

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Marek OCHOWIAK, Sylwia WŁODARCZAK, Magdalena MARKUSZEWSKA

e-mail: lubomira.broniarz-press@put.poznan.pl

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

Analiza współczynnika wypływu cieczy dla rozpylaczy wirowych o różnych kształtach otworu wylotowego

Wstęp

Rozpylacze wirowe są najpopularniejszymi ze wszystkich rodzajów rozpylaczy, głównie ze względu na prostą budowę, dużą pewność działania, niskie zużycie energii, wysoką jakość rozpylenia, a także przystępną cenę. Urządzenia te znalazły przemysłowe zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. w procesach spalania, suszenia, malowania oraz w ochronie roślin. W rozpylaczach wirowych wprowadzona ciecz zawirowuje wewnątrz komory wirowej w wyniku działania siły odśrodkowej, a następnie wypływa z niej w postaci błony, która łatwo ulega rozpadowi na krople, opuszczające otwór wylotowy [Lefebvre, 1989; Nasr i in., 2002; Khavkin, 2004; Garcia-Villalba i Frohlich, 2006; Orzechowski i Prywer, 2008; Hamid i Atan, 2009; Lee i in., 2010; Shanshan i in., 2012].

Podstawowym parametrem charakteryzującym rozpylacze wirowe jest współczynnik wypływu. Wartość współczynnika wypływu zależy od strat ciśnienia w dyszy. Na jego wartość wpływają liczba Reynoldsa, stosunek długości do średnicy otworu wylotowego, ciśnienie wtrysku, ciśnienie otoczenia i kawitacja [Lefebvre, 1989; Orzechowski i Prywer, 2008; Lee i in., 2010]. Współczynnik wypływu pozwala na określenie charakteru przepływu cieczy przez rozpylacz. Przyjmuje on różne wartości w zależności od zakresu przepływu: laminarnego, przejściowego i turbulentnego. Jednak w praktyce największe znaczenie ma zakres turbulentny. Znajomość wartości tego współczynnika jest istotna w procesie projektowania rozpylaczy i ich systemów kontrolnych. Wartość współczynnika wypływu można wyznaczyć korzystając z zależności [Hamid i Atan, 2009; Ochowiak i in., 2010]:

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

gdzie:

w_c – prędkość przepływu cieczy w przekroju poprzecznym otworu wylotowego [m/s]

ρ_c – gęstość cieczy [kg/m³]

ΔP – spadek ciśnienia [Pa]

W literaturze zagadnienia znaleziono kilka równań opisujących C_D dla rozpylaczy wirowych. W pracy [Jones, 1982] przedstawiono następujące równanie korelacyjne na C_D :

$$C_D = 0,45 Re_c^{-0,02} \left(\frac{l_0}{d_0}\right)^{-0,03} \left(\frac{L_S}{D_S}\right)^{0,05} K^{0,52} \left(\frac{D_S}{d_0}\right)^{0,23} \quad (2)$$

gdzie:

l_0 – długość otworu wylotowego [m]

d_0 – średnica otworu wylotowego [m]

L_S – długość komory wirowej [m]

D_S – średnica komory wirowej [m]

K – wskaźnik geometryczny rozpylacza definiowany jako:

$$K = \frac{A_i}{D_S d_0} \quad (3)$$

gdzie:

A_i – powierzchnia przekroju otworu wlotowego [m²].

Liczbę Reynoldsa opisuje wzór:

$$Re_c = \frac{w_c \rho_c d_0}{\eta_c} \quad (4)$$

gdzie:

η_c – lepkość cieczy [Pa·s].

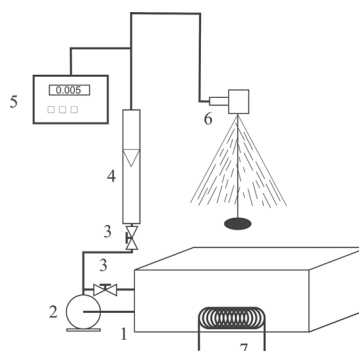
Dla rozpylaczy wirowych o niewielkich średnicach otworu wylotowego $d_0 \in (0,8, 1,9)$ mm równanie na współczynnik wypływu przyjmuje postać [Ballester i Dopazo, 1994]:

$$C_D = 1,323 \cdot 10^{-3} K^{0,29} d_0^{-0,82} \Delta P^{0,03} \quad (5)$$

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu profilu otworu wylotowego rozpylacza wirowego na charakter wypływu cieczy z dyszy oraz wyznaczenie zależności $C_D = f(Re_c)$.

