

Zbigniew LORKIEWICZ

Zbigniew JASTRZĄB

## WARUNKI FLUIDYZACJI POPIOŁU W PALENISKU FLUIDALNYM

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań warunków fluidyzacji popiołu w łożu fluidalnym. Popiół pochodził ze spalania węgla kamiennego w palenisku fluidalnym o mocy 150 kW. Podjęto próbę oceny przydatności istniejących korelacji do obliczania prędkości krytycznej popiołu.

## 1. Wprowadzenie

W palenisku fluidalnym łożo składa się w przeważającej części z popiołu pochodzącego ze spalania paliwa lub z mieszaniny materiału inertnego wprowadzanego do paleniska przed lub w czasie spalania oraz popiołu. Masowy udział paliwa w łożu jest niewielki, rzędu kilku procent [1].

Warunki fluidyzacji popiołu oraz materiału inertnego są odmienne od warunków fluidyzacji ziaren węgla doprowadzanych do paleniska. W dostępnej literaturze odczuwa się brak pełnych danych na ten temat. Badania W. Kudzi [2], W. Zygmańskiego [8] i wielu innych dostarczają informacji o warunkach fluidyzacji węgla.

Struktura ziarnowa popiołu jest bardzo zróżnicowana. Przykład analizy ziarnowej popiołu z paleniska fluidalnego IEP o mocy 150 kW zamieszczono w tabelicy 1. Każda wyróżniona tu klasa ziarnowa popiołu posiada inne własności: gęstość, porowatość krytyczną, krytyczną prędkość fluidyzacji itd. Praktycznie mamy więc do czynienia z różnymi materiałami fluidyzowanymi w palenisku.

Tabelica 1

Przykład analizy ziarnowej popiołu pochodzącego z fluidalnego spalania węgla typu B

Klasa ziarnowa	Średnica zastępcza $d, \text{ mm}$	Udział masowy %
> 2,5		8,60
1,5-2,5	2,0	17,19
1,2-1,5	1,35	11,69
1,02-1,2	1,11	12,72
0,75-1,02	0,885	16,05
0,50-0,75	0,625	15,36
0,25-0,50	0,375	12,49
< 0,25		5,90

W Instytucie Energetyki Paliwowej podjęto próbę badań warunków fluidyzacji popiołu pochodzącego ze spalania rozmaitych węgli w różnych paleniskach fluidalnych. Rezultaty dotychczasowych badań zaprezentowano w niniejszym opracowaniu.

Do badań eksperymentalnych wykorzystywano całą masę łoża : paleniska fluidalnego IEP po "przerwaniu" procesu spalania (po skokowym odcięciu strumienia węgla oraz powietrza i możliwie bardzo szybkim ochłodzeniu masy łoża). W tym przypadku łoże fluidalne składało się z popiołu pochodzącego ze spalonego węgla oraz niewielkiej ilości paliwa. W palenisku spalano węgiel pochodzący z kopalń: "Siersza" (A) oraz "Czerwone Zagłębie" (B). Ziarnistość w obu przypadkach była taka sama i wynosiła  $2\frac{1}{4}$  mm.

#### OZNACZENIA

$d$  - średnica zastępcza ziarna popiołu, m,

$H$  - wysokość nieruchomej warstwy popiołu, m,

$n$  - wykładnik potęgowy w równaniu (2),

$w$  - prędkość powietrza, m/s,

$w_k$  - krytyczna prędkość fluidyzacji, m/s,

$\varepsilon_k$  - porowatość krytyczna,

$\varphi$  - czynnik kształtu,

$\rho_g$  - gęstość powietrza,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\rho$  - gęstość popiołu,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\Delta p$  - spadek ciśnienia w nieruchomej warstwie popiołu,  $\text{N/m}^2$ ,

