

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Sylwia WŁODARCZAK, Marek OCHOWIAK

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

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

Analiza kąta rozpylania dla rozpylaczy o stożkowej komorze wirowej

Wstęp

Rozpylacze wirowe ze względu na bardzo dobre właściwości rozpylające są jednymi z najczęściej stosowanych rozpylaczy. Ten rodzaj rozpylaczy wykorzystywany jest m.in. w zraszacach, turbinach gazowych, kotłach czy silnikach benzynowych [Lefebvre, 1989; Moon i in., 2009; Santolaya i in., 2010; Lan i in., 2014; Sivakumar i in., 2015]. Dzięki obecności wiru swobodnego zapotrzebowanie na energię w rozpylaczach wirowych jest stosunkowo niskie, co jest wynikiem niskiej prędkości cieczy przy obwodzie komory skutkującym niskimi oporami przy ściankach. Wraz ze zbliżaniem się do osi komory prędkość ta samoczynnie rośnie, osiągając wysokie wartości przy wypływie. Struga wypływająca z rozpylacza przyjmuje początkowo postać stożkową, co powoduje znacznie szybszy rozpad błony na krople niż rozpad strugi w innych rozpylaczach.

Wśród czynników, które wpływają na proces rozpylania można wyróżnić m.in. zjawiska zachodzące wewnątrz komory rozpylacza, ciśnienie wtrysku oraz ruch powietrza. Zastosowanie komory wirowej przykładowo w silnikach Diesla sprzyja zmniejszeniu emisji zanieczyszczeń, ograniczeniu hałasu oraz zwiększeniu prędkości obrotów silnika. Komora wirowa w porównaniu do tradycyjnych komór spalania zapewnia lepszą jakość mieszanki, większą jednorodność rozkładu mieszanki paliwa z powietrzem, poprawia efektywność spalania oraz eliminuje problem nadmiernego osadzania się sadzy [Rashid i in., 2012; Wei i in., 2014].

Kąt rozpylania należy do makroparametrów opisujących strugę rozpyloną cieczy i pozwala na jej poprawne wykorzystanie, zarówno w przypadku pojedynczego rozpylacza, jak i układu kilku rozpylaczy. Kąt rozpylania jest kątem wierzchołkowym strugi kropelek, który charakteryzuje jej zewnętrzny kształt. Jednoznaczne określenie kąta rozpylania jest możliwe tylko w próżni. Na wielkość kąta rozpylania duży wpływ mają reologiczne właściwości cieczy rozpylanej, otaczający gaz oraz geometria zastosowanego rozpylacza. Ważnym parametrem wpływającym na wielkość kąta rozpylania jest lepkość cieczy, która może znacząco zmienić właściwości rozpylające wtryskiwaczy wirowych. Rozpylacze wirowe okazały się być bardzo dobre dla płynów o niskiej lepkości (woda). W przypadku płynów o wyższej lepkości, efekty dyssypacyjne dominują nad bezwładnościowymi, co niekorzystnie wpływa na proces rozpylania. [Yang i in., 2012; Yao i in., 2012; Martinez-Galvan i in., 2013]. Precyzyjne określenie wielkości kąta jest bardzo trudne, nie istnieje także żadna ogólna postać równania, pozwalająca na jego obliczenie. Najczęściej spotykane są zależności korelacyjne opisujące kąt rozpylania dla rozpylacza o konkretnej geometrii [Lefebvre, 1989; Chu i in., 2008; Moon i in., 2008; Broniarz-Press i in., 2009; Broniarz-Press i in., 2014].

