

Grzegorz ROGULA

e-mail: grzegorz.rogula@ue.wroc.pl

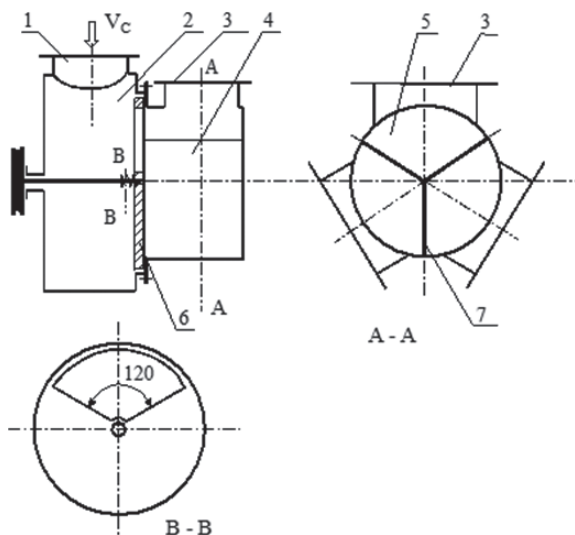
Katedra Aparatury i Inżynierii Procesowej, Uniwersytet Ekonomiczny, Wrocław

Badania aerodynamiki nowego aparatu pulsofluidyzacyjnego – wpływ wielkości tarczowego rozdzielacza gazu

Wstęp

Układ pulsofluidalny znany jest od końca lat 70. Układ ten eliminuje szereg wad klasycznego układu fluidalnego i znalazł wiele zastosowań w przemyśle rolno-spożywczym i chemicznym. [Glaser i Gawrzyński, 1990; Gawrzyński i Glaser, 1996]. W trakcie dotychczasowych badań z trudno fluidyzującymi materiałami o znacznym stopniu adhezji, zaobserwowano w układach klasycznych obniżoną intensywność mieszania fazy stałej jak również gorszą strukturę złoża i stosunkowo niskie wartości oporów zredukowanych złoża Δp_{zr} . W przypadku materiałów pylistych zaobserwowano zjawisko przesiewania cząstek fazy stałej przez półkę sitową. Eliminacja tych niekorzystnych zjawisk zaowocowała kolejnymi modyfikacjami klasycznego układu pulsofluidalnego: zastosowanie złoża materiału inertnego, zmianę ustawienia komór naporowych, układ pulsofluidalny o strefowej pulsacji wzdłużnej [Gawrzyński i Pieczaba, 2000], zastosowanie modyfikacji pulsacji strumienia czynnika suszącego [Gawrzyński i Rychlik, 2002].

Nowa konstrukcja aparatu jest kolejną modyfikacją klasycznego układu pulsofluidalnego z cyklicznie przemieszczanym strumieniem gazu. Schemat aparatu przedstawiono w pracy [Rogula i Rychlik, 2014]. Wprowadzenie rozdzielacza gazu i dostarczanie gazu zasilającego bezpośrednio przy komorach naporowych (jak w praktyce przemysłowej) tworzy aparat bardziej kompaktowy. Również możliwość dostarczania wstępnego strumienia gazu do aparatu poprzez odsunięcie tarczy tarczowego rozdzielacza gazu od gniazda, jak i zmiana wielkości i objętości komór naporowych umożliwiają powstanie w jednym aparacie różnych układów (fluidalnego, pulsofluidalnego, pseudofluidalnego).



