

Grzegorz ROGULA, Magdalena RYCHLIK

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

Katedra Aparatury i Inżynierii Procesowej, Uniwersytet Ekonomiczny, Wrocław

## Badania aerodynamiki nowego aparatu pulsofluidyzacyjnego – zmiana objętości komór naporowych

### Wstęp

Układ pulsofluidalny 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  $\Delta p_r$ . W przypadku materiałów pylistych stwierdzono zjawisko przesiewania cząstek fazy stałej przez półkę sitową. Eliminacja tych niekorzystnych zjawisk zaowocowała kolejnymi modyfikacjami klasycznego układu pulsofluidalnego: przez zastosowanie złoża materiału inertnego [Rogula, 2010], zmianę ustawienia komór naporowych, [Gawrzyński i Pieczaba, 2000], zastosowanie modyfikacji pulsacji strumienia czynnika suszającego [Gawrzyński i Rychlik, 2002].

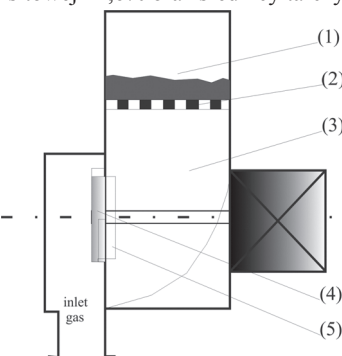
Nowa konstrukcja aparatu jest kolejną modyfikacją układu klasycznego. Wprowadzenie rozdzielacza gazu i dostarczanie gazu zasilającego bezpośrednio przy komorach naporowych sprawia, że aparat staje się bardziej kompaktowy. Również możliwość dostarczania wstępnego strumienia gazu do aparatu poprzez odsunięcie tarczy rozdzielacza od gniazda, jak i zmiana wielkości i objętości komór naporowych umożliwiają powstanie w jednym aparacie różnych układów (fluidalnego, pulsofluidalnego, pseudofluidalnego).

W pracy porównano wyniki badań przeprowadzonych w aparacie z powiększoną objętością komory naporowej z wynikami uzyskanymi w aparacie o zwykłej objętości.

### Badania doświadczalne

#### Aparatura

Badania prowadzono w trójkomorowym laboratoryjnym aparacie pulsofluidyzacyjnym nowej konstrukcji o prostokątnych komorach i wymiarach półki sitowej  $0,6 \times 0,12$  m, powierzchni swobodnej półki sitowej 14,6% oraz średnicy tarczy rozdzielającej 200 mm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

Na rys. 1 przedstawiono schemat aparatury doświadczalnej. W porównaniu do wcześniejszych badań [Rogula 2009; Rogula 2010] obecne badania prowadzono w komorze podwyższonej o 50% (zwiększona objętość komór naporowych). Gaz roboczy z wentylatora – 1 poprzez nagrzewnicę – 5 przepływał rurociągiem do tarczowego rozdzielacza gazu – 6. Tam gaz roboczy był rozdzielany do poszczególnych komór naporowych – 7, następnie przepływał przez półkę sitową – 8 i wchodził w kontakt z materiałem rozdrobnionym powodując jego upłynnienie. Następnie przechodził przez odpylacz – 10 i był usuwany do atmosfery. Ciało stałe usuwane było z aparatu poprzez rurociąg wylotowy – 13 do zbiornika. Prędkość gazu mierzono za pomocą anemometru z czujnikiem temperatury – 3 i przetwornikami firmy ALMEMO®. Temperatury mierzono za pomocą czujników pt100 – 11 umieszczonych pod półką sitową i w komorze roboczej. Ciśnienie mierzono za pomocą czujników ciśnienia oraz przetwornika ciśnienia MERA ZAP EPA1300 – 12. Dane pomiarowe były

zbierane i wyświetlane na komputerze – 4 poprzez system akwizycji danych. Częstotliwość pulsacji (prędkość obrotu wirującej tarczy rozdzielacza gazu) i prędkość obrotową wentylatora regulowano przetwornikiem częstotliwości – 14.