$\lambda$  - współczynnik oporu,

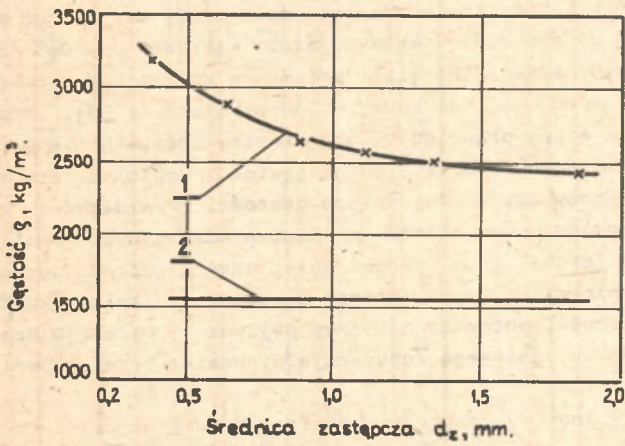
$\nu_g$  - kinematyczny współczynnik lepkości powietrza,  $\text{m}^2/\text{s}$ ,

$\text{Re} = \frac{d \cdot w_k}{\nu_g}$  - liczba Reynoldsa,

$\text{Ar} = \frac{g \cdot d^3 (\rho - \rho_g)}{\nu_g^2 \rho_g}$  - liczba Archimedesesa.

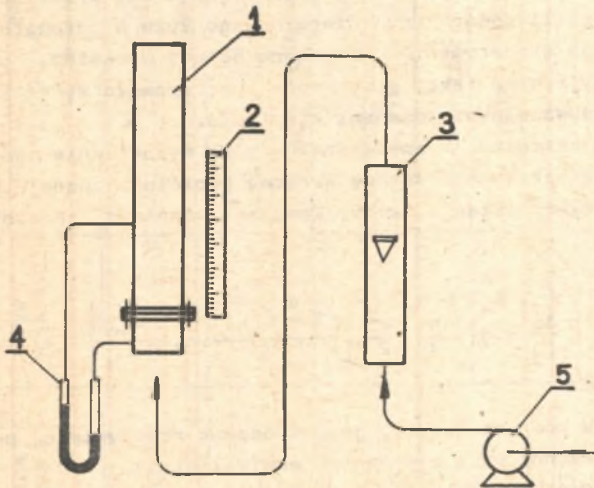
#### 2. Dyskusja wyników badań eksperymentalnych

Przedmiotem badań było określenie porowatości krytycznej, czynnika kształtu, krytycznej prędkości fluidyzacji i gęstości popiołu. Trzy pierwsze wielkości wyznaczano na stanowisku badawczym, którego schemat pokazano na rys. 1. Wewnętrzna średnica aparatu fluidalnego wynosiła 59,4 mm,



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

1 - aparat fluidalny, 2 - przymiar, 3 - rotametr, 4 - manometr różnicowy,  
5 - wentylator



Rys. 2. Zależność gęstości popiołu (1) oraz węgla (2) od średnicy zastępczej

zaś jego wysokość - 700 mm. Gęstość popiołu natomiast określona metodą piknometryczną.

Przyjęte do badań średnica aparatu i przedział zmienności średnic ziaren popiołu eliminują wpływ oddziaływania ścianek aparatu na warunku fluidyzacji popiołu. Porowatość krytyczna łoża nie zależy bowiem od stosunku  $\psi$  średnicy ziarna do średnicy aparatu, jeżeli wartość  $\psi \leq 0,5$  dla kúl o jednakowych i różnych średnicach [11]. Natomiast według badań Zaworonkowa już dla  $\psi \leq 0,09$  wpływ ścianek aparatu jest nieistotny [5]. Rezultatom badań prezentowanym w tej pracy odpowiada wartość stosunku  $\psi = 0,006-0,03$ .

Na rys. 2 zamieszczono rezultaty badań gęstości popiołu. Stwierdzono, że ze wzrostem średnicy zastępczej maleje gęstość. Prawdopodobnie tę można tłumaczyć różnym pochodzeniem ziaren popiołu, a więc i odmiennym składem chemicznym. Ziarna "grube" to w przeważającej części popiół pochodzący z ziaren substancji mineralnej wprowadzonej z paliwem do paleniska. Zaś ziarna "drobne" w większości pochodzą z ziaren paliwa. Substancja organiczna ziarna uległa spaleni, zaś jego substancja mineralna przereagowała w popiół.