Rys. 1. Schemat rozdzielacza gazu: 1 – króciec wlotowy gazu do rozdzielacza, 2 – komora wlotowa rozdzielacza, 3 – króćce wylotowe gazu z komory rozdzielczej, 4 – głowica rozdzielacza gazu, 5 – komory głowicy rozdzielczej, 6 – tarcza wirująca rozdzielacza, 7 – przegrody komory rozdzielacza

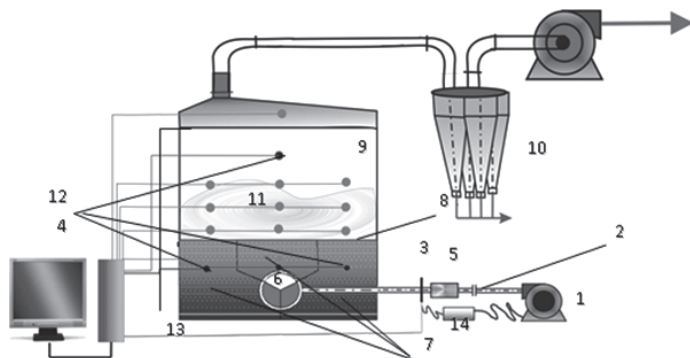
Wstępne zasilanie aparatu gazem w nowym aparacie uzyskano poprzez możliwość odsunięcia tarczy tarczowego rozdzielacza gazu (Rys. 1) od jego gniazda, a nie poprzez dodatkowe otwory w tarczy rozdzielacza [Gawrzyński i Rychlik, 2002]. Takie rozwiązanie powoduje wstępne zasilanie wszystkich komór naporowych niezależnie od położenia tarczy rozdzielacza z otworem zasilającym komory.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu zmiany rozmiaru (średnicy) tarczy obrotowego rozdzielacza gazu w aparacie nowej konstrukcji na aerodynamikę złoża pulsofluidalnego przy zmianie pozostałych parametrów procesowych.

Badania doświadczalne

Aparatura

Badania aerodynamiki prowadzono w trójkomorowym laboratoryjnym aparacie pulsofluidyzacyjnym nowej konstrukcji o prostokątnych komorach i powierzchni półki sitowej $0,072 \text{ m}^2$ ($0,6 \times 0,12 \text{ m}$), powierzchni swobodnej półki sitowej 14,6% i szczelinie 0,26 mm. Na rys. 2 przedstawiono schemat aparatury doświadczalnej. W porównaniu do wcześniejszych badań [Rogula, 2009; Rogula, 2010; Rogula i Rychlik, 2014] obecne badania prowadzono dla mniejszej średnicy tarczowego rozdzielacza gazu (150 mm).



Rys. 2. Stanowisko badawcze [Rogula i Rychlik, 2014]: 1 – wentylator, 2 – rurociąg, 3 – czujnik temperatury, 4 – komputer, 5 – nagrzewnica, 6 – rozdzielacz gazu, 7 – komory naporowe, 8 – sito, 9 – komory suszenia, 10 – cyklon, 11 – termopary, 12 – czujniki ciśnienia, 13 – wysyp, 14 – przetwornik częstotliwości

Aparaturę badawczą oraz sposób uzyskiwania danych procesowych opisano szczegółowo w pracy [Rogula i Rychlik, 2014].

Materiały

Materiałem użytym do badań był suchy silikażel szerokoporowaty ze względu na jego zdolność do fluidyzacji oraz stosowanie jako materiału porównawczego w kinetyce procesu suszenia. Badania prowadzono dla trzech wartości częstotliwości pulsacji strumienia gazu $f = 4, 8, 12 \text{ Hz}$, trzech średnic zastępczych silikażelu $d_z = 2,8, 4,6$ i $5,6 \text{ mm}$, wysokości złoża materiału pylistego $H_0 = 100 \text{ mm}$. Prędkości gazu (liczone na przekrój aparatu) stosowane w doświadczeniach zmieniały się od 0 do około 3 m/s.

Zakres badań

Przeprowadzone badania były dalszą częścią badań nad nowym aparatem pulsofluidyzacyjnym, które pokazały wpływ zmiany rozdzielacza gazu w aparacie (zmiana średnicy z 200 mm na 150 mm) na zachowanie się złoża pulsofluidalnego przy zmianie pozostałych parametrów procesowych – częstotliwości pulsacji strumienia gazu, średnicy zastępczej cząstek, wysokości złoża oraz stopnia odsunięcia tarczy wirującej od głowicy tarczowego rozdzielacza gazu.

