

Wojciech KUDZIA

ANALIZA PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH STAN KRYTYCZNY
I GRANICZNY FLUIDYZACJI

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę spotykanych w literaturze propozycji określenia prędkości krytycznej i granicznej fluidyzacji oraz krytycznej porowatości warstwy. Następnie wyniki uzyskane za pomocą propozycji literaturowych porównano z wynikami eksperymentów przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym, w wyniku czego wybrano i zaproponowano równania dla określania powyższych wielkości w przypadku fluidyzacji drobnodziarnistego węgla.

1. WSTĘP

Przy projektowaniu i eksploatacji urządzeń z warstwą fluidyzacyjną niezbędne jest właściwe określenie warunków fluidyzacji. W tym celu konieczna jest znajomość krytycznej i granicznej prędkości fluidyzacji oraz krytycznej porowatości warstwy.

W literaturze spotyka się szereg różnych propozycji na określenie tych wielkości. Jednak większość z nich daje wyniki znacznie różniące się między sobą. Przyczyną tego jest odmienny sposób interpretacji zarówno średnicy, jak i kształtu ziaren. Najczęściej spotykane wzory dotyczą ziaren o kształcie kulistym. W przypadku ziaren znacznie odbiegających kształtem od kulistego, mogą zostać popełnione błędy nawet rzędu 100%.

Stosowane oznaczenia

- A - powierzchnia ziarna,
- A_k - powierzchnia komory fluidalnej,
- d_z - średnica zastępcza ziaren,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- H_k - wysokość warstwy,
- m_s - masa ciała stałego w warstwie,
- V - objętość ziarna,
- w_g - graniczna prędkość fluidyzacji,
- w_k - krytyczna prędkość fluidyzacji,

ϵ_k - porowatość krytyczna,

η - współczynnik lepkości dynamicznej,

\Re - liczba oporu przepływu,

Q - gęstość płynu,

Q_s - gęstość ciała stałego,

φ - czynnik kształtu,

Ar - liczba Archimedesza,

Re - liczba Reynoldsa,

Φ - liczba, $\frac{w_g^3 - Q}{g \cdot \eta}$.

2. KRYTYCZNA PRĘDKOŚĆ FLUIDYZACJI

Ciborowski [5, 6] oraz Miller i in. [11] na podstawie badań własnych stwierdzili, że krytyczna prędkość fluidyzacji nie zależy od masy ładunku, ani też od jego wysokości, zależy natomiast od parametrów płynu fluidyzującego oraz rodzaju i ziarnistości ciała fluidyzowanego. W literaturze spotyka się dużą ilość równań pozwalających wyznaczyć tę prędkość [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14]. Część tych równań dotyczy tylko ziaren o kształcie zbliżonym do kuli. W Instytucie Energetyki Paliwowej od dłuższego już czasu prowadzone są prace nad fluidalnym suszeniem, spalaniem i zgazowaniem węgla. Ziarna węgla mają kształt znacznie odbiegający od kuli. Dlatego też analiza przeprowadzona w tej pracy dotyczyć będzie tylko równań, w których uwzględniono kształt ziaren. W tabelicy 1 przytoczono zależności obliczeniowe, proponowane przez różnych autorów.

Natomiast w tabelicy 2 dokonano porównania wyników obliczeń prędkości krytycznej, otrzymanych na podstawie równań zamieszczonych w tabelicy 1 oraz wyników eksperymentów przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym o przekroju komory $0,01 \text{ m}^2$. Wyniki badań przedstawionych w tabelicy 2 są wartościami średnimi z 15-20 przeprowadzonych eksperymentów.

Jak wynika z tabelicy 2 równania podawane przez różnych autorów dają wyniki znacznie się różniące. Najbardziej zbliżone wyniki do eksperymentów uzyskano na podstawie wzoru podanego przez Baerga i in. [2].

Równanie to, stwierdza również Ciborowski [5], mimo dużej prostoty daje wyniki zadowalające w praktycznych obliczeniach. Maksymalne rozbieżności wyników eksperymentów i wyników uzyskanych wzorem Baerga nie przekraczają 15%.

