunku do równania (4) dla przyjętego poziomu ufności $p = 0,90$.

Przedziały ufności dla współczynników równania (4) są następujące:

$$\begin{aligned} \log c: & \quad 6,480; \quad 7,636 \\ a_1: & \quad 0,310; \quad 0,856 \\ a_2: & \quad -0,718; \quad -0,103 \\ a_3: & \quad -0,625; \quad -0,130 \end{aligned}$$

Maksymalny błąd względny pomiaru czasu τ spalania wynosi $\pm 9,2\%$.

Zależność czasu τ od wysokości H warstwy fluidalnej ilustruje rysunek 3. Na rysunku tym uwidocznił się również wpływ



Rys. 3. Zmienność czasu spalania w zależności od wysokości warstwy $\dot{m} = 30 \text{ kg/h}$

Tablica 1

Czas spalania paliwa w warstwie fluidalnej

Nr	Postać równania	Czas τ , s dla ziarnistości węgla: 0,5+2, $d=0,849 \text{ mm}$ 2+4, $d=2,128 \text{ mm}$ 4+6, $d=5,590 \text{ mm}$
1	Spalanie mułu węglowego z dodatkiem piasku kwarcowego: 0,2-2 mm (K.W. Roben, P. Hilgraf, [6]):	150±180
	$\tau = \frac{1,761 \cdot X \cdot H \cdot \varphi_a \cdot 1000^{0,125} \cdot \varphi_w \cdot \gamma_a^{0,28}}{\varphi \cdot W^{0,25} \cdot D \cdot p_{O_2} \cdot T^{0,625}} \left(d_1^{1,625} - d_2^{1,625} \right)$	680±770
	$w = 2 \pm 5 \text{ m/s}; \quad \lambda = 1,1 \pm 2,4; \quad T = 970 \pm 1370^\circ\text{K}$	990±1110
2	Spalanie węgla kamiennego (D. Kunii, O. Levenspiel, [2]):	250±300
	$\tau = \frac{\varphi_w \cdot d_1}{2 \cdot k \cdot c_{O_2}}$	730±780
	$d_1 \geq 0,1 \text{ mm}$	2000±2110
3	Spalanie węgla kamiennego (badania własne IEP)	180±370
	$\frac{w \cdot \tau}{d} = 115 \cdot 10^5 \cdot Re^{0,583} \cdot Ar^{-0,41} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{-0,3775}$	350±540
	$Re = 47 \pm 690; \quad Ar = (1 \pm 530) \cdot 10^3, \quad T = 910 \pm 1250^\circ\text{K}$	500±730

Porównanie wyników obliczeń czasu τ za pomocą wzorów (1) i (2) z wynikami eksperymentu [3] oraz ze wzoru 3 pozwala stwierdzić, że dla większości przypadków wartości obliczone są większe od eksperymentalnych. Różnica ta są wynikiem braku pełnej zgodności rzeczywistych warunków działania paleniska fluidalnego z założeniami procesów modelowych, których dotyczą wzory (1) oraz (2). Stosunkowo największą zgodność wyników uzyskano dla wzoru (2) i ziarnistości spalanego węgla $0,5 \pm 2$ mm ($d = 0,849$ mm).

4. UWAGI KOŃCOWE

W porównaniu z dotychczasowym piśmiennictwem w dziedzinie spalania paliw stałych podane tu równanie kryterialne uzupełnia informacje w tej dziedzinie. Równanie to uwzględnia przypadek spalania węgla kamiennego w warstwie fluidalnej bez przelewu oraz bez dodatku materiału inertnego, np. dolomitu.

Dla założonych warunków fluidyzacji z równania kryterialnego (4) można wyznaczyć czas spalania węgla kamiennego, a następnie na podstawie wzoru (1) określić wymiary warstwy fluidalnej.

Badania eksperymentalne są kontynuowane w Instytucie Energetyki Paliwowej w celu zebrania pełnych danych o czasie spalania węgla w warstwie fluidalnej w warunkach półtechnicznych.

LITERATURA

- [1] Gajewski W.: Gospodarka Paliwami i Energią (1970), nr 4 oraz (1969), nr 9.
- [2] Kunii D., Levenspiel O.: Promyslennoje psiewodoożiżenije, Izd.Chimija, Moskwa 1976.
- [3] Lorkiewicz Z., Myśliwiec W.: Badania eksperymentalne czasu spalania węgla w warstwie fluidalnej. Instytut Energetyki Paliwowej, mgr pr. dypl. (1977).
- [4] Ots A.: Archiwum Termodynamiki i Spalania. (1976), vok. 7, nr 1.
- [5] Pankiewicz T.: Gospodarka Paliwami i Energią. (1973) nr 8 i 9.
- [6] Roben K.W., Hilgraf P.: Verfahrenstechnik (1975), nr 10.
- [7] Skinner D.: The Fluidised Combustion of Coal. Mills and. Bonn Ltd London 1971.
- [8] Zembrzuski M. i in.: Archiwum Termodynamiki i Spalania (1976), vol.7, nr 2.
- [9] Wójcicki S.: Spalanie. WNT, Warszawa 1969.
- [10] Ciborowski J.: Fluidyzacja. PWT, Warszawa 1957.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕНИ СЖИГАНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Р е з ю м е

Представлено критериальное уравнение для времени сжигания каменного угля в кипящем слое, установленное при помощи метода анализа размерностей. Принято, что время сжигания каменного угля равно времени пребывания частиц угля в кипящем слое. На основе исследований установлено, что время сжигания равно от 180 до 730 секунд. Экспериментальные исследования выполнены на собственном испытательном стенде, его дебит - 50 кг/ч.

INVESTIGATIONS OF COAL COMBUSTION TIME IN A FLUIDIZED BED

S u m m a r y

The paper presents a dimensionless equation for coal combustion time in a fluidized bed via a dimensional analysis. Coal combustion time has been assumed to be equal to the residence time of coal grains in the fluidized bed in a layer of a given height. Experimental results are: 180-730 sec for coal with a granularity of 0,5-6 mm and of identical source. Measurements have been carried out in the Institute's own test device with a yield of 50 kg/ h of coal.