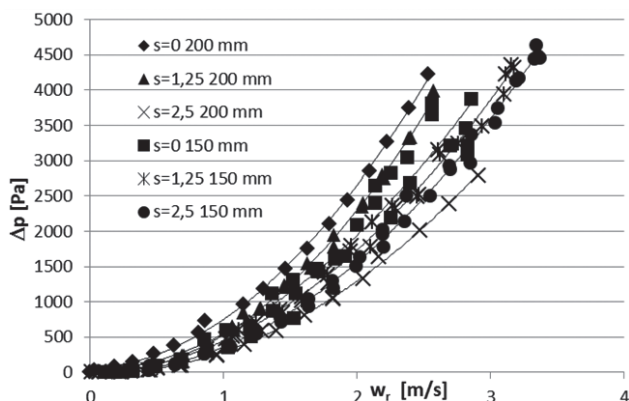
Badania przeprowadzono dla klasycznego układu pulsofluidalnego oraz dla odsunięcia tarczy rozdzielacza gazu o $s = 0, 1,25$ i $2,5 \text{ mm}$, dla komory naporowej standardowej oraz dla komory naporowej o powiększonej objętości o 50%.

Układ klasyczny uzyskiwano dla tarczy rozdzielacza bez odsunięcia od gniazda rozdzielacza gazu $s = 0$. Rozmiar komór naporowych w obydwu przypadkach (objętość komory typowa i powiększona o 50%) był taki sam tj. $20 \times 20 \times 20$ cm.

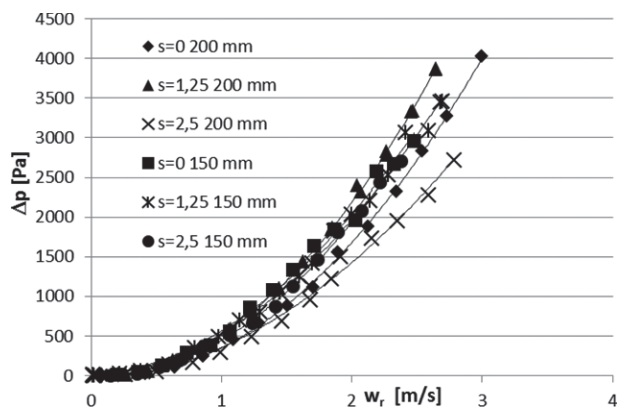
Pomiary wykonywano w sposób opisany szczegółowo w pracy [Rogula i Rychlik, 2014].

Wyniki i dyskusja

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykresy spadku ciśnienia $\Delta p = f(w_r)$ w rozdzielaczu wraz z półką sitową dla komory naporowej o zwykłej objętości i objętości komory powiększonej o 50% oraz dla dwóch rozmiarów tarczy rozdzielacza gazu. Wykresy wykonano dla przykładowej częstotliwości $f = 8$ Hz.