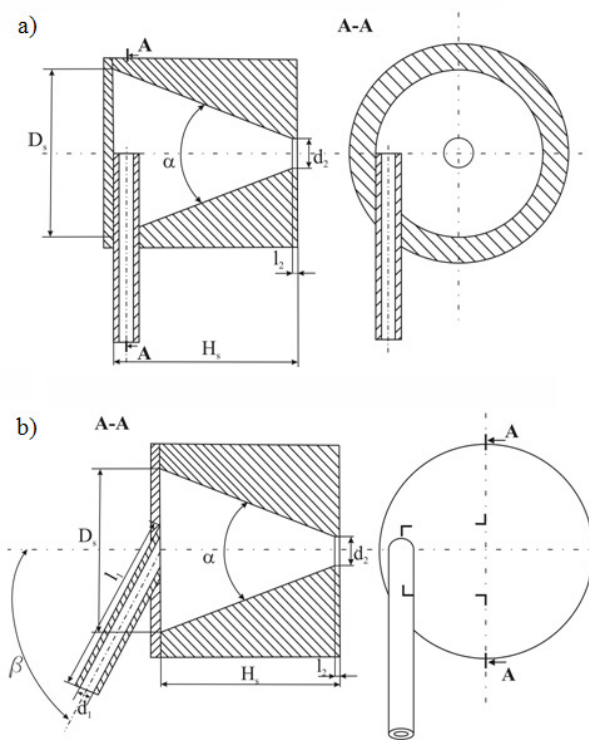
Celem przeprowadzonych badań była analiza kąta rozpylania dla rozpylaczy o stożkowej komorze wirowej w zależności od prędkości przepływu cieczy oraz konstrukcji rozpylacza.

Badania doświadczalne

Stanowisko. Głównymi elementami stanowiska pomiarowego były: rozpylacze wirowe, rotometr cieczowy typu VA 40 firmy Krohne Messtechnik, aparat cyfrowy Canon EOS D 1 Mark III i pompa Grundfoss CHI-2-20. Szczegółowy opis stanowiska przedstawiono w pracy [Broniarz-Press i in., 2014]. W badaniach użyto dziewięć rozpylaczy wirowych o różnych konstrukcjach (Rys. 1), wymiarach geometrycznych oraz charakteryzujących się różnymi sposobami wprowadzenia cieczy przez króciec wlotowy – prostopadłym lub kątowym (pod kątem $\beta = 60^\circ$) w odniesieniu do osi rozpylacza. Wszystkie badane rozpylacze posiadały stożkową komorę wirową.

Większa średnica stożka symetrycznie ściętego komory rozpylacza na poziomie wlotu oscylowała w zakresie $D_s \in (20;40)$ mm, jej wysokość przyjmowała wartości $H_s \in (15;25)$ mm, średnica króćca otworu wlotowego wynosiła $d_1 = 2,5$ mm, a średnica króćca otworu wylotowego $d_2 = 2,5$ mm. Zewnętrzna średnica króćca wlotowego wynosiła 3,5 mm, a jego długość 60 ± 1 mm.

Zakres badań. Pomiary wykonano dla wody w temperaturze $T = 20 \pm 1$ °C. Prędkość przepływu wody liczona w przekroju poprzecznym otworu wylotowego nie przekraczała wartości $w_c = 10$ [m/s].



Rys. 1. Schemat konstrukcji rozpylaczy wirowych:

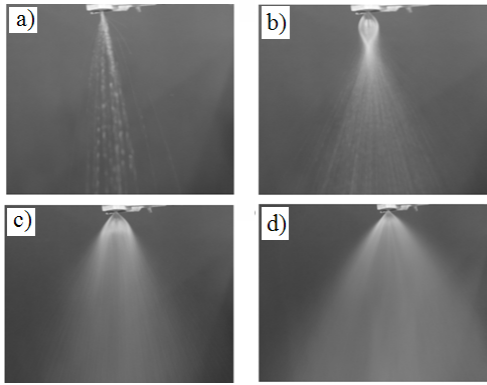
- a) rozpylacz wirowy o prostopadłym do osi rozpylacza wprowadzeniu cieczy,
b) rozpylacz wirowy o kątowym w stosunku do osi rozpylacza wprowadzeniu cieczy

Metodyka. Wizualizację procesu rozpylania cieczy przeprowadzono metodą fotograficzną. Po każdej nastawie natężenia przepływu na rotametrze, wykonywano zdjęcia strumienia rozpyloną strugę. Następnie zdjęcia wprowadzono do programu *Image Pro Plus* firmy *Media Cybernetics* w celu wykonania analizy i pomiaru kątów rozpylania. Analiza obejmowała około 3000 obrazów. Dokładność odczytu kąta rozpylania wynosiła $\pm 4^\circ$.