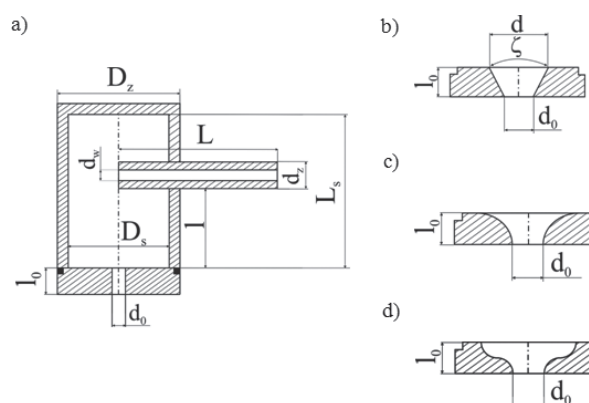
Stanowisko badawcze

Na rys. 1 przedstawiono układ pomiarowy, którego najważniejszymi elementami były: rozpylacz wirowy, rotametry cieczowe firmy Krohne Messtechnik model VA 40, cyfrowy miernik ciśnienia DigiComb 1900 firmy Teccis oraz pompa.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik, 2 – pompa, 3 – zawory, 4 – rotametr cieczowy, 5 – cyfrowy miernik ciśnienia, 6 – dysza wirowa, 7 – wężywnica

Badania doświadczalne przeprowadzono dla przepływu wody wykorzystując rozpylacz wirowy o różnych profilach otworu wylotowego (Rys. 2). Wymiary wykorzystanych podczas badań profili otworu wylotowego zestawiono w tab. 1.



Rys. 2. Schemat konstrukcji rozpylacza wirowego oraz profili otworu wylotowego: a) rozpylacz wirowy o profilu cylindrycznym (C1-C3), b) profil stożkowy (LC, SC), c) dysza profilowana (P), d) dysza podwójnie profilowana (DP)

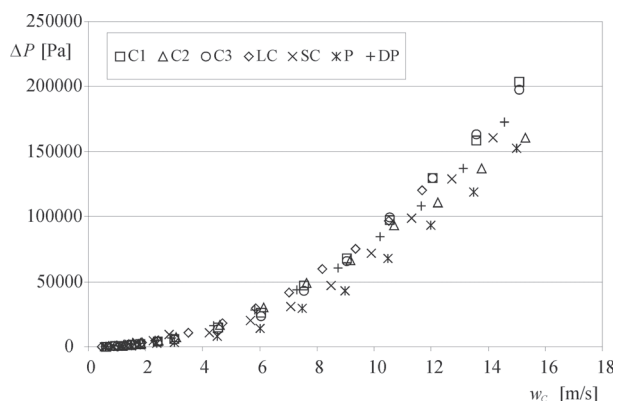
Tab. 1. Wymiary profili otworu wylotowego rozpylacza wirowego

| Profil otworu wylotowego | d_0 [m] | d [m] | l_0 [m] | l_0/d_0 |
|--------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|
| C1 | 0,00242 | - | 0,0100 | 4,13 |
| C2 | 0,00241 | - | 0,0049 | 2,04 |
| C3 | 0,00242 | - | 0,0025 | 1,01 |
| LC | 0,00275 | 0,0073 | 0,0023 | 0,84 |
| SC | 0,00250 | 0,0053 | 0,0024 | 0,96 |
| P | 0,00243 | - | 0,0024 | 0,99 |
| DP | 0,00246 | - | 0,0025 | 1,01 |

Natężenie rozpylanej wody zmieniało się w zakresie od 0,021 do 0,069 [kg/s]. Podczas wypływu wody z dyszy obserwowano spadek ciśnienia, którego wartość odczytywano z cyfrowego miernika ciśnienia.

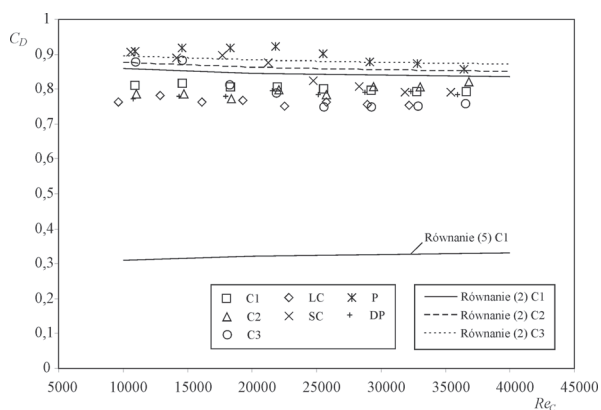
Wyniki i analiza badań doświadczalnych

Analiza wyników przeprowadzonych badań wykazała, że dla wszystkich profili otworu wylotowego rozpylacza wirowego wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy, następuje wzrost wartości spadków ciśnienia (Rys. 3). Największe spadki ciśnienia zaobserwowano dla rozpylacza z końcówkami cylindrycznymi, najmniejsze dla końcówki z otworem profilowanym P. Różnice pomiędzy spadkami ciśnienia dla przebadanych końcówek rozpylacza zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości cieczy w przekroju poprzecznym otworu wylotowego.



Rys. 3. Wykres zależności spadków ciśnienia na końcówkach rozpylacza od prędkości przepływu cieczy

Na rys. 4 przedstawiono zależność współczynnika wypływu od liczby *Reynoldsa* $C_D = f(Re_C)$ dla wszystkich otworów wylotowych. Wartości współczynnika wypływu stabilizują się i osiągają stały poziom dla przepływu turbulentnego w zakresie wartości Re_C od 10000 do 40000.