Rys. 3. Charakterystyka rozdzielacza gazu dla $f = 8$ Hz dla komory standardowej



Rys. 4. Charakterystyka rozdzielacza gazu dla $f = 8$ Hz dla komory powiększonej

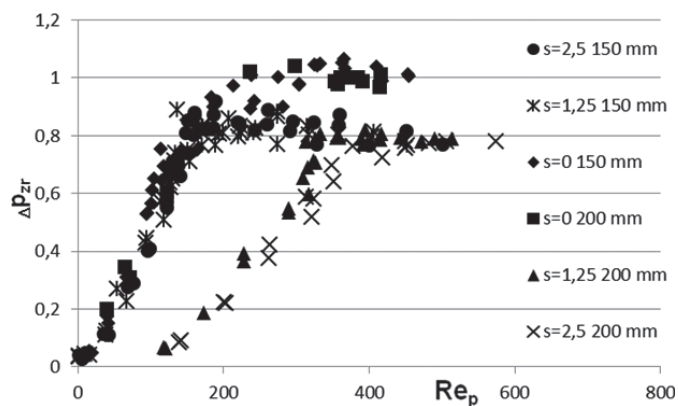
Z badań opisanych w pracy [Rogula, 2009] wynika, że odsunięcie tarczy obrotowej od głowicy rozdzielacza gazu zarówno o $s = 1,25$ mm, jak i o $s = 2,5$ mm powoduje obniżenie spadków ciśnienia w aparacie. Natomiast zwiększenie objętości komory naporowej powoduje dalsze obniżenie spadków ciśnienia w takim aparacie w porównaniu do aparatu o niższej o połowę wysokości komór naporowych (objętość komór naporowych jest o połowę mniejsza).

Zmiana wymiarów tarczowego rozdzielacza gazu (z 200 na 150 mm) ma większy wpływ na spadki ciśnienia w układzie ze standardową objętością komór – spadki ciśnień maleją dla $s = 0$ i $s = 1,25$ mm, a rosną dla odsunięcia $s = 2,5$ mm. Dla powiększonej objętości komory naporowej wpływ zmiany rozmiaru tarczy rozdzielacza jest zdecydowanie mniejszy – różnice spadków ciśnień są niewielkie (poza widocznym wzrostem ciśnienia dla $s = 2,5$ mm).

W celu określenia wpływu modyfikacji pulsacji na opory złoża, jego strukturę oraz zakres pracy aparatu, tak dla aparatu zwykłego jak i o zwiększonej objętości komór naporowych przy zmianie rozmiaru rozdzielacza gazu opracowano zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$, która wg pracy [Gawrzyński i Rychlik, 2002] pozwala określić wpływ rozdziału strumienia powietrza wskutek odsunięcia tarczy rozdzielacza na jego parametry aerodynamiczne [Rogula, 2009].

Dla materiałów dobrze fluidyzujących można w przybliżeniu przyjąć [Gawrzyński i Glaser, 1996], że wartość oporów złoża upłynionego jest wprost proporcjonalna do wysokości złoża usypanego materiału. Dalsze rozważania przeprowadzono biorąc pod uwagę wyniki uzyskane przy wysokości usypanego złoża $H_0 = 100$ mm dla trzech częstotliwości pulsacji strumienia powietrza (4 s^{-1} , 8 s^{-1} , 12 s^{-1})

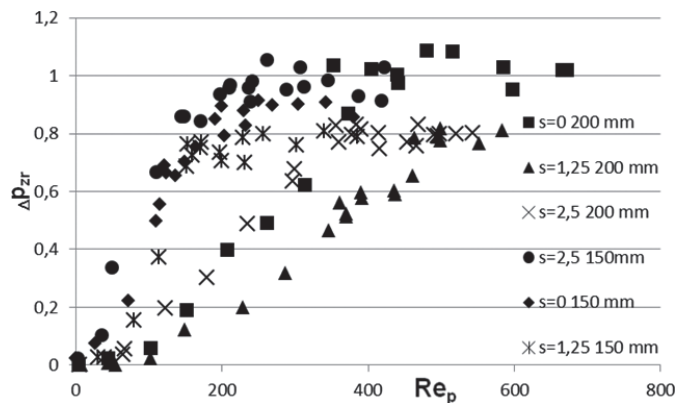
Na rys. 5 przedstawiono zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ dla częstotliwości pulsacji strumienia gazu, $f = 8$ Hz, oraz dla stałej wysokości złoża $H_0 = 100$ mm, $d_z = 2,8$ mm i standardowej komory.