Badania prowadzono dla układu fluidalnego, klasycznego układu pulsofluidalnego oraz dla odsunięcia tarczy rozdzielacza  $s = 1,25$  mm i  $s = 2,5$  mm, dla typowej objętości komory naporowej oraz powiększonej objętości komory naporowej o 50%. Układ fluidalny uzyskano przez całkowite usunięcie wirującej tarczy rozdzielacza z aparatu, układ klasyczny dla tarczy 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.

**Materiały**

Jako materiału do badań użyto suchego silikażelu szerokoporowego (dość dobra zdolność do fluidyzacji, stosowanie silikażelu jako materiału porównawczego w kinetyce procesu suszenia). Badania prowadzono dla trzech zastępczych średnic materiału  $d_p = 2,778$  mm, 4,6 mm i 5,604 mm.

#### Pomiary

Każdy pomiar wykonywano wysypując na półkę sitową odważoną ilość materiału ziarnistego o żądanej wysokości złoża. Następnie włączano rozdzielacz gazu o wymaganej częstotliwości obrotu i włączano wentylator. Podczas każdego eksperymentu prędkość gazu rosła proporcjonalnie do zwiększania prędkości obrotowej wirnika wentylatora. Podczas każdego pomiaru obserwowano zachowanie się złoża materiału rozdrobnionego – jego oscylacje i strukturę.

Prędkości gazu (liczone na przekrój aparatu) stosowane w doświadczeniach zmieniały się od 0 do około 2,5 m/s.

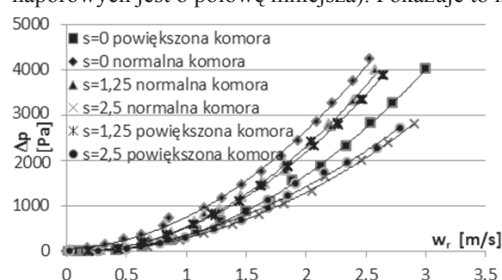
Badania prowadzono dla trzech wartości częstotliwości gazu  $f = 4,8, 12$  s<sup>-1</sup> trzech wysokości złoża materiału pylistego  $H_0 = 50, 100, 200$  mm.

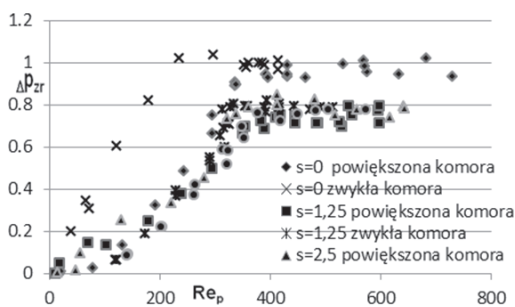
### Wyniki i dyskusja

Przeprowadzone badania pokazały wpływ zwiększenia objętości komory naporowej aparatu na zachowanie się złoża pulsofluidalnego przy zmianie pozostałych parametrów procesowych – częstotliwości pulsacji gazu, średnicy zastępczej cząstek, wysokości złoża, stopnia odsunięcia tarczy wirującej od głowicy tarczowego rozdzielacza gazu.

Na rys. 2 przedstawiono wykres  $\Delta p = f(w_r)$  dla rozdzielacza wraz z półką sitową dla komory naporowej o zwykłej objętości i objętości powiększonej o 50%. Wykres wykonano dla przykładowej częstotliwości  $f = 8$  s<sup>-1</sup>. Z badań w pracy [Rogula, 2009] wynika, że odsunięcie tarczy obrotowej od głowicy o  $s = 1,25$  mm 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). Pokazuje to krzywa na rys. 3.

Rys. 2. Charakterystyka rozdzielacza gazu dla  $f = 8$  s<sup>-1</sup>



Rys. 3. Zależność  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$  przy  $s = 0; 1,25; 2,5$  mm dla powiększonej komory i  $f = 8 \text{ s}^{-1}$

W celu określenia wpływu modyfikacji pulsacji na opory złoża, jego strukturę oraz zakres pracy aparatu, dla obydwu aparatów opracowano zależność  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ . Zależność ta pozwala także określić wpływ rozdziału strumienia powietrza wskutek odsunięcia tarczy rozdzielacza na jego parametry aerodynamiczne [Rogula, 2009]. Dla materiałów dobrze fluidyzujących można w przybliżeniu przyjąć, że wartości oporów złoża upłynnionego jest wprost proporcjonalna do wysokości złoża usypanego materiału.

