

Krystian CZERNEK, Gabriel FILIPCZAK, Stanisław WITCZAK

e-mail: k.czernek@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Identyfikacja grubości filmu cieczy bardzo lepkiej w przepływie pierścieniowym

### Wstęp

W literaturze tematycznej przedmiotu [1–5], zwraca uwagę bardzo mała liczba prac związanych z badaniami dynamiki pierścieniowego dwufazowego przepływu gazu i cieczy bardzo lepkiej. Celem określenia zjawisk przepływowych zachodzących przy współprądowym opadającym przepływie pierścieniowym, mieszaniny gazu i cieczy bardzo lepkiej zbudowano stanowisko badawcze umożliwiające ocenę wielkości opisujących hydrodynamikę filmu cieczy. Zaprojektowany i zbudowany układ pomiarowy oraz odpowiedni dobór czynników roboczych pozwolił na pomiary szeregu wielkości charakterystycznych dla opadającego w rurach pionowych przepływu typu gaz – ciecz, w tym na badania grubości filmu cieczy. Do badań mieszaniny dwufazowej wykorzystano jako czynniki robocze powietrze i olej. Badania prowadzono w rurach o średnicy  $D = (12,5, 16, 22, 40)$  mm w szerokim zakresie zmian wartości lepkości oleju  $\eta_c = (0,09 \div 3,5)$  Pa·s przy zmianie prędkości pozornej oleju  $w_{c,0} = (0,7 \div 253,9) \cdot 10^{-3}$  m/s oraz powietrza  $w_{g,0} = (0,3 \div 29,8)$  m/s.

Na potrzeby badań skompletowano optoelektroniczny układ pomiarowy składający się z wielokanałowego systemu obiektowej analizy obrazu oraz sond optycznych. Pomiar grubości warstwy oleju polegał na pomiarze poziomu tłumienia sygnału optycznego za pomocą fotodetektora, oświetlonego z przeciwległej strony oświetlaczami diodowymi. Za pomocą czujników optoelektronicznych mierzona była lokalna grubość przepływających filmów cieczy i określana natura ich zafalowania. Długość fali światła emitowanego przez oświetlacze została dobrana doświadczalnie, po pomiarze widma absorpcji próbki oleju i wynosiła odpowiednio 470 nm (niebieski kolor), 530 nm (zielony kolor) i 625 nm (czerwony kolor) w zależności od rodzaju stosowanego w badaniach oleju, gdyż w tym zakresie widma oleje wykazywały największe tłumienie sygnału.

Uzyskane wyniki badań posłużyły do opracowania klasyfikacji występujących form przepływu oraz były podstawą do opracowania zależności korelacyjnych do obliczania lokalnej grubości filmu cieczy w zależności od parametrów przepływowych i właściwości oleju.

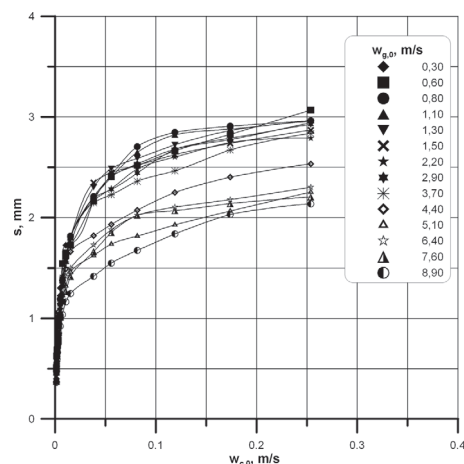
### Wyniki pomiarów

Uzyskane wyniki pomiarów dowodzą, że natura dwufazowego przepływu gaz – ciecz z udziałem cieczy bardzo lepkiej jest niezwykle złożonym zjawiskiem hydrodynamicznym, któremu towarzyszy wielowymiarowa asymetria profilu filmu cieczy.