Porowatość krytyczną  $\epsilon_k$  popiołu określono z zależności:

$$\epsilon_k = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \quad (1)$$

w której:  $\rho_n$ ,  $\rho$  - gęstość nasypowa popiołu w momencie przejścia łoża ze stanu fluidalnego w stan nieruchomy, gęstość popiołu wyznaczona metodą piknometryczną.

Za krytyczną prędkość fluidyzacji  $w_k$  przyjmuje się prędkość czynnika fluidyzującego w chwili osiągnięcia nieruchomego łoża o porowatości krytycznej  $\epsilon_k$ . Podczas eksperymentów stosowano metodę wizualną, a za prędkość krytyczną przyjmowano taką, przy której następowało wyraźne rozluźnienie warstwy z zauważalnymi zmianami ciśnienia.

Pomiar czynnika kształtu  $\varphi$  sprowadzał się do wyznaczenia oporu przepływu  $\Delta p$  powietrza przez nieruchomą warstwę popiołu o znanej wysokości  $H$ , a następnie do wykorzystania zmodyfikowanego równania Kozeny-Carmana [3]:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \left[ \frac{(1 - \epsilon_k)^{3-n}}{\epsilon_k^3} \cdot \varphi^{3-n} \right] \quad (2)$$

Czynnik kształtu zdefiniowano tu jako stosunek rzeczywistej powierzchni ziarna do powierzchni kuli o średnicy ekwiwalentnej.

Wybrane wyniki statystycznego opracowania eksperymentów zebrano w tabelicy 2. Na uwagę zasługuje stosunkowo wysoka wartość porowatości krytycznej  $\epsilon_k = 0,73 \div 0,78$ , znacznie wyższa od porowatości krytycznej węgla. Jest

Tablica 2

Rzultaty statystycznego opracowania wyników pomiarów  $w_k$ ,  $\epsilon_k$  oraz  $\varphi$  na poziomie ufności 0,95

Srednica zaatępcza	Typ popiołu	Krytyczna prędkość fluidyzacji $w_k$ , m/s	Porowatość krytyczna $\epsilon_k$	Czynnik kształtu $\varphi$
0,375	A	0,368 ± 0,008	0,743 ± 0,002	2,79 ± 0,07
	B	0,342 ± 0,006	0,765 ± 0,002	2,84 ± 0,06
0,625	A	0,617 ± 0,009	0,755 ± 0,001	3,19 ± 0,05
	B	0,510 ± 0,005	0,799 ± 0,001	3,58 ± 0,05
0,885	A	0,716 ± 0,008	0,760 ± 0,001	4,32 ± 0,14
	B	0,721 ± 0,008	0,775 ± 0,001	4,31 ± 0,16
1,110	A	0,910 ± 0,007	0,754 ± 0,001	3,56 ± 0,19
	B	0,865 ± 0,006	0,778 ± 0,001	3,47 ± 0,19
1,350	A <sup>x</sup>	-	-	-
	B	0,901 ± 0,010	0,775 ± 0,002	2,80 ± 0,15
1,850	A	1,034 ± 0,007	0,731 ± 0,002	2,80 ± 0,15
	B	1,066 ± 0,006	0,755 ± 0,001	2,17 ± 0,14

<sup>x</sup>Brak reprezentatywnej próbki do badań.

to rezultatem większej nieregularności kształtu ziaren popiołu aniżeli ziaren węgla kamiennego.

Interpretacja wpływu średnicy zastępczej popiołu na porowatość krytyczną jest utrudniona ze względu na fakt, że popiół o różnej ziarnistości posiada różną gęstość (rys. 2).