Rys. 4. Wykres zależności współczynnika wypływu cieczy od wartości liczby *Reynoldsa* dla dyszy wirowej z jednym otworem wlotowym

Wartości współczynnika C_D dla rozpylacza z cylindrycznym otworem wylotowym praktycznie nie zależą od wartości stosunku wysokości l_0 do średnicy otworu wylotowego d_0 . Najmniejszą wartość C_D wynoszącą około 0,75 odnotowano dla stosunku $l_0/d_0 = 1,01$, natomiast dla wyższych wartości współczynnik wypływu osiąga wartość rzędu 0,8. W tab. 2 zestawiono średnie wartości współczynników wypływu dla wszystkich badanych otworów wylotowych. Widoczny jest wpływ kształtu (profilu) otworu wylotowego na wartość współczynnika wypływu. Porównując rozpylacze wirowe o cylindrycznych i stożkowych otworach wylotowych można zauważyć, że rozpylacze o otworach w kształcie stożka wykazują nieznacznie wyższe wartości współczynnika wypływu, zauważalne przede wszystkim w przypadku małego stożka. Najwyższe wartości C_D rzędu 0,91 uzyskano dla profilowanych otworów wylotowych.

Tab. 2. Średnie wartości współczynnika wypływu dla badanych dysz wylotowych

| Profil otworu wylotowego | Średnia wartość współczynnika wypływu |
|--------------------------|---------------------------------------|
| C1 | 0,80 |
| C2 | 0,80 |
| C3 | 0,75 |
| LC | 0,76 |
| SC | 0,85 |
| P | 0,91 |
| DP | 0,79 |

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych porównano z danymi literaturowymi [Giffen i Muraszew, 1953; Jones, 1982; Ballester i Dopazo, 1994]. Dostrzeżono zgodność danych doświadczalnych z danymi Giffena i Muraszewa [1953], którzy dla otworów cylindrycznych podali wartość $C_D \approx 0,8$. Równanie zaproponowane przez Jonesa, [1982] daje wyniki nieznacznie zawyżone. Dane uzyskane z modelu Ballestera i Dopazo [1994] dają wyniki około trzykrotnie niższe.

Podsumowanie i wnioski

W pracy nie stwierdzono zależności współczynnika wypływu od liczby *Reynoldsa* dla rozpylacza wirowego o różnych profilach otworów wylotowych. Dla przepływu turbulentnego wartość współczynnika wypływu dla danej końcówki rozpylacza jest stała.

Przeanalizowano również wpływ kształtu (profilu) otworu wylotowego na wartość C_D . Na podstawie uzyskanych badań stwierdzono, że współczynnik wypływu przyjmuje różne wartości w zależności od kształtu otworu wylotowego. Najwyższe wartości współczynnika wypływu uzyskano dla rozpylacza wirowego o profilowanym otworze wylotowym, natomiast najniższe dla końcówek cylindrycznych.

Jak wskazują wyniki badań zastosowanie rozpylacza z profilowanym otworem wylotowym w korzystny sposób wpływa na zapotrzebowanie energii niezbędnej do rozpylenia jednostki objętości cieczy. Rozwiązanie to może znaleźć praktyczne zastosowanie, przykładowo w zabiegach agrotechnicznych. Niezbędne są jednak dalsze badania, przede wszystkim dla cieczy nienewtonowskich.

LITERATURA

- Ballester J., Dopazo C., 1994. Discharge coefficient and spray angle measurements for small pressure-swirl nozzles. *Atomization Sprays* 4, 351-367
- Garcia-Villalba M., Frohlich J., 2006. LES of a free annular swirling jet – Dependence of coherent structures on a pilot jet and the level of swirl. *Int. J. Heat Fluid Flow* 27, 911-923. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.015
- Giffen E., Muraszew A., 1953. *Atomization of Liquid Fuels*, Chapman and Hall, London
- Hamid A.H.A., Atan R., 2009. Spray characteristics of jet-swirl nozzles for thrust chamber injector. *Aerospace Sci. and Tech.* 13, 192-196. DOI: 10.1016/j.ast.2008.10.003
- Jones A.R., 1982. *Design optimization of large pressure jet atomizer for power plant*. Proceedings of the 2nd International Conference on Liquid Atomization, Madison, Wis., 181-185
- Khavkin Y.I. 2004. *Theory and Practise of Swirl Atomizers*. Taylor and Francis Group, New York
- Lee E.J., Oh S.Y., Kim H.Y., James S.C., Sam S. Yoon S.S. 2010. Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34, 1475-1483. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.07.010
- Lefebvre A.H., 1989. *Atomization and Sprays*. Hemisphere Pub. Corp., New York.
- Nasr G.G., Yule A.J., Bendig, L., 2002. *Industrial Sprays and Atomization*. Springer, London
- Ochowiak M., Broniarz-Press L., Rózański J., 2010. The discharge coefficient of effervescent atomizers. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34, 1316-1323. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.06.003
- Orzechowski Z., Prywer J., 2008. *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylanej cieczy*. WNT, Warszawa
- Shanshan Y., Zhang J., Fang T., 2012. Effect of viscosities on structure and instability of sprays from a swirl atomizer. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 39, 158-166. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.020

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 32/368/13 DS-PB.