

Marek OCHOWIAK

e-mail: marek.ochowiak@put.poznan.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

## Koncepcja atomizera pęcherzykowo-wirowego z analizą oporów przepływu

### Wstęp

Rozpylanie cieczy jest ważną operacją jednostkową powiązaną z innymi operacjami, jak: aglomeracja, suszenie rozpyłowe czy malowanie rozpryskowe [Orzechowski i Prywer, 1991; Tarr i in., 1999; Liu, 2000; Williams i in., 1999; Cueman i Primus, 2004; Crowe, 2006].

Rozpylanie typu pęcherzykowego jest jedną z metod rozpylania dwufazowego wykorzystującą stosunkowo niewielkie ilości gazu w postaci pęcherzyków dostarczanych do fazy ciekłej wewnątrz atomizera, tuż przed jej rozpyleniem [Lefebvre, 1989; Lefebvre, 1996; Petersen, 2004; Petersen i in., 2004; Orzechowski i Prywer, 2008]. Atomizery pęcherzykowe należą do kategorii rozpylaczy z wewnętrznym mieszaniami [Sovani i in., 2001].

Znajomość współczynnika wypływu jest niezwykle istotna w projektowaniu atomizerów i ich systemów kontrolnych. Współczynnik wypływu  $C_D$  jest ważnym parametrem opisującym przepływ cieczy [Chen i Lefebvre, 1994; Miller, 1996; Catlin i Swithenbank, 2001; Ramamurthi i in., 2009]. Współczynnik wypływu definiowany jest jako stosunek rzeczywistego strumienia objętości przepływającego przez atomizer do strumienia teoretycznego. Wartość współczynnika wypływu dla przepływu jednofazowego przy wypływie z otworu o ostrych krawędziach wykonanego w cienkiej ścianie zbiornika zależy głównie od współczynnika kontrakcji i mieści się w granicach  $C_D = 0,60 \div 0,62$  [Duckworth, 1983]. Opublikowane modele pozwalające przewidywać wartości współczynnika wypływu zwykle bazują na danych empirycznych [Chen i Lefebvre, 1994] lub półempirycznych [Ochowiak i in., 2010; Ramamurthi i in., 2009]. Podawane w literaturze równania ogólne zawierają jedynie informacje orientacyjne, które należy następnie sprawdzić doświadczalnie.

Przedmiotem niniejszej pracy jest nowatorski projekt atomizera pęcherzykowo-wirowego oraz badania i analiza oporów przepływu podczas dwufazowego rozpylania wody.

### Część doświadczalna

#### Projekt atomizera

W atomizerach wirowych (*swirl atomizer*) ciecz wypływa z otworu wylotowego nie całym przekrojem, lecz przekrojem pierścieniowym. Środkową część przekroju zajmuje rdzeń gazowy. Wprowadzenie do atomizera pęcherzykowego (*effervescent atomizer*) ruchu wirowego ma na celu dodatkowe osłabienie pierścieniowej struktury przepływu i wytworzenie struktury pęcherzykowo-filmowej. W rezultacie uzyskany spray może charakteryzować się mniejszymi średnicami kropeł. W atomizerze pęcherzykowo-wirowym wykorzystano siłę odśrodkową (ruch wirowy) zwiększającą efektywność mieszania układu gaz – ciecz. Charakter przepływu wywołanego w atomizerze jest w zasadzie podobny do procesu, jaki zachodzi w typowym atomizerze pęcherzykowym. Siła powodująca mieszanie układu dwufazowego jest jednak większa, co wynika z rotacji cieczy w komorze mieszania.

Na rys. 1 przedstawiono zaproponowaną konstrukcję atomizera pęcherzykowo-wirowego. Przewód wlotowy cieczy wprowadzono stycznie do ścianki wewnętrznej atomizera. Wylot umieszczono analogicznie do rozwiązań konstrukcyjnych aparatury chemicznej, przykładowo hydrocyklonów. Zawirowanie strumienia zwiększa się w miarę zwiększania wartości natężenia przepływu strumienia cieczy. W osi symetrii atomizera umieszczono aerator, za pomocą którego do komory mieszania podawano gaz w postaci pęcherzyków.



Rys. 1. Konstrukcja atomizera pęcherzykowo-wirowego

#### Opory przepływu

Badania wykonano na stanowisku pomiarowym opisanym szczegółowo we wcześniejszej pracy [Ochowiak M. i inni, 2010]. Badania testowe przeprowadzono dla atomizera o średnicy otworu wylotowego  $d_o = 2$  mm w zakresach zmienności natężenia przepływu wody od 0,0014 do 0,011 [dm<sup>3</sup>/s] i powietrza od 0,28 do 1,4 [dm<sup>3</sup>/s].