Tablica 1

Równanie opisujące krytyczną prędkość fluidyzacji

Nr równania	Postać równania	Zakres stosowności	Literat.
(1)	$w_k = 0,005 \frac{d_z^2(\rho_s - \rho)g}{\eta} \frac{\epsilon_k^3}{\varphi^2(1 - \epsilon_k)}$	$(Re) < 10$	[10]
(2)	$w_k = 0,0065 \frac{d_z^2(\rho_s - \rho)g}{\eta} \frac{\epsilon_k^3}{\varphi^2(1 - \epsilon_k)}$	$(Re) < 10$	[8]
(3)	$w_k = \frac{0,4274}{\rho} \left\{ d_z[\rho_s - \epsilon_k(\rho_s - \rho)] \right\}^{1,23}$		[2]
(4)	$\frac{w_g}{w_k} = 0,305 \epsilon_k^{-6}$		[1]
(5)	$\frac{w_k}{w_g} = 0,1175 - \frac{0,1046}{1 + 0,00373 Ar^{0,6}}$		[7]
(6)	$\frac{w_k}{w_g} = 0,019 \pm 0,003$	$\phi < 0,3$	[13]
	$\frac{w_k}{w_g} = 0,022 \cdot \phi^{0,2}$	$0,3 < \phi < 10^3$	
	$\frac{w_k}{w_g} = 0,09 \pm 0,005$	$\phi > 10^3$	
(7)	$\frac{1,75}{\epsilon_k^3} \cdot \left(\frac{w_k \cdot d_z \cdot \rho}{\eta} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_k) \cdot \varphi^2}{\epsilon_k^3} \cdot \frac{d_z \cdot w_k \cdot \rho}{\eta} =$ $= \frac{d_z^3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \rho}{\eta^2}$		[3,9]

Tablica 2

Wyniki obliczeń i eksperymentów prędkości krytycznej
fluidyzacji ziaren węgla o gęstości $\rho_s = 1500 \text{ kg/m}^3$
w powietrzu o temperaturze $t_a = 20^\circ\text{C}$

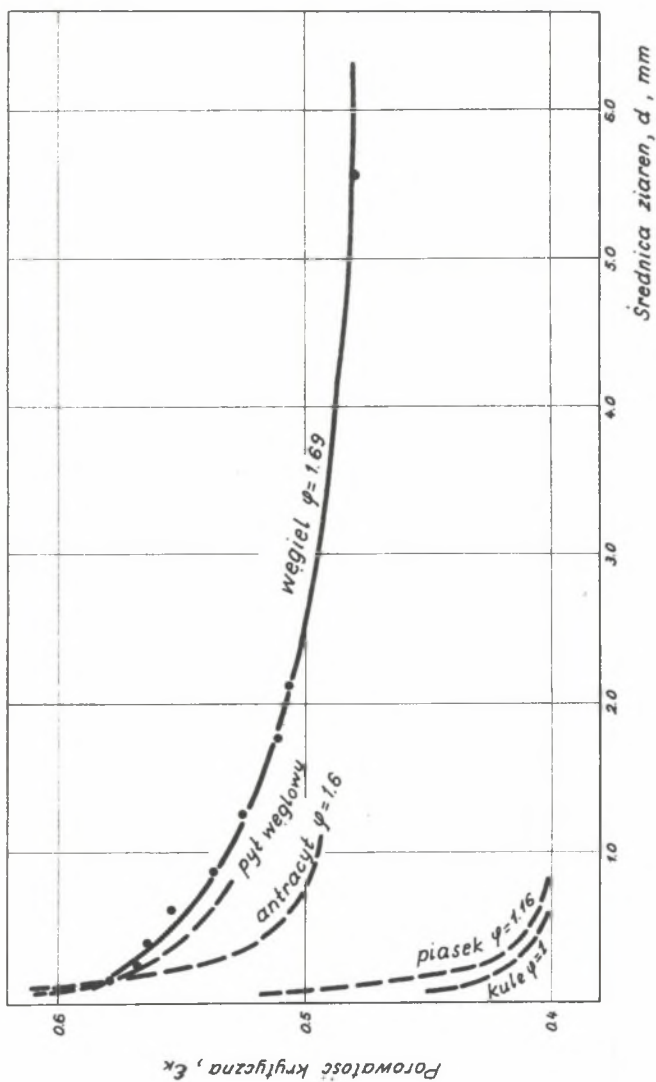
Średnica ziaren węgla	Wzór Nr							Eksperyment
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
mm	m/s							m/s
0,50-0,75 (0,625)	0,201	0,261	0,128	0,185	0,139	0,187	0,234	0,150
0,75-1,02 (0,885)	0,367	0,477	0,202	0,193	0,205	0,223	0,373	0,230
1,0-2,0 (1,5)	-	-	0,406	0,205	0,325	0,291	0,647	0,450
2,0-2,5 (2,25)	-	-	0,690	0,216	0,430	0,356	0,717	0,730