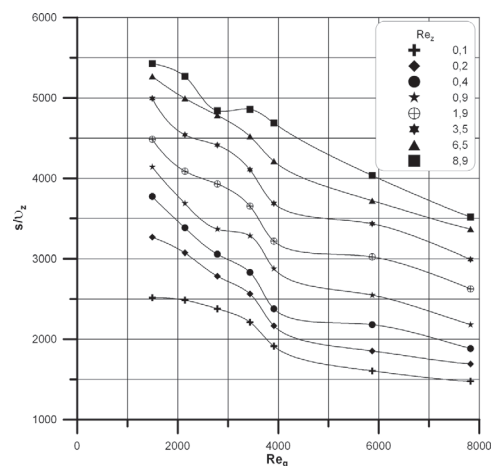
Towarzyszy temu stochastyczny na ogół charakter zjawisk przepływowych, których skala, w zależności od warunków przepływu, jest bardzo zróżnicowana. Jest to szczególnie widoczne w zakresie mocno zafalowanych i hydraulicznych form przepływu pierścieniowego, w zakresie których obserwuje się bardzo zmienne w czasie wartości grubości filmu cieczy.

Z analizy wyników badań wynika, że na kształtowanie się hydrodynamiki przepływu pierścieniowego gaz – ciecz zasadniczy wpływ mają lepkość i strumień cieczy oraz strumień gazu. Wzrost lepkości cieczy zawsze jest powodem tworzenia się warstewki filmu o większej grubości, natomiast zwiększenie prędkości fazy gazowej, przy stałej gęstości zraszania cieczy, jest na ogół powodem pocienienia się filmu. Tendencja ta obserwowana była w odniesieniu do wszystkich badanych średnic rur, w całym zakresie zmian lepkości. Należy jednocześnie zauważyć, że opisana tendencja jest szczególnie wyraźna przy burzliwym przepływie fazy gazowej.

Obrazują to dobrze wyniki badań przedstawione na rys. 1 i 2, których dodatkową interpretację (w postaci trójwymiarowej stylizacji) przedsta-



Rys. 1. Rozkład punktów doświadczalnych charakteryzujących grubość filmu cieczy:  $D = 22$  mm,  $\eta_c = 90$ , mPa·s



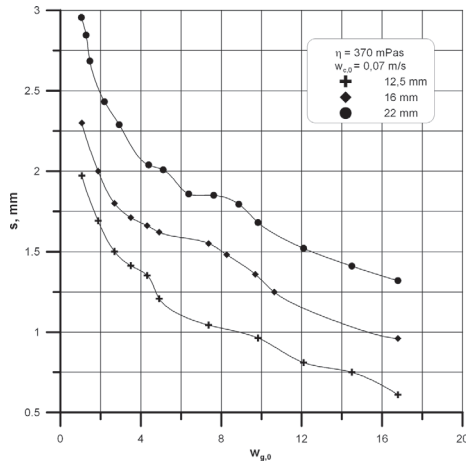
Rys. 2. Rozkład punktów doświadczalnych charakteryzujących grubość filmu cieczy w rurze o średnicy  $D = 12,5$  mm

wiono na rys. 3. Wyniki te opisują charakter zmian grubości filmu cieczy względem pozornych prędkości i średnic kanału przepływowego, przy różnych parametrach przepływu.

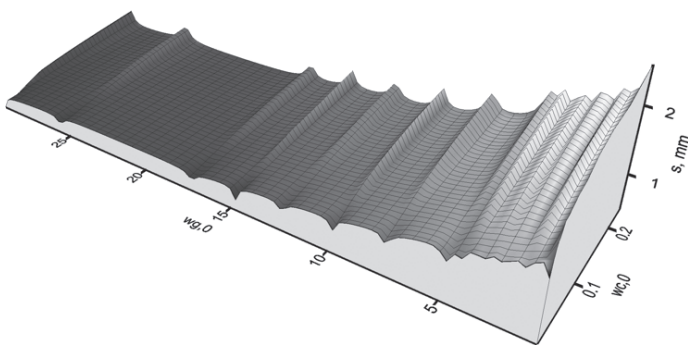
Z rozkładu punktów doświadczalnych wynika (Rys. 1–3), że wzrost prędkości pozornej gazu nie zawsze przyczynia się do zmniejszenia grubości filmu oleju, a wpływ na to mają też lepkość cieczy oraz jej prędkość pozorna. Wzrost lepkości cieczy jest na ogół powodem tworzenia się coraz to grubszej warstewki, która też szybciej narasta w miarę wzrostu strumienia cieczy (Rys. 1). Tendencja ta nie zależy natomiast od średnicy kanału (Rys. 3).