Rys. 5. Zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ – odsunięcie $s = 0; 1,25; 2,5$ mm dla standardowej komory i $f = 8 \text{ s}^{-1}$

Z wykresów można wywnioskować, że odsunięcie tarczy o $s = 1,25$ i $2,5$ mm od głowicy rozdzielacza powoduje pogorszenie struktury złoża silikażułu w porównaniu do układu klasycznego (Δp_{zr} o 20% mniejsze) niezależnie od stosowanej częstotliwości pulsacji i objętości komór naporowych. Dla tego zakresu odsunięcia złożo zachowuje się podobnie do klasycznego złoża pulsofluidalnego z oscylacją cząstek wewnątrz złoża materiału fluidyzowanego. Zmniejszenie średnicy tarczy zasilającej spowodowało zmniejszenie wartości dolnej prędkości pulsofluidyzacji w_{dof} czyli szybsze zapoczątkowanie drgań cząstek złoża (jego upłynnienie) tak dla komory standardowej, jak i powiększonej, niezależnie od wielkości szczeliny zasilania wstępnego s .

Dla powiększonej komory naporowej aparatu (Rys. 6) zmiana rozmiaru tarczy rozdzielacza gazu nie powoduje zmian struktury złoża, tak dla układu klasycznego, jak i dla odsunięcia tarczy rozdzielacza o $s = 1,25$ mm. Natomiast dla odsunięcia o $s = 2,5$ mm Δp_{zr} zwiększa się o około 10%. Samo zwiększenie objętości komór naporowych nie zmienia charakteru zachowania złoża. Efektem zastosowania zwiększonej objętości komór naporowych jest zmniejszenie oporów złoża w takim aparacie w porównaniu do aparatu bez powiększonych komór naporowych dla wszystkich trzech badanych częstotliwości pulsacji.

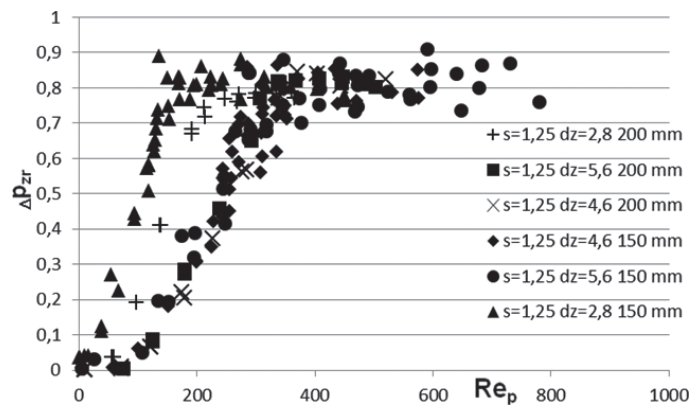


Rys. 6. Zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ – odsunięcie $s = 0; 1,25; 2,5$ mm dla powiększonej komory i $f = 8 \text{ s}^{-1}$

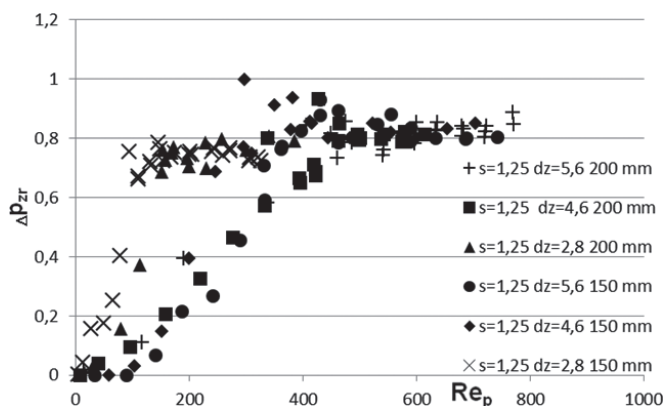
Zmniejszenie rozmiaru tarczy zasilającej z 200 mm na 150 mm niweluje ten spadek oporów. Nie stwierdzono znaczących (niewynikających z błędów pomiaru) rozbieżności pomiędzy wartościami dolnych prędko-

ści pulsofluidyzacji w_{dpf} dla obydwu aparatów różniących się wielkością tarczy zasilacz gazu dla tych samych parametrów procesowych. Dla prędkości gazu w , równych dolnej prędkości pulsofluidyzacji wraz ze wzrostem częstotliwości pulsacji następuje również wyrównywanie struktury złoża dla poszczególnych układów – krzywe $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ zbliżają się do siebie.