Wyniki i analiza

Podczas rozpylania strugi cieczy przy różnych prędkościach przepływu zaobserwowano zróżnicowane fazy rozpylania.

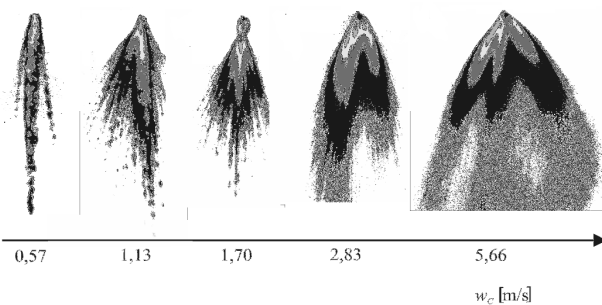
Przeprowadzona analiza danych potwierdza, że przy małej prędkości przepływu $w_c = 0,57$ [m/s] (Rys. 2a), dla każdego badanego rozpylacza, wypływająca ciecz tworzyła zwartą strugę (*faza zakrzywionego ołówka*). Następnie rozpylana struga formowała tzw. *fazę cebuli* (Rys. 2b). Fazę tę zaobserwowano przy pośredniej prędkości przepływu wody. Kolejną fazą była tzw. *faza tulipana*, która występowała przy wysokich prędkościach przepływu (Rys. 2c). Ostatnią fazą rozpylania była faza rozpylania właściwego (Rys. 2d). Stwierdzono, że faza rozpylania właściwego występuje dla wszystkich



Rys. 2. Charakterystyczne struktury rozpylanej strugi: a) faza zakrzywionego ołowka, b) faza cebuli, c) faza tulipana, d) właściwe rozpylanie

rozpylaczy po osiągnięciu prędkości przepływu równej $w_c = 4,25$ [m/s]. Opisane etapy rozpadu strugi są zgodne z danymi literaturowymi [Lefebvre, 1989]. Na rys. 3 przedstawiono przykładową wizualizację kąta rozpylania dla rozpylacza z króćcem wlotowym nachylonym pod kątem 60° w stosunku do osi rozpylacza. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu wody wzrasta wartość kąta rozpylania, a struga cieczy ulega rozpadowi na mniejsze krople. Na podstawie analizy uzyskanych obrazów wykazano, że długość zwartej strugi zmniejsza się ze wzrostem prędkości przepływu.

Zauważyć można, że przy prędkości przepływu $w_c \in (1;2)$ [m/s] od strugi odrywają się stosunkowo duże pojedyncze krople. Dla większej prędkości przepływu nie zaobserwowano dużych kropeł, a wpływ cieczy był bardziej jednorodny, drobnokroplisty.



Rys. 3. Etapy zmiany strugi w zależności od prędkości przepływu cieczy

Kąt rozpylania ϕ dla badanych rozpylaczy jest funkcją następujących parametrów:

$$tg \phi = f(\rho_c, \mu_c, w_c, d_2, D_s, H_s, A_p) \quad (1)$$

gdzie:

ρ_c – gęstość cieczy, [kg/m³]

μ_c – lepkość cieczy, [Pa·s]

A_p – sumaryczna powierzchnia przekroju stycznych otworów wlotowych [m²].