Masowe natężenie przepływu płynu (cieczy lub gazu) w atomizerze można wyznaczyć z równania:

$$\dot{m} = C_D A_o (2\rho \Delta P)^{0,5} \quad (1)$$

gdzie:  $C_D$  – współczynnik wypływu,  $A_o$  – powierzchnia przekroju poprzecznego otworu dyszy,  $\Delta P$  – spadek ciśnienia.

W przypadku przepływu jednofazowego wartość współczynnika wypływu (lub liczby *Eulera*) jest najczęściej podawana w postaci zależności od liczby *Reynoldsa*:

$$Re = \frac{w d_o \rho}{\eta} \quad (2)$$

oraz stosunku długości dyszy do jej średnicy  $l/d_o$ . Wartości współczynnika wypływu określano w oparciu o przekształcenie równ. (1):

$$C_D = \frac{w \rho}{(2\rho \Delta P)^{0,5}} \quad (3)$$

gdzie:  $w$  – prędkość przepływu płynu przez dyszę.

Z analizy równ. (3) wynika, że istnieje prosta zależność między współczynnikiem wypływu a liczbą *Eulera*:

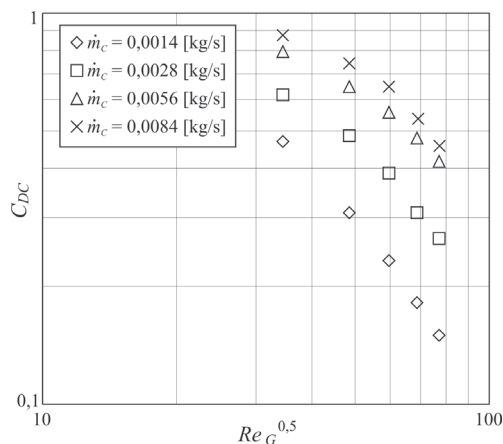
$$Eu = \frac{\Delta P}{w^2 \rho} = \frac{C_D^2}{2} \quad (4)$$

Dla przepływu dwufazowego w literaturze najczęściej podaje się zależność  $C_D$  od stosunku masowego natężenia przepływu gazu do masowego natężenia przepływu cieczy zdefiniowanego równaniem:

$$GLR = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_C} \quad (5)$$

#### Analiza wyników badań

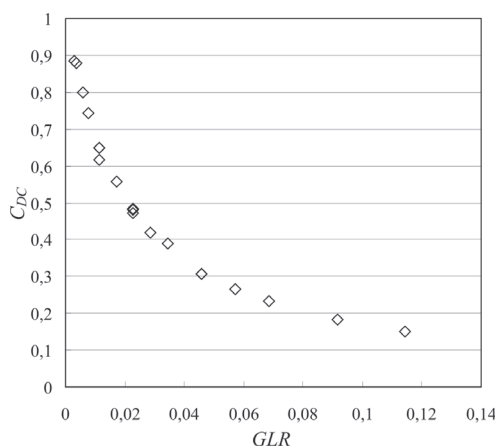
Wyniki badań nad oporami przepływu analizowano w formie zależności  $C_D$  od liczby *Reynoldsa* i *GLR*. Na rys. 2 przedstawiono zależność współczynnika wypływu dla cieczy od liczby *Reynoldsa* dla gazu i róż-



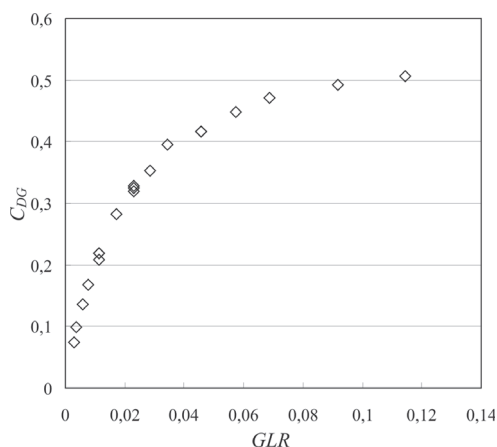
Rys. 2. Zależność współczynnika wypływu dla cieczy od liczby Reynoldsa dla gazu i masy strumienia cieczy

nych wartości masowych strumieni cieczy. Wykazano, że współczynnik wypływu zależy od natężenia przepływu gazu oraz w mniejszym stopniu od natężenia przepływu cieczy.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono zależność współczynnika wypływu dla cieczy i gazu od  $GLR$ .  $C_D$  jest nieliniową funkcją  $GLR$ . Wraz ze wzrostem wartości  $GLR$  współczynnik wypływu dla cieczy maleje, co oznacza wzrastające z natężeniem przepływu gazu opory przepływu dla cieczy.