3. POROWATOŚĆ KRYTYCZNA

Porowatość krytyczna jest to maksymalna wartość porowatości warstwy nieruchomej w stanie jej największego rozluźnienia, czyli w momencie przejścia od stanu usypanego do fluidyzacji. Analitycznie porowatość krytyczną można wyznaczyć tylko dla jednorodnych kul. Odpowiednie przykłady dla możliwych teoretycznie rodzajów ułożenia kul przytacza Ciborowski [5]. W rzeczywistości nawet kule nie układają się w żaden z teoretycznych sposobów. Badania doświadczalne wykazały, że porowatość krytyczna ładunku kul jednorodnych jest również zmienna za zmianą średnicy ziaren. Dla mniejszych średnic ziaren porowatość krytyczna jest większa [5, 9]. Przyczyna tego nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśniona. Przypuszcza się, że odgrywają tu rolę siły tarcia lub siły elektrostatyczne.

Dla materiałów sypkich o nieregularnych kształtach porowatość krytyczną można wyznaczyć jedynie doświadczalnie. Eksperyment ten jest bardzo prosty, wystarczy sfluidyzować dany ładunek, a następnie zmniejszając strumień płynu doprowadzić do przejścia ładunku w stan nieruchomy. Dokonując pomiaru wysokości takiego ładunku oraz jego masy i gęstości materiału można wyznaczyć porowatość krytyczną z następującej zależności:

$$\epsilon_k = \frac{A_k H_k - \frac{m}{\rho_s}}{A_k H_k} \quad (8)$$



Rys. 1. Porowatość krytyczna w funkcji średnicy ziaren

- wyniki eksperymentu dla węgla,
- linia uzyskana wg równania $\epsilon_k = \frac{0,140}{1 + d} + 0,462$
- linie uzyskane na podstawie (5.9)

Wyniki tak przeprowadzonych eksperymentów opracowano metodą najmniejszych kwadratów, a otrzymana zależność jest słuszna dla węgla Zagłębia Dąbrowskiego w zakresie ziarnistości 0,1-6 mm

$$\xi_k = \frac{0,14}{1 + d_z} + 0,462. \quad (9)$$

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki eksperymentów oraz krzywą wykreśloną według równania (9). Maksymalne rozbieżności wyników eksperymentów i wyników uzyskanych na podstawie równania (9) są mniejsze od 10%. Celem porównania, na rysunku 1 wykreślono również analogiczne zależności dla innych materiałów zaczerpnięte z literatury [5, 9]. Ciekawy może być fakt, że dla samej średnicy ziaren porowatość krytyczna jest większa dla materiału o wyższym czynniku kształtu.

4. GRANICZNA PRĘDKOŚĆ FLUIDYZACJI

Graniczna prędkość fluidyzacji zwana też maksymalną prędkością fluidyzacji, jest taka sama, jak maksymalna prędkość, z jaką ciało opadałoby swobodnie w nieruchomym płynie. Porowatość warstwy fluidalnej w tym momencie można przyjąć w przybliżeniu równą 1 [3]. Według teorii swobodnego opadania maksymalna prędkość, z jaką opadać będzie cząstka, wynika z równowagi sił oporu i wyporu płynu oraz siły ciężkości cząstki.

