

Marek OCHOWIAK<sup>1</sup>, Andżelika KRUPIŃSKA<sup>1</sup>, Sylwia WŁODARCZAK<sup>1</sup>, Magdalena MATUSZAK<sup>1</sup>, Tomasz SZULC<sup>2</sup>

marek.ochowiak@put.poznan.pl

<sup>1</sup>Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

<sup>2</sup>Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań

## Badania przepływu dwufazowego w stożkowych rozpylaczach wirowych

### Wstęp

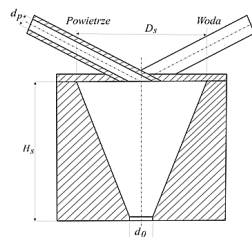
Rozpylanie cieczy jest procesem o bardzo dużym znaczeniu praktycznym, który znajduje zastosowanie w takich dziedzinach gospodarki, jak energetyka, przemysł maszynowy, transport i komunikacja, gospodarka rolna, inżynieria chemiczna, ochrona środowiska i inne. Dotąd stale rośnie zapotrzebowanie na zróżnicowane i coraz to bardziej udoskonalane rozpylacze. Wśród rozpylanych cieczy zdecydowanie przeważają paliwa i woda lecz coraz bardziej rozszerza się zakres zastosowania rozpylania cieczy [Orzechowski i Prywer, 1991; Broniarz-Press i in., 2016].

W ciągu ostatnich lat zauważa się znaczny wzrost zainteresowania techniką rozpylania dwufazowego (pneumatycznego i pęcherzykowego). Ze względu na wiele zalet, rozpylanie dwufazowe wyróżnia się spośród innych metod rozpylania. Główne zalety omawianych rozpylaczy wynikają z niskiej wrażliwości na właściwości reologiczne rozpylanej cieczy oraz szerokiego zakresu natężeń przepływu cieczy, co zapewnia dobre rozpylanie [Ramamurthi i in., 2009].

Spadek ciśnienia gazu i cieczy podczas rozpylania dwufazowego jest bardzo słabo opisany w literaturze. Ogromny wpływ na przebieg i efektywność rozpylania ma konstrukcja rozpylacza [Lefebvre 1989; Orzechowski i Prywer, 1991; Broniarz-Press i in., 2010]. Rozpylacz pęcherzykowy, do którego doprowadzana jest sama ciecz, pracuje jako rozpylacz strumieniowy. Stanowi on jednocześnie pewien układ odniesienia, który jest stosunkowo dobrze opisany w literaturze [Lefebvre 1989; Orzechowski i Prywer, 2008]. Niemal wszystkie podawane w literaturze równania są jedynie orientacyjne. Dla konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego rozpylacza należy je sprawdzić doświadczalnie. Największe znaczenie praktyczne mają więc równania empiryczne [Broniarz-Press i in., 2010; Ochowiak 2014].

### Badania doświadczalne

**Aparatura.** Do najważniejszych elementów stanowiska pomiarowego należały: rozpylacze wirowe, zbiornik ze stali kwasoodpornej, pompa CHI 2-30 firmy Grunfos Poland, rotametry firmy Krohne Messtechnik typu VA 40, węzownica, termometr cyfrowy Center 309, sprężarka Metabo Mega350-100D. Za pomocą cyfrowego miernika ciśnienia DigiComb 1900 sprawdzano wartości spadku ciśnienia na badanych rozpylaczach (Rys. 1). Zastosowano rozpylacze wirowe z dwoma króćcami wlotowymi o średnicy  $d_p = 4$  mm. Średnica komory wirowej  $D_s$  (pełniącej funkcję komory mieszania fazy gazowej z ciekłą) wynosiła 20 i 40 mm, a jej wysokość  $H_s$  zmieniano od 20 do 80 mm.



Rys. 1. Badane rozpylacze wirowe

Średnica otworu wylotowego  $d_0$  wynosiła 2,5 mm. Badania przeprowadzono w zakresie natężeń przepływu gazu poniżej  $5,6 \cdot 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] i cieczy  $1,11 \cdot 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>/s] i w temperaturze  $T = 20 \pm 1$  °C.