Dalsze rozważania przeprowadzono dla wyników uzyskanych przy wysokości złoża  $H_0 = 100$  mm i dla trzech częstotliwości pulsacji strumienia powietrza ( $4 \text{ s}^{-1}$ ,  $8 \text{ s}^{-1}$ ,  $12 \text{ s}^{-1}$ ). Wg Ginzburga i Riezhikowa [1969] strukturę złoża może charakteryzować wielkość zredukowanego spadku ciśnienia  $\Delta p_{zr} = \Delta p_{zr} / \Delta p_{stat}$ . Przy przepływie gazu przez nieruchome złożo materiału  $\Delta p_{zr}$  rośnie wraz ze wzrostem prędkości gazu, do osiągnięcia  $\Delta p_{zr} = 1$  dla idealnego złoża fluidalnego.

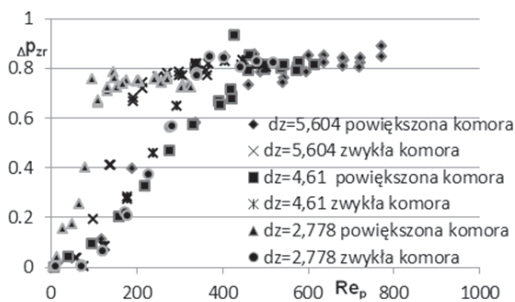
Wartości zredukowanego spadku ciśnienia powyżej 1 ( $\Delta p_{zr} > 1$ ) spotykane są bardzo rzadko, a w rzeczywistych złożach upłynnionych  $\Delta p_{zr}$  jest zazwyczaj niższe od jedności ( $\Delta p_{zr} < 1$ ). Zależność  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$  dla wąskich frakcji silikażelu i  $\Delta p_{stat} \approx \text{const}$  sprowadza się do liniowej funkcji  $\Delta p_{zr} = Af(Re_p)$ , gdzie  $Re_p = Bw_r$ . Zależność ta pozwala uchwycić ogólny charakter zmian ciśnienia w złożu materiału rozdrobnionego. Sporządzono wykresy zależności  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$ . Na rys. 3 przedstawiono tę zależność dla częstotliwości pulsacji strumienia  $f = 8 \text{ s}^{-1}$  oraz dla stałej wysokości złoża  $H_0 = 100$  mm.

Z wykresów można wywnioskować, że odsunięcie tarczy o  $s = 1,25$  i  $2,5$  mm od głowicy rozdzielacza powoduje pogorszenie struktury złoża silikażelu w porównaniu do układu klasycznego ( $\Delta p_{zr}$  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).

Również zwiększenie objętości komór naporowych nie zmienia charakteru zachowania złoża. Efektem zastosowania zwiększonej objętości komór naporowych jest zmniejszenie oporów złoża w porównaniu do aparatu bez powiększonych komór naporowych (dla całego zakresu  $f$ ).

Zwiększanie wielkości szczeliny zasilania wstępnego  $s > 0$  powoduje wzrost  $w_{dof}$  w obydwu aparatach (bez i ze zwiększoną objętością komór naporowych). Nie stwierdzono znaczących rozbieżności pomiędzy wartościami dolnych prędkości pulsofluidyzacji  $w_{dof}$  dla obydwu aparatów dla tych samych parametrów procesowych. Dla prędkości gazu  $w_r$  równych  $w_{dof}$  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 odsunięcia tarczy obrotowej oraz wielkości cząstek materiału rozdrobnionego na strukturę złoża  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$  przedstawiono na przykładowym rys. 4. Wykresy wykonano dla  $H_0 = 100$  mm,  $f = 12 \text{ s}^{-1}$  oraz  $s = 1,25$  mm. Widać, że zwiększanie  $d_z$  dla zwykłej obję-



Rys. 4. Zależność  $\Delta p_{zr} = f(Re_p)$  dla powiększonej komory i  $s = 1,25$  mm

tości komór naporowych pociąga za sobą zwiększanie liczby Reynoldsa i prędkości gazu potrzebnego do upłynnienia złoża. Jest to niezależne od wielkości odsunięcia tarczy od rozdzielacza gazu.