Wykorzystując analizę wymiarową wyznaczono bezwymiarową zależność kryterialną opisującą kąt rozpylania dla rozpylaczy wirowych o stożkowej komorze wirowej oraz o prostopadłym i kątowym w stosunku do osi rozpylacza wprowadzaniu cieczy przez króćcie wlotowe o postaci:

$$tg \phi = C Re_C^A \left(\frac{H_s d_2}{K'} \right)^B \quad (2)$$

gdzie liczbę Reynoldsa opisuje zależność:

$$Re_C = \frac{\rho_c d_2 w_c}{\mu_c} \quad (3)$$

natomiast K' jest wskaźnikiem geometrycznym rozpylacza wirowego ujmującym jego charakterystyczne parametry [Lefebvre, 1989]:

$$K' = \frac{A_p}{D_s d_2} \quad (4)$$

W wyniku podstawienia związku (4) do zależności kryterialnej (2) otrzymuje się:

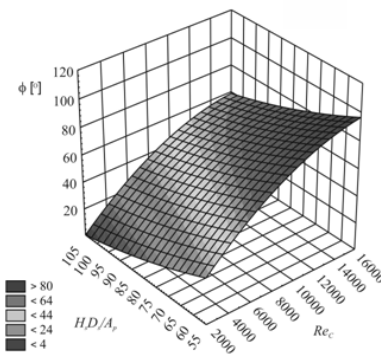
$$tg \phi = C Re_C^A \left(\frac{H_s D_s}{A_p} \right)^B \quad (5)$$

Szczegółowe wartości wykładników A i B w równaniu (5) przedstawiono w tab. 1. Wartości stałych A i B zostały wyznaczone przy użyciu programu *Statistica*.

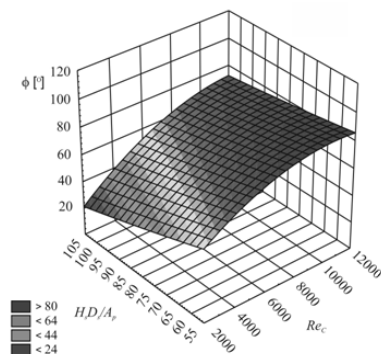
Tab. 1. Wartości stałych (na poziomie ufności: 95%) w równ. (5)

Stała	Wartość	Średni błąd standardowy
Rozpylacz wirowy o prostopadłym do osi rozpylacza króćcu wlotowym		
A	1,03	0,13
B	-1,87	0,28
Rozpylacz wirowy o króćcu wlotowym nachylonym pod kątem 60°		
A	1,39	0,15
B	-2,78	0,32

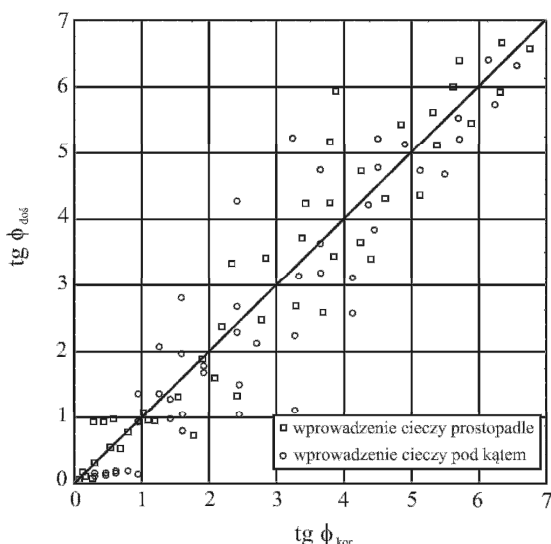
Na rys. 4 i 5 przedstawiono wyniki pomiarów w zależności od liczby Reynoldsa i charakterystycznego modułu geometrycznego dla badanych rozpylaczy. Wykazano, że wartość kąta rozpylania wzrasta wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa i maleje ze wzrostem modułu $H_s D_s / A_p$. Wpływ parametrów geometrycznych na wartość kąta rozpylania jest bardziej widoczny dla rozpylaczy wirowych o prostopadłym sposobie wprowadzenia cieczy przez króćcie wlotowy niż dla rozpylaczy o króćcu wlotowym nachylonym pod kątem 60° do osi rozpylacza. Może być to wynikiem zjawisk towarzyszących wlotowi cieczy do komory wirowej oraz różnego sposobu tworzenia się wiru wewnątrz niej. Wartości kątów uzyskane dla rozpylaczy o prostopadłym sposobie wprowadzenia cieczy porównano z wartościami kąta rozpylania przedstawionymi w pracy [Broniarz-Press i in., 2014], w której badano rozpylacze o cylindrycznej komorze wirowej. Konstrukcje rozpylaczy były bardzo zbliżone.