Wpływ wielkości cząstek materiału rozdrobnionego na strukturę złoża $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ przy zmianie wielkości rozdzielacza gazu przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ – odsunięcie $s = 1,25$ mm dla standardowej komory oraz $f = 8 \text{ s}^{-1}$



Rys. 8. Zależność $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ – odsunięcie $s = 1,25$ mm dla powiększonej komory oraz $f = 8 \text{ s}^{-1}$

Wykresy wykonano dla wysokości usypanego złoża $H_0 = 100$ mm dla przykładowej częstotliwości 8 Hz dla odsunięcia $s = 1,25$ mm i $d_z = 2,8$ mm. Rys. 7 przedstawia zależność dla komory standardowej, a rys. 8 dla komory o objętości powiększonej o 50%.

Z uzyskanych wykresów widać, że zwiększanie średnicy zastępczej materiału d_z dla zwykłej objętości komór naporowych jak i dla komór powiększonych pociąga za sobą zwiększanie liczby *Reynoldsa* i prędkości gazu potrzebnego do upłynnienia złoża. Jest to niezależne od wielkości odsunięcia tarczy od rozdzielacza gazu. Natomiast wpływ rozmiaru tarczy rozdzielacza jest niejednoznaczny. Dla ziaren o $d_z = 5,6$ mm oraz $d_z = 4,6$ mm (Rys. 7 i 8) widać niewielki wpływ rozmiaru tarczy na strukturę materiału (krzywe $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ leżą blisko siebie). Natomiast dla ziaren o średnicy $d_z = 2,8$ mm widać większy wpływ rozmiaru tarczy na strukturę materiału (krzywe $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ są bardziej odsunięte od siebie). Tak dla standardowej jak i powiększonej komory naporowej zmniejszenie rozmiaru tarczy spowodowało przyspieszenie upłynnienia złoża materiału pylistego (Re_p maleje). Z badań wynika, że dla małych średnic ziaren materiału rozdrobnionego zmniejszenie wielkości rozdzielacza gazu niweluje wpływ powiększenia objętości komór naporowych.

Dla aparatów pulsofluidyzacyjnych duże znaczenia ma znajomość zakresu pracy aparatu. Dolna granica to występujący oscylujący ruch złoża materiału rozdrobnionego bez lokalnych obszarów zalegania złoża

na półce sitowej aparatu (dolna prędkość pulsofluidyzacji – w_{dpf}), a górna to fontannowanie złoża (górna prędkość pulsofluidyzacji – w_{gpf}).

Badania wykazują, że zmniejszenie rozmiaru tarczy rozdzielacza gazu (z 200 na 150 mm) tak dla układu bez, jak i ze zwiększoną objętością komór naporowych o 50 %, powoduje niewielkie powiększenie obszaru pracy aparatu poprzez obniżenie dolnej prędkości pulsofluidyzacji przy praktycznie stałej górnej prędkości pulsofluidyzacji dla odsunięcia tarczy od głowicy rozdzielacza gazu o $s = 1,25$ mm i $s = 2,5$ mm.

Podsumowanie i wnioski

Użycie rzeczywistego materiału porównawczego (silikażelu) podczas badań potwierdza, że również dla materiałów średnio fluidyzujących układ ten może służyć do suszenia materiałów wymagających większych ilości gazu (w pierwszym okresie suszenia).