**Metodyka.** Znajomość oporów przepływu, wyrażonych przez wartość współczynnika wypływu:

$$C_D = \frac{w_c \rho_c}{(2\rho_c \Delta P)^{0.5}} \quad (1)$$

lub liczbę Eulera:

$$Eu = \frac{\Delta P}{w_c^2 \rho_c} = \frac{C_D^{-2}}{2} \quad (2)$$

jest bardzo ważna z punktu widzenia projektowania rozpylaczy [Catlin i Swithenbank, 2001; Sovani i in., 2001; Ochowiak, 2012; Ochowiak, 2014]. W literaturze dotyczącej przedmiotowego zagadnienia wartości  $C_D$  i  $Eu$  są najczęściej korelowane od prędkości przepływu w liczonej w przekroju poprzecznym otworu wylotowego rozpylacza lub bezwymiarowej liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{w d_0 \rho}{\eta} \quad (3)$$

gdzie:  $w$  jest prędkością przepływu płynu (indeks  $c$  oznacza ciecz,  $g$  – gaz),  $\rho$  jest gęstością płynu,  $\eta$  – lepkością płynu,  $\Delta P$  – spadkiem ciśnienia na rozpylaczu. Wielkości kropeł określano przy użyciu analizatora Spraytec firmy Malvern Instruments pozwalającego na automatyczne pomiary in-situ aerozoli o dużym stężeniu. Pomiary wykonywano w czasie rzeczywistym z przesunięciem liniowym równym 50 mm. Aparat umożliwiał pomiar średnic kropeł w zakresie od 0,1 do 2000  $\mu$ m. Pełną automatyzację pomiarów uzyskano przy użyciu standardowych procedur pomiarowych (SOP). Dalszej analizie poddano uzyskane wartości średnich objętościowo-powierzchniowych średnic kropeł opisanych zależnością:

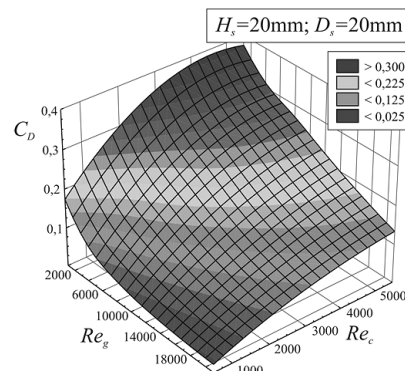
$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=n} N_i d_i^2} \quad (4)$$

gdzie:  $i$  jest zakresem wielkości,  $N_i$  – liczbą kropeł w zakresie  $i$ , a  $d_i$  – średnicą środkową zakresu wielkości  $i$ .

### Wyniki i analiza

Na rys. 2 przedstawiono przykładową zależność współczynnika wypływu od liczb Reynoldsa dla gazu i cieczy.

Wykazano, że wartość współczynnika wypływu cieczy dla przebadanych konstrukcji rozpylaczy wzrasta wraz ze zwiększaniem



Rys. 2. Przykładowa zależność współczynnika wypływu od liczb Reynoldsa dla gazu i cieczy

wartości  $Re_c$ , natomiast wraz ze wzrostem wartości  $Re_g$  – maleje. Wykazano ponadto, że wartość współczynnika wypływu wzrasta ze wzrostem wartości  $D_s$  i maleje ze wzrostem  $H_s$ .

Z analizy uzyskanych danych doświadczalnych zależności liczby Eulera od liczb bezwymiarowych ( $Re_g$ ,  $Re_c$ ,  $Fr_g$  oraz modułów geometrycznych rozpylacza  $H_s/d_0$ ,  $D_s/d_0$ ) uzyskano następującą zależność empiryczną:

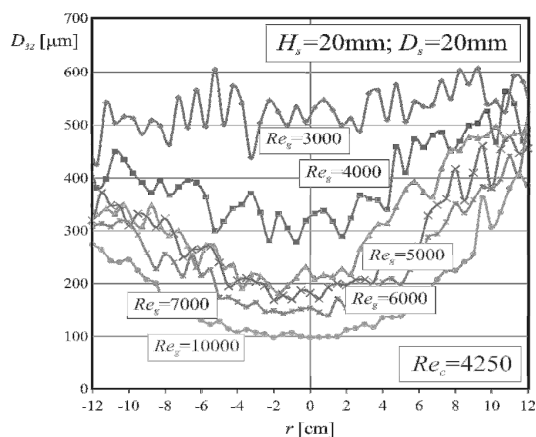
$$Eu = Re_g^{1,53} Re_c^{-1,88} Fr_g^{0,28} \left(\frac{D_s}{d_0}\right)^{-0,07} \left(\frac{H_s}{d_0}\right)^{0,05} \pm 15\% \quad (5)$$

w której liczbę Froude'a opisuje równanie:

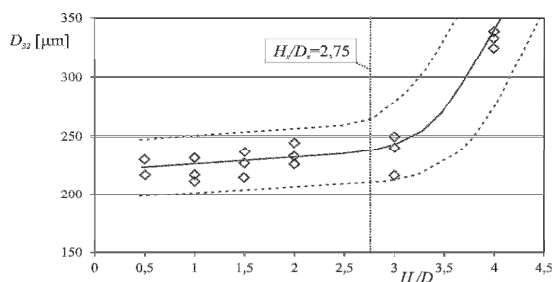
$$Fr_g = \frac{w_g^2}{g \cdot d_0} \quad (6)$$

Zaproponowane równanie jest słuszne w zakresie zmienności bezwymiarowych liczb kryterialnych  $Re_g \in (990;19800)$ ,  $Re_c \in (700;5660)$  i  $Fr_g \in (1300;523000)$  oraz modułów geometrycznych  $H_s/d_0 \in (8;32)$  i  $D_s/d_0 \in (8;16)$ . Do opracowania nieliniowej estymacji metodą najmniejszych kwadratów z algorytmem optymalizacji nieliniowej *Levenberga-Marquardta* użyto oprogramowania *Statistica 12*. Wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosi 0,994. Rozbieżności pomiędzy wartościami uzyskanymi doświadczalnie i wartościami uzyskanymi z równ. (5) nie przekraczają  $\pm 15\%$ .

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy promieniowy rozkład średnic średnic kropelek w uzyskiwanym aerozolu. Jak widać, ze wzrostem natężenia przepływu gazu centralny obszar strugi zaczynają wypełniać krople o coraz to mniejszych średnicach. Wzrost natężenia przepływu gazu powoduje, nie tylko zmniejszenie się średnic kropelek, ale również powoduje uzyskiwanie mniej monodispersyjnego rozkładu średnic kropelek. Dla liczby Reynoldsa  $Re_g = 3000$  wartości średnic kropelek  $D_{32}$  w osi aerozolu i na jego obrzeżach są zbliżone. Przy wartości  $Re_g = 10000$  wartości  $D_{32}$  w osi aerozolu i na jego obrzeżach różnią się 3-4 krotnie.



Rys. 3. Rozkład średnic średnic kropelek w strumieniu cieczy ( $r$  – odległość od osi aerozolu)



Rys. 4. Zależność średniej objętościowo-powierzchniowej średnicy kropli od stosunku  $H_s/D_s$ , dla  $Re_g = 7000$  i  $Re_c = 4250$

Na rys. 4 przedstawiono wybraną zależność  $D_{32}$  od stosunku  $H_s/D_s$ . Wykazano, że średnica zastępcza kropli wzrasta wraz ze

wzrostem wartości  $H_s/D_s$  do wartości  $H_s/D_s \approx 2,75$ . Należy nadmienić, że zaobserwowane zmiany w wartościach  $D_{32}$  przy wartościach  $H_s/D_s < 2,75$  są niewielkie. Dalszy wzrost wartości  $H_s/D_s$  skutkuje gwałtownym wzrostem wartości  $D_{32}$ . Uzyskane dane doświadczalne częściowo potwierdzają doniesienia literaturowe [Elkoth *et in.*, 1978], które sugerują, że najmniejsze krople uzyskać można dla wartości  $H_s/D_s = 2,75$ , przy czym przebadano rozpylacze o wartościach  $H_s/D_s \in (0,25;4)$ . Literatura [Jones, 1982] wskazuje również, że wielkości kropelek (mediana) wzrastają ze wzrostem wartości  $H_s/D_s$  w potęgę 0,07 dla przebadanych rozpylaczy o wartościach  $H_s/D_s \in (0,31;1,26)$ .

## Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nad oporami przepływu dwufazowego dla rozpylaczy wirowych z dwoma króćcami wlotowymi. Określono wpływ wysokości i średnicy komory mieszania na wartość współczynnika wypływu. Zaproponowano ponadto równanie korelacyjne (5) pozwalające przewidzieć wartości współczynnika wypływu dla zadanych wielkości natężeń przepływu gazu i cieczy oraz danej konstrukcji rozpylacza.

Przeanalizowano także wpływ parametrów pracy rozpylacza na wielkości powstających kropelek.

Wykazano, że wzrost natężenia przepływu gazu powoduje, że centralny obszar strugi zaczynają wypełniać krople o mniejszych średnicach co skutkuje uzyskaniem szerszej krzywej rozkładu liczbowego/objętościowego średnic kropelek w aerozolu. Analiza średnic powstających kropelek wykazała, że objętościowo-powierzchniowa średnica kropli wzrasta wraz ze wzrostem wartości  $H_s/D_s$ , przy czym wzrost ten jest gwałtowny powyżej wartości  $H_s/D_s \approx 2,75$ .

Uzyskane wyniki mogą posłużyć do projektowania rozpylaczy wirowych mających zastosowanie w rolnictwie, inżynierii chemicznej i ochronie środowiska.

## LITERATURA

- Broniarz-Press L., Ochowiak M., Różański J., Szaferski W., Woziwodzki S., (2010). *Przepływ trójfazowy gaz-ciecz-ciecz w dyszach rozpryskowych*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań
- Broniarz-Press L., Włodarczyk S., Matuszak M., Ochowiak M., Idziak R., Sobiech Ł., Szulc T., Skrzypczak G., (2016). The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers. *Crop Prot.*, 82, 65-74. DOI: 10.1016/j.cropro.2016.01.005
- Catlin C.A., Swithenbank J., (2001). Physical processes influencing effervescent atomizer performance in the slug and annular flow regimes. *Atom. Sprays*, 11, 575-595. DOI: 10.1615/AtomizSpr.v11.i5.60
- Elkoth M.M., Rafat N.M., Hanna M.A., (1978). *The influence of swirl atomizer geometry on the atomization performance*. Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems. Tokyo, 109-115
- Jones A.R., (1982). *Design optimization of a large pressure-jet atomizer for power-plant*. Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Liquid Atomization and Sprays. Madison, Wis., 181-185
- Lefebvre A.H., (1989). *Atomization and Sprays*. Hemisphere Pub. Corp, New York
- Ochowiak M., (2012). Koncepcja atomizera pęcherzykowo-wirowego z analizą oporów przepływu. *Inż. Ap. Chem.*, 51(6), 360-361
- Ochowiak M., (2014). *Analiza procesu rozpylania cieczy w rozpylaczach pęcherzykowych i pęcherzykowo-wirowych*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań
- Orzechowski Z., Prywer J., (1991). *Rozpylanie cieczy*. WNT, Warszawa.
- Orzechowski Z., Prywer J., (2008). *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*. WNT, Warszawa
- Ramamurthi K., Sarkar L.K., Raghunandan B.N., (2009). Performance characteristics of effervescent atomizer in different flow regimes. *Atom. Sprays*, 19, 41-56. DOI: 10.1615/AtomizSpr.v19.il.30
- Sovani S.D., Sojka P.E., Lefebvre A.H., (2001). Effervescent atomization. *Prog. Energy Comb. Sci.*, 27, 483-521. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00029-0

**Praca została wykonana w ramach projektu 03/32/DSPB/0702 finansowanego przez MNiSW.**