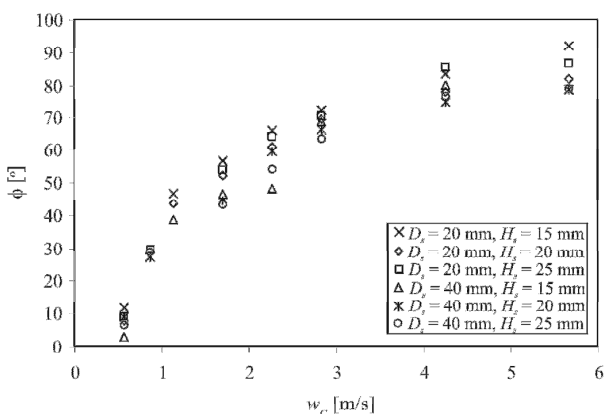
Rys. 4. Obraz zależności korelacyjnej dla rozpylacza wirowego o króćcu wlotowym umieszczonym prostopadle w stosunku do osi rozpylacza



Rys. 5. Obraz zależności korelacyjnej dla rozpylacza wirowego o króćcu wlotowym nachylonym pod kątem 60° do osi rozpylacza



Rys. 6. Porównanie danych doświadczalnych z danymi uzyskanymi z równ. (5)



Rys. 7. Zależność kąta rozpylania od prędkości przepływu wody dla rozpylaczy o króćcu wlotowym nachylnym pod kątem 60° do osi rozpylacza

W przypadku rozpylaczy o cylindrycznej komorze wirowej otrzymano kąty o mniejszej wartości niż dla wykorzystanych w badaniu rozpylaczy o stożkowej komorze wirowej w takim samym zakresie prędkości przepływu wody.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie danych doświadczalnych i danych uzyskanych z równ. (5). Dane doświadczalne są zgodne z danymi otrzymanymi z zaproponowanej zależności kryterialnej (5).

Zaobserwowano także, że na wartość kąta rozpylania wpływają średnica i wysokość komory stożkowej rozpylacza. Na rys. 7 przedstawiono zależność kąta rozpylania od prędkości przepływu dla rozpylaczy różniących się średnicą i wysokością komory. Stwierdzono, że przy niezmienności innych parametrów geometrycznych, większe kąty rozpylania obserwuje się dla rozpylacza o mniejszej średnicy. Na podstawie otrzymanych wyników można także wnioskować, że dla badanych wysokości stożka rozpylacza, korzystniejsze wydaje się zastosowanie rozpylacza o mniejszej wartości H_s . Zmniejszenie wielkości kąta ze wzrostem wysokości komory wirowej może wynikać ze spadku momentu ruchu w wyniku powstania dodatkowego oporu tarcia.

Podsumowanie i wnioski

Wykazano, że wartość kąta rozpylania zależy od prędkości przepływu cieczy oraz konstrukcji rozpylacza. Wartość kąta rozpylania wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy. Kątowe wprowadzenie cieczy do rozpylacza daje większe wartości kąta rozpylania niż wprowadzenie prostopadłe do osi.

W oparciu o analizę wymiarową wyznaczono zależność kryterialną

tangensa kąta rozpylania od liczby *Reynoldsa* i parametrów geometrycznych rozpylacza. Wartość kąta rozpylania wzrasta ze wzrostem liczby *Reynoldsa* i maleje ze wzrostem modułu $H_s D_s / A_p$.