Duża nieregularność kształtu ziaren popiołu powoduje, że czynnik kształtu przyjmuje również wysokie wartości, średnio  $\varphi = 3,3$ , zbliżone do wartości podanych przez Brotza dla ostrego piasku ( $\varphi = 3,4$  [9]).

### 3. Krytyczna prędkość fluidyzacji popiołu

W każdym reaktorze fluidalnym prędkość płynu ograniczona jest dwoma wielkościami: krytyczną oraz graniczną prędkością fluidyzacji. Ich wartości zależą od własności fizykochemicznych płynu i ziaren ciała stałego oraz w niektórych przypadkach od geometrii łoża fluidalnego.

Zwykle korelacje na krytyczną prędkość fluidyzacji wyznaczano na podstawie własnych badań. Doprowadziło to do bardzo dużej liczby i różnorodności form korelacji, najczęściej o ograniczonym zakresie stosowania.

Na uwagę zasługują korelacje oparte na równaniu opisującym straty ciśnienia w zależności od prędkości płynu fluidyzującego w łożu nieruchomym o porowatości krytycznej:

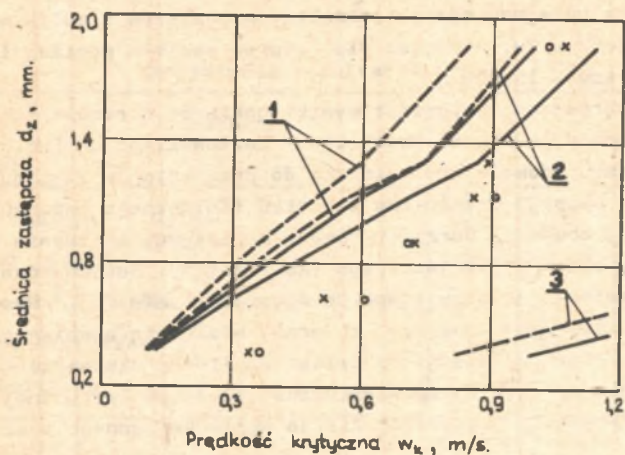
$$Ar = C_1 Re + C_2 Re^2 \quad (3)$$

Wielkości  $C_1$  oraz  $C_2$  są złożonymi funkcjami porowatości krytycznej, czynnika kształtu itd. Często spotyka się wyrażenie (3) o stałych współczynnikach  $C_1$  i  $C_2$ . Na przykład w korelacji Wena i Yu zalecanej przez Bandrowskiego i współautorów [10] na obliczenie krytycznej prędkości fluidyzacji występują:  $C_1 = 1652$  oraz  $C_2 = 24,5$ . Równanie to obowiązuje dla dowolnego płynu i dowolnego materiału sfluidyzowanego; czynnik kształtu może przybierać wartości od 1,0 do 6,7.

Wyrażenie (3) jest słuszne dla całego zakresu przepływu płynu fluidyzującego przez nieruchome łożo o porowatości krytycznej, przy czym w obszarze laminarnym dominuje pierwszy składnik sumy, zaś w obszarze burzliwym - drugi. W celu wyboru najlepszej korelacji dla rezultatów eksperymentu (tablica 2) przeanalizowano sto kilkadziesiąt wzorów na krytyczną prędkość fluidyzacji.

Dla przykładu na rys. 3 odwzorowano za pomocą linii ciągłych wyniki obliczeń krytycznej prędkości fluidyzacji z korelacji Wena i Yu, Erguna oraz Todosa, a za pomocą punktów - wyniki pomiarów.

Do obliczeń przyjęto szeroki zakres zmian gęstości popiołu od 2400 do 3200 kg/m<sup>3</sup>. Uwzględniając te krzywe przedstawione na rys. 3, przy czym gęstości  $\rho = 2400$  kg/m<sup>3</sup> odpowiadają linie kreskowe.