Zapisując powyższe stwierdzenie matematycznie i przekształcając je, otrzymamy liczbę oporu przepływu jako funkcję liczby Reynoldsa

$$\mathcal{R} = \frac{4}{3} \frac{gd_z(Q_s - Q)}{w_z^2 \cdot Q} = f(Re). \quad (10)$$

Zagadnienie to jest proste dla cząstek kulistych, dla których odpowiednie wartości liczby oporu podaje wielu autorów [3, 5, 9].

Dla cząstek niekulistych liczba oporu jest funkcją nie tylko liczby Reynoldsa (liczonej dla zastępczej średnicy ziaren), ale również czynnika kształtu ziaren. Również granicom stref ruchu laminarnego i burzliwego odpowiadają inne wartości liczby Reynoldsa, niż dla cząstek kulistych. Ci-borowski [5] proponuje, by w zakresie ruchu laminarnego, przy $Re \leq 0,05$, liczbę oporu obliczyć z następującej zależności:

$$\mathcal{R} = \frac{28,5}{1g \frac{15,4}{\psi} / Re}. \quad (11)$$

natomiast dla ruchu burzliwego wartość ta jest stała i wynosi:

$$\mathcal{K} = 5,31 - 4,88/\varphi. \quad (12)$$

W zakresie strefy przejściowej cytowany autor zaleca korzystanie z wykresów uzyskanych eksperymentalnie [4, 5, 9, 13].

Kunii i Levenspiel [9] proponują obliczanie prędkości granicznej z eksperymentalnej zależności:

$$\mathcal{K}(\text{Re})^2 = \frac{4}{3} \frac{\text{gd}_z^3 (Q_s - Q) Q}{\varphi^2} = f(\text{Re}), \quad (13)$$

zamieszczając jednocześnie wykres tej zależności dla kilku wielkości czynnika kształtu.

Analizując podane w literaturze [4, 5, 9, 13] wartości liczby oporu dla ziaren niekulistych, stwierdzono, że dla materiałów, których czynnik kształtu jest rzędu takiego, jak dla analizowanego węgla, przy $\text{Re} > 100$ wartości liczby oporu są już prawie niezmiennie i można je określać wzorem (12). Popełniony w ten sposób błąd jest niewielki, tym bardziej, że obliczone wartości z wykorzystaniem wzoru (12) są niewiele różne od uzyskiwanych eksperymentalnie. Również wyniki uzyskane przy wykorzystaniu propozycji Kunii i Levenspiela doborze opisują eksperyment. Metoda podana przez tych autorów jest jednak nieco bardziej kłopotliwa.

5. CZYNNIK KSZTAŁTU DLA WĘGLA

Określenie podstawowych parametrów procesu fluidyzacji dla ziaren niekulistych jest niemożliwe bez znajomości czynnika kształtu tych ziaren. Czynniki kształtu ziarna jest najczęściej definiowany jako stosunek rzeczywistej powierzchni ziarna do powierzchni kuli, o tej samej objętości co ziarno:

$$\varphi = \frac{A}{\pi d_z^2} / V = \text{idem}$$

Czynnik kształtu dla węgla Jaworznicko-Mikołowskich był badany przez Podkowę [12], który stwierdził, że wynosi on 1,37 i nie zależy od ziarnistości węgla. Shirai i Theris [9] wyznaczyli czynnik kształtu dla pyłu węglowego $\varphi = 1,45$, natomiast Leva i in. [9] określili, że dla antracytu i węgla bitumicznego wartość ta wynosi 1,6. Łatwo zauważyć znaczny rozrzut wyników podawanych przez różnych autorów. Eksperymenty własne dla węgla Zagłębia Dąbrowskiego opracowano, wykorzystując w tym celu teorię Cozeny

i Karmana [5, 10], która mówi, że opór przepływu płynu przez warstwę usypaną można wyrazić analogicznie do równania oporów w rurach. Teorię tę uzupełnili Leva i in. [10], podając jednocześnie diagramy współczynników tej funkcji uzyskane eksperymentalnie. Jak wykazały eksperymenty własne czynnik kształtu dla węgla o ziarnistości 0,1-6 mm jest równy 1,69 i niezależny od średnicy ziaren. Maksymalna rozbieżność wyników eksperymentów nie przekracza +15%.