Bezpośredni wzrost prędkości pozornej cieczy (przy tych samych pozostałych parametrach) przyczynia się przy tym do coraz to większego zafalowania powierzchni międzyfazowej co w konsekwencji prowadzi do formowania się przepływu hydraulicznego, o coraz to bardziej zróżnicowanej powierzchni międzyfazowej (Rys. 4).

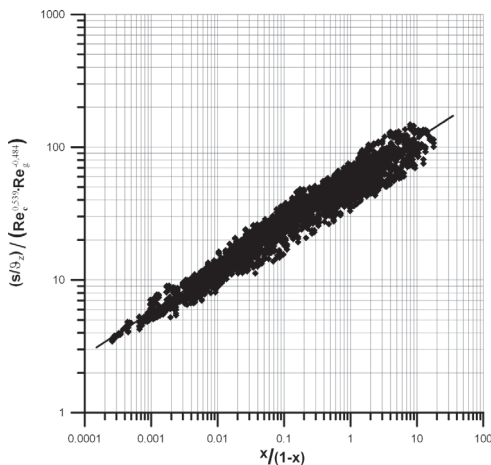
Przeprowadzona szczegółowa analiza w zakresie opisu ilościowego dynamiki przepływu pierścieniowego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka odnosiła się głównie do wskazania sposobu wyznaczania grubości filmu cieczy, jako wartości identyfikowanej zarówno dla stanów lokalnych jak i uśrednionych.



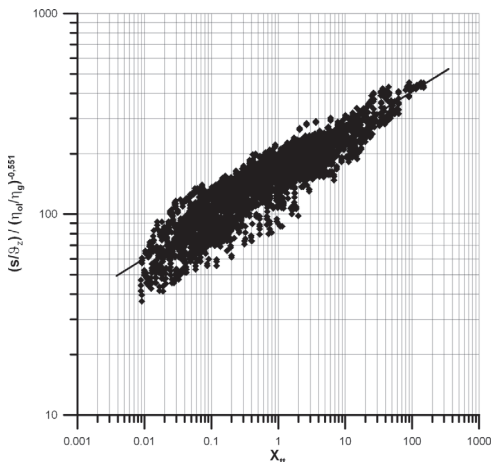
Rys. 3. Rozkład punktów doświadczalnych charakteryzujących grubość filmu cieczy:  $s = f(w_{g,0})$  w rurach o różnych średnicach



Rys. 4. Powierzchniowe odwzorowanie zmian grubości filmu cieczy  $D = 12,5$  mm



Rys. 5. Zmierzone i obliczone wartości grubości filmu cieczy dla relacji (1)



Rys. 6. Zmierzone i obliczone wartości grubości filmu cieczy dla relacji (2)

Przeprowadzona w tym zakresie szczegółowa analiza jakościowo-ilościowa zgromadzonego materiału badawczego pozwoliła przy wykorzystaniu rachunku wyrównawczego na opracowanie szczegółowego równania modelowego, opisującego ten parametr. Opracowano przy tym dwie alternatywne relacje, a mianowicie:

a. uzależnioną od udziału masyowego fazy gazowej ( $x = g_g/g_T$ ), oraz charakteru przepływu gazu i cieczy ( $Re_g, Re_c$ ), w odniesieniu do zastępczego wymiaru liniowego ( $\vartheta_z$ ) (Rys. 5)

$$\frac{s}{\vartheta_z} = 54 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,325} Re_c^{0,539} Re_g^{-0,484}, \quad (1)$$

dla której współczynnik korelacji  $r = 0,98$ , a średnie odchylenie standardowe  $\sigma = 0,18$ ,

b. uzależnioną od parametru Lockharta-Martinelli'ego ( $X_u$ ) oraz lepkości gazu i cieczy ( $\eta_g, \eta_c$ ), (Rys. 6) w postaci równania

$$\frac{s}{\vartheta_z} = 158,2 X_u^{0,208} \left( \frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{-0,551}, \quad (2)$$

dla którego współczynnik korelacji  $r = 0,92$ , a średnie odchylenie standardowe  $\sigma = 0,21$ .