Dla komory o zwiększonej objętości – dla ziaren  $d_z = 5,604$  mm oraz  $d_z = 4,61$  mm sytuacja jest analogiczna. Natomiast dla średnicy  $d_z = 2,778$  mm następuje zmiana – przy tych samych parametrach niezależnie od wielkości odsunięcia tarczy od gniazda rozdzielacza – zmniejsza się prędkość gazu potrzebnego do upłynnienia złoża.

Z badań wynika, że dla materiałów o mniejszych średnicach zastępczych zwiększenie objętości komór naporowych pozwala szybciej upłynnić materiał rozdrobniony. Nie występuje natomiast wpływ objętości komór naporowych na strukturę złoża (spadek  $\Delta p_{zr}$  jest praktycznie stały).

Badania wskazują również, że dla obu układów odsunięcie tarczy od głowicy rozdzielacza gazu o  $s = 1,25$  mm i  $s = 2,5$  mm powoduje zmniejszanie się obszaru pracy aparatu poprzez podwyższanie dolnej prędkości pulsofluidyzacji przy praktycznie stałej górnej prędkości pulsofluidyzacji.

## Wnioski

Zastosowanie podczas badań rzeczywistego materiału porównawczego potwierdziło, że dla materiałów średnio fluidyzujących badany układ może służyć do suszenia materiałów wymagających większych ilości gazu (w pierwszym okresie suszenia).

Porównanie wyników badań w aparacie z powiększoną objętością komory naporowej i w zwykłej objętości pozwala stwierdzić, że zwiększanie strumienia wstępnego powoduje zwiększenie zużycia gazu i wzrost dolnej prędkości pulsofluidyzacji.

W obydwu aparatach występuje również obniżenie oporów przepływu przez rozdzielacz gazu przy zachowaniu oscylującego ruchu cząstek złoża w porównaniu do aparatu starej konstrukcji.

Zastosowanie zwiększonej objętości komór naporowych pozwala na dodatkowe obniżenie oporów przepływu gazu.

Z badań wynika również wniosek, że dla materiałów o małej średnicy zastępczej zastosowanie komory o powiększonej objętości prowadzi do szybszego upłynnienia złoża.

## Oznaczenia

- $d_z$  – średnica zastępcza, [m]
- $f$  – częstotliwość, [1/s]
- $H_0$  – wysokość złoża, [m]
- $s$  – odsunięcie, [m]
- $w$  – prędkość, [m/s]
- $\Delta p$  – spadek ciśnienia, [ $\text{N/m}^2$ ]

## Indeksy dolne i górne

- $g, d$  – górny, dolny
- $m$  – modyfikowana
- $pf$  – pulsofluidyzacji
- $r$  – robocza
- $zr$  – zredukowana

## LITERATURA

- Gawrzyński Z., Glaser R., 1996. Drying in a pulsed-fluid bed dryer with relocated gas stream. *Drying Tech.*, **14**, 5, 1121-1172. DOI: 10.1080/07373939608917142
- Gawrzyński Z., Pieczaba B., 2000. *Pulse-fluid bed dryer with zoned lengthwise pulsation* [in:] Proceedings of the 12<sup>th</sup> IDS, Noordwijkerhout, Netherlands, paper no 353
- Gawrzyński Z., Rychlik M., 2002. Pulsed fluid-bed system with relocated gas stream and modified pulsation. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa (Chem. Proc. Eng.)*, **23**, nr 4, 535-547
- Ginzburg A.S., Riezhikow, W.A., 1969. *Suszenie produktów spożywczych metodą fluidyzacji*, WNT, Warszawa
- Glaser R., Gawrzyński Z., 1990. Drying of sliced vegetables in PFB. *Zesz. Nauk., Akad. Ekon., Wrocław*, **528**
- 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