6. WNIOSKI

Celem tej pracy była analiza parametrów opisujących proces fluidyzacji oraz ocena propozycji określania tych wartości spotykanych w literaturze. Na podstawie eksperymentów własnych stwierdzono, że krytyczną prędkość fluidyzacji, z błędem nie większym od 15%, można określić wzorem (3), podanym przez Baerga [2].

Krytyczną porowatość dla analizowanego węgla można określić na podstawie eksperymentalnie określonego wzoru (9), ważnego w zakresie ziarnistości węgla 0,1-6 mm.

Określenie granicznej prędkości fluidyzacji napotyka tylko na jeden problem, tzn. wyznaczenie liczby oporu. Przeanalizowano dwie propozycje określenia tej wartości podaną przez Ciborowskiego [5] oraz Kunii i Levenspiela [9]. Stwierdzono, że wartości obliczone na podstawie obydwu propozycji dobrze opisują eksperyment.

Wyznaczenie podstawowych parametrów opisujących proces fluidyzacji dla ziaren o kształcie niekulistym wiąże się ze znajomością czynnika kształtu ziaren. W dostępnej literaturze występują znaczne rozbieżności podawanych przez różnych autorów wartości czynnika kształtu dla węgla. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły ustalić, że dla węgla Zagłębia Dąbrowskiego czynnik kształtu jest równy 1,69 i nie zależy od ziarnistości węgla.

LITERATURA

- [1] Agarwall O.P., Storrow J.A.: Chemistry and Industry, 1951, ss. 278-286.
- [2] Baerg A., Klassen J., Gischler P.: Can. J. Research 28 F, 1950, ss. 287-307.
- [3] Bennet C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu, ciepła i masy. WNT, Warszawa 1967.
- [4] Boothroyd R.G.: Tęczenie gaza so wzwieszonymi czasticami. Izd. "MIR", Moskwa 1975 (tłum. z j. ang.).
- [5] Ciborowski J.: Fluidyzacja. PWT, Warszawa 1957.
- [6] Ciborowski J.: Przegląd chemiczny 6, 1948, ss. 164-172.
- [7] Fuks N.A.: Mechanika aerozoliej. Izd. AN. ZSRR, 1955.

- [8] Heerden C., Nobel A.P., Krevelen D.W.: Chem. Eng. Sci., 1, 1951, ss. 37-49, 51-66.
- [9] Kunii D., Levenspiel O.: Promyślennoje psewdożiżenije. Izd. "Chimija", Moskwa 1976 (tłum. z j. ang.).
- [10] Leva M., Grummer M., Weintraub M., Pollchik M.: Chem. Eng. Progr., 44, 1948, ss. 511-520.
- [11] Miller C.O., Longwiniuk A.K.: Ind. Eng. Chem. 43, 1951, ss. 1220-1225.
- [12] Podkowa K.: Koks, Smoła, Gaz 7-8, 1970, ss. 210-214.
- [13] Razumow I.M.: Fluidyzacja i transport pneumatyczny materiałów sypkich. WNT, Warszawa 1975.
- [14] Strumiżko Cz.: Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa 1975.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КРИТИЧЕСКОЕ И ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПСЕВДОЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Р е з ю м е

В статье приводится анализ встречаемых в литературе предложений определения критического и предельного предельного псевдожизнения, а также критической пористости слоя. Затем результаты, полученные при помощи данных в литературе предложений, сравниваются с результатами экспериментов проведенных в лаборатории и на основании этого избираются и предлагаются уравнения для определения выше данных величин в случае псевдожизнения мелкозернистого угля.

ANALYSIS OF THE PARAMETERS DESCRIBING THE CRITICAL AND LIMITING STATE OF FLUIDIZATION

S u m m a r y

In this paper the analysis of the known procedures for calculating the minimum and maximum velocity of fluidization and the critical bed porosity is presented. The results found in literature are compared with the experimental ones obtained on a laboratory stand. As a result of this analysis the best method for minimum and maximum velocity and critical porosity calculation is chosen.