Rys. 3. Zależność współczynnika wypływu dla cieczy od  $GLR$



Rys. 4. Zależność współczynnika wypływu dla gazu od  $GLR$

Wzrost strumienia gazu w stosunku do strumienia cieczy powoduje zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego otworu wylotowego atomizera zajmowanej przez ciecz, a zatem cieczy „trudniej” przepłynąć przez otwór o zmniejszonej powierzchni. Z analizy zależności

przedstawionej na rys. 4 wynika, że wartość współczynnika wypływu dla gazu wzrasta ze wzrostem  $GLR$ . Związane jest to ze zmniejszającym się polem powierzchni przekroju poprzecznego otworu wylotowego zajmowanym przez ciecz (przy zachowaniu stałego natężenia przepływu gazu).

Analiza wyników badań wykazała, że zaprojektowany atomizer łączy w sobie zalety atomizerów pęcherzykowych i wirowych. Opory przepływu są tylko nieznacznie większe od zmierzonych oporów dla typowych atomizerów pęcherzykowych [Ochowiak i in., 2010].

## Wnioski

W pracy przedstawiono analizę zagadnienia rozpylania typu pęcherzykowego wykorzystującego ruch wirowy cieczy. Zaproponowano rozwiązanie konstrukcyjne atomizera pęcherzykowo-wirowego oraz przeanalizowano opory przepływu dwufazowego dla tego atomizera.

- jednym ze sposobów poprawy prowadzenia procesu rozpylania i jego optymalizacji jest zastosowanie ruchu wirowego strumienia cieczy,
- zaprojektowany atomizer łączy w sobie zalety atomizerów pęcherzykowych i wirowych,
- opory przepływu zależą od natężenia przepływu gazu oraz w mniejszym stopniu od natężenia przepływu cieczy.

Uzyskane wyniki mogą być przydatne w praktyce projektowej atomizerów i systemów rozpylania.

## LITERATURA

- Catlin C.A., Swithenbank J., 2001. Physical processes influencing effervescent atomizer performance in the slug and annular flow regimes. *Atomization and Sprays* 11, 575-595
- Chen S.K., Lefebvre A.H., 1994. Discharge coefficients for plain-orifice effervescent atomizers. *Atomization and Sprays* 4, 275-290
- Crowe C.T., 2006. *Multiphase Flow Handbook*. Taylor and Francis Group, Boca Raton
- Cueman M.K., Primus R.J., 2004. *System and method for effervescent fuel atomization*. US Patent Application Publication, US 2004/0255873 A1.
- Duckworth R.A., 1983. *Mechanika płynów*. WNT, Warszawa
- Lefebvre A.H., 1989. *Atomization and Sprays*. Hemisphere Publishing Corporation, New York
- Lefebvre A.H., 1996. Some recent developments in twin-fluid atomization. *Part. Part. Syst. Charact.* 13, 205-216. DOI: 10.1002/ppsc.19960130307
- Liu H., 2000. *Science and Engineering of Droplets – Fundamentals and Applications*. William Andrew Publishing/Notes, New York
- Miller R.W., 1996. *Flow Measurement Engineering Handbook*. McGraw-Hill Professional, New York
- Ochowiak M., Broniarz-Press L., Rozanski J., 2010. The discharge coefficient of effervescent atomizers. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 34, nr 8, 1316-1323. DOI: 10.1016/j.expthermflsci.2010.06.003
- Orzechowski Z., Prywer J., 1991. *Rozpylanie cieczy*. WNT, Warszawa
- Orzechowski Z., Prywer J., 2008. *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*. WNT, Warszawa
- Petersen F.J., 2004. *A new approach for pharmaceutical sprays. Effervescent atomization. Atomizer design and spray characterization*. Ph.D. Thesis, The Danish University of Pharmaceutical Sciences, Department of Pharmaceutics
- Petersen F.J., Worts O., Schaefer T., Sojka P.E., 2004. Design and atomization properties for an inside-out type effervescent atomizer. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 30(3), 319-326. DOI: 10.1081/DDC-120030427
- Ramamurthi K., Sarkar U.K., Raghunandan B.N., 2009. Performance characteristics of effervescent atomizer in different flow regimes. *Atomization and Sprays* 19, 41-56. DOI: 10.1615/AtomizSpr.v19.i1.30
- Sovani S.D., Sojka P.E., Lefebvre A.H., 2001. Effervescent atomization. *Progr. Energy Combustion Sci.* 27, 483-521. DOI: 10.1016/j.pecs.2001.04.002
- Tarr Y.J., Tikk L.D., Eckerle W.A., Peters L.L., 1999. *Effervescent injector for diesel engines*. US Patent, 5,884,611
- Williams C.C., Goode M.G., Ramamurthy A.V., 1999. *Control of solution catalyst droplet size with an effervescent spray nozzle*. US Patent, 5,962,606

**Praca wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej DS ICT-32/113/2012.**