Rys. 3. Porównanie wyników eksperymentu z równaniami opisującymi zależność prędkości krytycznej od średnicy zastępczej popiołu

1 - równanie Todesa [5]

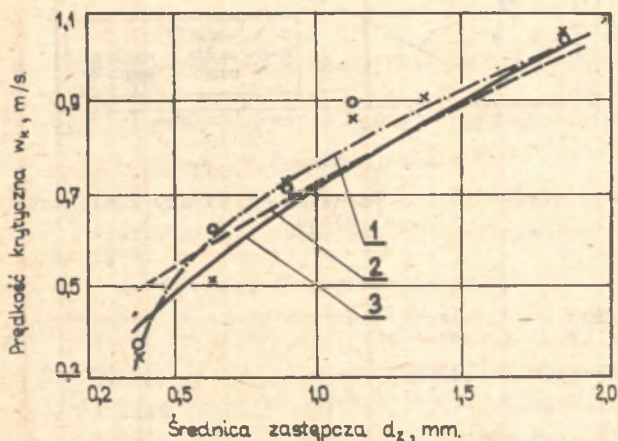
$$Re_k = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}$$

2 - równanie Wena i Yu [10]

$$Re_k = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 Ar} - 33,7,$$

3 - równanie Erguna [10]

$$Re_k = \frac{Ar}{\frac{150(1 - \epsilon_0)}{\epsilon_0^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\epsilon_0^3} Ar}}$$



Rys. 4. Porównanie wyników eksperymentu z równaniami opisującymi zależność prędkości krytycznej od średnicy zastępczej dla popiołu

1 - równanie Hawksleya [4]

$$w_k = \frac{\epsilon^2}{\exp\left[\frac{4,1(1 - \epsilon)}{0,64 + \epsilon}\right]}$$

2 - równanie Roziłowskiego [4]

$$Re_k = 0,141\sqrt{Ar},$$

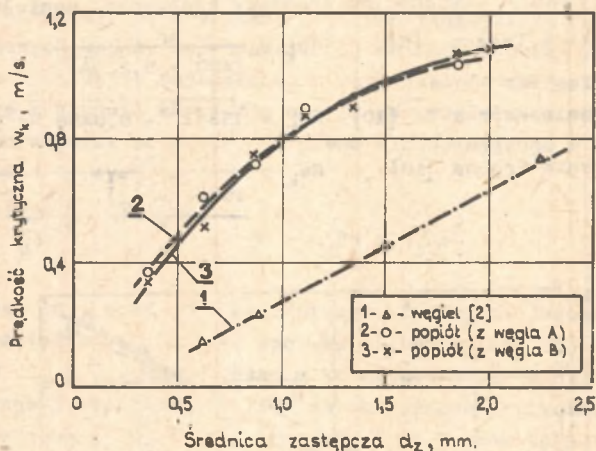
3 - równanie Fedorowa [7]

$$Re_k = 0,11 \cdot Ar^{0,52}$$

Stosunkowo najmniejszy rozrzut rezultatów pomiarów i obliczeń uzyskano dla korelacji Wena i Yu, chociaż dla ziaren popiołu poniżej 1,4 mm daje ona za małe wartości liczbowe.

Na rys. 4 porównano natomiast wyniki pomiarów z rezultatami obliczeń prędkości krytycznej z równań Hawksleya, Rozłowskiiego i Fedorowa. Zgodność wyników jest zadowalająca, ale nie do przyjęcia ze względu na to, że równania te nie opisują mechanizmu początku fluidyzacji popiołu. Korelacje (2) oraz (3) obejmują burzliwy obszar przepływu, a badania eksperymentalne dotyczyły obszaru przejściowego ( $Re = 7-123$ ). Budowa równania Hawksleya jest odmienna od przyjętego do opisu równania (3). Rys. 4 zamieszczono w celu ilustracji znanego, a przez wielu niedocenianego zagadnienia poprawnego doboru korelacji do opisu rezultatów eksperymentu.

Dla porównania na rys. 5 zaprezentowano zależność krytycznej prędkości fluidyzacji od średnicy zastępczej ziaren węgla kamiennego oraz popiołu.