Porównanie badań dla aparatu z powiększoną objętością komory naporowej i dla zwykłej objętości, ze zmianą rozmiaru tarczy rozdzielacza gazu pozwala stwierdzić, że zwiększanie strumienia wstępnego powoduje zwiększenie zużycia gazu i wzrost dolnej prędkości pulsofluidyzacji w obydwu aparatach. W obydwu aparatach występuje również obniżenie oporów przepływu przez rozdzielacz gazu przy zachowaniu oscylującego ruchu cząstek złoża w porównaniu do aparatu starej konstrukcji.

Zastosowanie tarczy rozdzielacza gazu o mniejszej średnicy ma wpływ na przyspieszenie pulsofluidyzacji dla danego rozmiaru ziarna materiału rozdrobnionego. Widać również wpływ głównie na standardową objętość komór naporowych, obniżając dodatkowo spadki ciśnienia dla małych odsunięć tarczy rozdzielacza gazu $s = 0$ i $s = 2,5$ mm od gniazda rozdzielacza. Zmiana (zmniejszenie rozmiaru) tarczy rozdzielacza niweluje również wpływ powiększenia objętości komór naporowych w aparacie dla małych rozmiarów ziaren złoża rozdrobnionego.

Nowy typ aparatu pulsofluidyzacyjnego z odsuwającą tarczą rozdzielacza gazu wymaga jeszcze dalszych badań przy zmianie wymiarów konstrukcyjnych aparatu (wymiar rozdzielacza gazu, zmiany powierzchni półek sitowych, objętości komór naporowych). Na podstawie obecnych prac widać wpływ wymiarów konstrukcyjnych aparatu na zachowanie złoża pulsofluidalnego. Wymaga to jeszcze szczegółowego opisu matematycznego, którego dotyczyć będą dalsze prace.

Oznaczenia

d_z – średnica zastępcza, [m]	Δp – spadek ciśnienia, [N/m^2]
$Re_p = w_r \rho_g d_z / \mu_g$ – liczba <i>Reynoldsa</i> , [-]	Indeksy dolne i górne
$\Delta p_{zr} = \Delta p / \rho_b g H_0$ – zredukowany spadek ciśnienia, [-]	g, d – górny, dolny
f – częstotliwość, [1/s]	pf – pulsofluidyzacji
H_0 – wysokość złoża, [m]	m – modyfikowana
s – odsunięcie, [m]	r – robocza
w – prędkość, [m/s]	zr – zredukowana

LITERATURA

- Gawrzyński Z., Glaser R., 1996, Drying in pulsed-fluid bed dryer with relocated gas stream. *Drying Technol.*, **14**, 5, 1121-1172. DOI: 10.1080/07373939608917142
- Gawrzyński Z., Pieczaba B., 2000, *Pulse-fluid bed dryer with zoned lenghtwise pulsation*. Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS 2000, paper no 353
- Gawrzyński Z., Rychlik M., 2002, *Pulsed fluid bed system with relocated gas stream and modified pulsation*. Proceedings of 29th International Conference of SSCHE, 27-31 of May, Tatranske Matliare, Slovakia
- Glaser R., Gawrzyński Z., 1990, Drying of sliced vegetables in PFB. *Scientific Papers of Wrocław Academy of Economics, Technology*, **528**, 71-87
- Rogula G., 2009, Some research on aerodynamics of a new pulsed fluidized bed dryer. *Chem. Proc. Eng.*, **30**, 653-663
- Rogula G., 2010, Aerodynamics of a new pulsed fluidized bed. Initial tests for changed surface area of pressure chambers. *Chem. Proc. Eng.*, **31**, 919-928
- Rogula G., i Rychlik M., 2014, Badania aerodynamiki nowego aparatu pulsofluidyzacyjnego – zmiana objętości komór naporowych. *Inż. Ap. Chem.*, **53**, nr 1, 31-32