Zakres zmian parametrów bezwymiarowych ujętych w równaniach (1) i (2) wynosił:  $x = (0,2 \div 947,1) \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_c = (0,007 \div 116)$ ,  $Re_g = (122 \div 19526)$ ,  $X_u = (3808 \div 214239)$ ,  $\eta_c/\eta_g = (3808 \div 214239)$ .

Obie zależności charakteryzują się stosunkowo wysoką zgodnością z wynikami badań (ponad 80% punktów mieści się w przedziale błędu średniego  $\pm 20\%$ ), co pozwala rekomendować obie te relacje do opisu wszelkiego rodzaju zjawisk zachodzących w pierścieniowym przepływie dwufazowym gaz – ciecz bardzo lepka, a związanych zarówno z procesami przenoszenia pędu jak i z wymianą ciepła i masy.

### Podsumowanie i wnioski

Stosowane układy pomiarowe umożliwiały szczegółową analizę stanów dynamicznych mierzonych wielkości, co pozwalało z kolei na ilościową ocenę zmian charakteryzujących przepływ pierścieniowy w zakresie parametrów istotnych dla wyznaczenia stanu rozwinięcia powierzchni międzyfazowej.

Z analizy danych doświadczalnych wynika, że w całym zakresie zmian parametrów procesowych wszystkie one mają istotny wpływ na kształtowanie się grubości filmu cieczy. Wzrost wartości lepkości cieczy zawsze przyczynia się do wzrostu średniej grubości warstwy cieczy, natomiast zwiększenie strumienia fazy gazowej, przy stałej gęstości zraszania cieczą, jest na ogół powodem pocienienia się filmu, lecz jedynie w obszarze przepływu o silnie rozwiniętej powierzchni międzyfazowej, jak to ma miejsce w przepływie hydraulicznym. Warunkom tym towarzyszy często zjawisko interferencji fal, sprzyjające ich kumulowaniu się, albo tworzeniu się dodatkowych fal kapilarnych, co niejednokrotnie prowadzi do występowania większych lokalnie grubości (także w odniesieniu do wartości średniej). Osobliwość ta jest szczególnie charakterystyczna w odniesieniu do cieczy o bardzo dużej lepkości.

Atutem przemawiającym na korzyść zaproponowanego modelu na obliczanie grubości filmu cieczy przy pierścieniowym dwufazowym opadającym przepływie dwufazowym jest to, że proponowane metody obliczeń odniesiono do zakresu zmian dynamicznego współczynnika lepkości cieczy ( $90 \div 3500$ ) mPa·s, co nie znajduje, jak dotąd, odpowiednika w literaturze przedmiotu.

### LITERATURA

[1] K. Czernek, G. Filipczak, S. Witczak: Przem. Chem., **87**, nr 2, (2008).  
 [2] Jing-yu Xu, Ying-xiang Wu, Zai-hong Shi, Li-yun Lao, Dong-hui Li: Int. J. Multiphase Flow, **33**, nr 9, 948 (2007).  
 [3] K. Czernek: Inż. i Ap. Chem., **48**, nr 6, 41 (2009).  
 [4] J. Oriol, J.P. Leclerc, C. Jallut, P. Tochon, P. Clement: Chem. Eng. Sci., **63**, nr 1, 24, (2008).  
 [5] E.W. Jassim, T.A. Newell, J.C. Chato: Exp. Ther. and Fluid Sci., **32**, (2008).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy Nr PBW-1368/T02/2006/31.