Zaobserwowano także, że na wartość kąta rozpylania wpływają średnica i wysokość komory stożkowej rozpylacza. Przy niezmienności innych parametrów geometrycznych, większe kąty rozpylania występują dla rozpylacza o mniejszej średnicy. Na podstawie otrzymanych wyników można także wnioskować, że dla badanych wysokości stożka rozpylacza, korzystniejsze wydaje się zastosowanie rozpylacza o mniejszej wartości H_s . Zmniejszenie wielkości kąta ze wzrostem wysokości komory wirowej może wynikać ze spadku momentu ruchu w wyniku powstania dodatkowego oporu tarcia.

Na wielkość kąta wpływają także średnica i wysokość komory stożkowej rozpylacza. Kąt rozpylania maleje wraz ze wzrostem średnicy rozpylacza. Mniejsza wysokość komory wpływa korzystnie na wielkość kąta rozpylania. Zastosowanie stożkowej komory wirowej poprawia proces rozpylania w porównaniu do komory cylindrycznej.

Uzyskane dane mogą być istotne przy prawidłowym projektowaniu różnych urządzeń. Przykładem mogą być tradycyjne komory spalania turbin gazowych. Konieczne jest jednak przeprowadzenie dalszych badań dla rozpylaczy o stożkowej komorze wirowej i różnym sposobie wprowadzania cieczy przez króćce wlotowy z wykorzystaniem cieczy o różnej lepkości.

LITERATURA

- Broniarz-Press L., Ochowiak M., Szaferski W., Mazurek A., 2006. Analiza jedno- i dwufazowego rozpylania wodnych roztworów soli sodowej karboksymetylocelulozy. *Inż. Ap. Chem.*, **45**, nr 6, 27-28
- Broniarz-Press L., Ochowiak M., Włodarczyk S., Matuszak M., Maciejewska A., 2014. Analiza kąta rozpylania dla rozpylaczy wirowych. *Inż. Ap. Chem.*, **53**, nr 4, 227-228
- Chu C.C., Chu S.F., Lin H.I., Liann Y.H., 2008. An experimental investigation of swirl atomizer sprays. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 11-22. DOI: 10.1007/s00231-008-0389-1
- Lan Z., Zhu D., Tian W., Su G., Qiu S., 2014. Experimental study on spray characteristics of pressure-swirl nozzles in pressurizer. *Ann. Nucl. Energy*, **63**, 215-227. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.07.048
- Lefebvre A.H., 1989. *Atomization and Sprays*. Hemisphere Pub.Corp., New York.
- Martínez-Galvan E., Anton R., Ramos J. C., Khodabandeh R., 2013. Effect of the spray cone angle in the spray cooling with R134a. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **50**, 127-138. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2013.05.012
- Moon S., Abo-Serie E., Bae C., 2008. The spray characteristics of a pressure-swirl injector with various exit plane tilts. *Int. J. Multiphase Flow* **34**, 615-627. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.01.003.
- Moon S., Abo-Serie E., Bae C., 2009. Air flow and pressure inside a pressure-swirl spray and their effects on spray development. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **33**, 222-231. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2008.08.005
- Rashid M.S.F.M., Hamid A.H.A., Sheng O.C., Ghaffar Z.A., 2012. Effect of inlet slot number on the spray cone angle and discharge coefficient of swirl atomizer. *Procedia Eng.*, **41**, 1781-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.383
- Sivakumar D., Vankeswaram S.K., Sakthikumar R., Raghunandan B.N., 2015. Analysis on the atomization characteristics of aviation biofuel discharging from simplex swirl atomizer. *Int. J. Multiphase Flow*, **75**, 88-96. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.02.009.
- Wei S., Ji K., Leng X., Wang F., Liu X., 2014. Numerical simulation on effects of spray angle in a swirl chamber combustion system of DI (direct injection) diesel engines. *Energy*, **75**, 289-294. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.076
- Yao S., 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.expthermflusc.2012.01.020
- Yang L., Fu Q., Qu Y., Zhang W., Du M., Xu B., 2012. Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors. *Fuel* **97**, 253-261. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.036

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 03/32/DSMK/0522 i 03/32/DSPB/0502.