Rys. 5. Zależność prędkości krytycznej od średnicy zastępczej węgla i popiołu

#### 4. Uwagi końcowe

Popiół z paleniska fluidalnego nie stanowi jednorodnej substancji ani pod względem ziarnistości, ani gęstości. Gęstość zmienia się wraz ze średnicą zastępczą ziaren popiołu, co pokazano na rys. 2.

W tabelicy 3 zestawiono wyniki badań eksperymentalnych dla popiołu i porównano je z rezultatami badań węgla. Podane wartości można odpowiednio w wykorzystać w obliczeniach palenisk fluidalnych.

Równanie kryterialne (3) dotyczy monoziarnistego łoża fluidalnego. W przypadku łoża poliziarnistego korelację tę można stosować do określe-



Tablica 3

## Zestawienie rezultatów badań

Wielkość	Materiał	Popiół	Węgiel [2]
Średnica zastępcza $d$ , mm		0,37-1,85	0,5-1,85
Gęstość $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>		3200-2400	1540
Krytyczna prędkość fluidyzacji, $w_k$ , m/s		0,34-1,07	0,15-0,75
Porowatość krytyczna $\epsilon_k$ -		0,75	0,55-0,51
Czynnik kształtu $\varphi$		3,3	1,69

nia granic przedziału krytycznej prędkości fluidyzacji. Krytyczna prędkość fluidyzacji jest bowiem mniejsza od prędkości krytycznej łóża monoziarnistego składającego się z największych ziaren i większa od prędkości fluidyzacji łóża monoziarnistego składającego się z ziaren najdrobniejszych [5, 6].

Badania nad określeniem warunków fluidyzacji popiołów pochodzących z różnych palenisk fluidalnych są kontynuowane w Instytucie Energetyki Paliwowej w Dąbrowie Górniczej.

## LITERATURA

- [1] Janssen K., Schilling H.: High Temp. Chem. React. Eng. Symp. Harrogate, 1975, London 1975.
- [2] Kudzia W.: Warunki suszenia węgla w łóżu fluidalnym (praca doktorska) 1980.
- [3] Leva M. i inni: Chem. Eng. Progr., 44, 1948.
- [4] Romankow P. i inni: Żurnał prikladnoj chimii, t. XXXVII, w. 3, 1964.
- [5] Razumow I.M.: Fluidyzacja i transport pneumatyczny materiałów sypkich. WNT, Warszawa 1975.
- [6] Ciborowski J.: Fluidyzacja, PWT, Warszawa 1957.
- [7] Zujew F.G.: Pnematyczeskoe transportirovanije na zieropierierabotajuszczich przedprijatijach, Izd. Kłos, Moskwa 1976.
- [8] Zygmanski W.: Materiały sympozjonu "TERMOFLUID'79". Częstochowa 1979.
- [9] Brotz W.: Podstawy inżynierii reakcji chemicznych. WNT, Warszawa 1964.
- [10] Bandrowski J. i inni: Inżynieria chemiczna, IX, 4, 1979.
- [11] Tomczek J., Gradań B., Kudzia W., Jastrzęb Z.: Gospodarka Paliwami i Energią, 5, 1978.

Recenzent: Doc. dr inż. Władysław GAJEWSKI

Praca wpłynęła do Redakcji w dniu 3 stycznia 1981 r.

Условия псевдооживления золы в топке кипящего слоя

### Резюме

В статье приводятся результаты испытаний влияния условий псевдооживления золы в кипящем слое. Зола происходила из горения каменного угля в псевдооживленной топке мощности 150 кВт. Предпринялась попытка оценки пригодности существенных корреляций при вычислении критической скорости псевдооживления золы.

The investigations of ash fluidization in a fluidized combustor

### Summary

In this paper there are presented the results of experimental investigations of ash fluidization in a fluidized bed. The ash was a product of the combustion process of hard coal in a fluidized bed combustion chamber of the 150 kW output power. There has also been made an attempt to assess the usefulness of the existing correlations in calculations of the ash minimum fluidization velocity.