

Wojciech ORCIUCH, Katarzyna PIECHOWICZ, Wioletta PODGÓRSKA

e-mail: orciuch@ichip.pw.edu.pl

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Badania porównawcze prędkości kropeł w układzie ciecz – ciecz i prędkości cieczy w układzie jednofazowym

Wstęp

Podczas obliczeń CFD dla układów ciecz – ciecz częstą procedurą jest traktowanie emulsji jako układu pseudojednofazowego. Postępuje się tak np. podczas modelowania procesu biegnącego w przemysłowych aparatach o złożonej konstrukcji. W takich przypadkach wybiera się prosty model układu wielofazowego, np. *multiphase mixture model* lub dla niewielkiego stężenia kropeł zakłada się wręcz, że wszystkie składniki emulsji poruszają się tak, jak czysta faza ciągła [Podgórska, 2006]. Dzięki takim założeniom możliwe jest znaczne skrócenie czasu obliczeń w porównaniu z czasem niezbędnym do przeprowadzenia symulacji z użyciem bardziej złożonych modeli, które rozróżniają granicę międzyfazową, takich jak model *volume of fluid*.

Celem niniejszej pracy jest odpowiedź na pytanie, jak dalekie od rzeczywistości są opisane powyżej założenia upraszczające, poprzez doświadczalne wyznaczenie prędkości kropeł w układzie ciecz – ciecz i prędkości cieczy w układzie jednofazowym.

Badania przeprowadzono za pomocą anemometrii obrazowej PIV (*Particle Image Velocimetry*). W literaturze opisano kilka metod pomiarów PIV dla fazy rozproszonej. Próba zastosowania każdej z nich niesie ze sobą duże błędy pomiarowe lub wiele ograniczeń. Przykładowo, w pracy [Sridhara i Katza, 1991] jedną z faz rozpoznawano za pomocą fluorescencji, co powodowało zakłócenia na granicach faz. [Svenson i Rasmunson, 2006] wykonali pomiary dzięki temu, że odpowiednio dobrali współczynniki refrakcji obu faz.

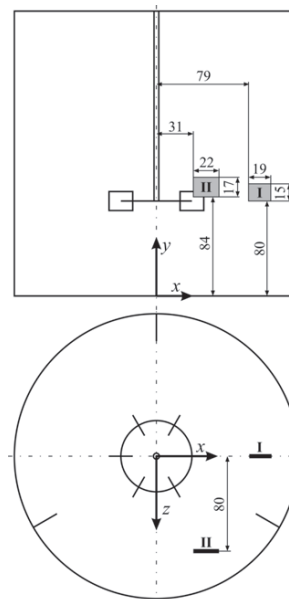
Opis badań

W badaniach użyto emulsji oleju silikonowego DC 85411 firmy Aldrich w wodzie destylowanej oraz wody destylowanej jako układu jednofazowego.

Badania przeprowadzono w cylindrycznym mieszalniku o średnicy i wysokości równej po 240 mm. W osi zbiornika było umieszczone mieszadło Rushtona o średnicy 80 mm. Łopatki mieszadła miały wysokość 20 mm i szerokość 16 mm a dysk mieszadła miał średnicę równą 60 mm i znajdował się 80 mm nad dnem mieszalnika. Zbiornik był wyposażony w 3 równomiernie rozmieszczone przegrody, każda o szerokości równej 24 mm. Zastosowano tylko trzy przegrody, aby możliwe było oświetlenie i obserwacja obszarów pomiarowych. Mieszadło wraz z wałem, dno, pokrywa i przegrody były wykonane ze stali i poczernione w celu eliminacji odbić światła laserowego. Cylindryczna ściana zbiornika była szklana. Mieszalnik był umieszczony w prostokątnym płaszczu termostatującym o szklanych ścianach.

Schemat mieszalnika, układ współrzędnych x - y - z oraz obszary pomiarowe są przedstawione na rys. 1. Miejsce pomiaru było oświetlane *nożem świetlnym*, czyli płaską, skolimowaną wiązką światła laserowego o grubości 0,3 mm. Obszar pomiarowy I oświetlano *nożem świetlnym* umieszczonym pionowo, w płaszczyźnie x - y . ($z = 0$). Kamera była ustawiona prostopadle do płaszczyzny x - y i umożliwiała obserwację obszaru o rozmiarach 19 mm w kierunku x i 15 mm w kierunku y . Obszar ten zaczynał się w odległości 79 mm od osi i 80 mm od dna zbiornika. Obszar pomiarowy II oświetlano pionową wiązką światła równoległą do płaszczyzny x - y i oddaloną o 80 mm od osi mieszalnika. Fotografowano obszar o rozmiarach 22 × 17 mm, którego początek znajdował się w punkcie o współrzędnych $x = 31$ mm, $y = 84$ mm i $z = 80$ mm. Obszar I wybrano w celu wyznaczenia rozkładów prędkości wzdłuż strugi

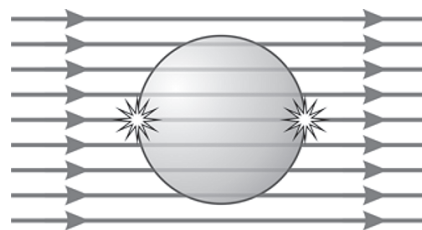
cieczy opuszczającej obszar mieszadła. Natomiast obszar II pozwolił na zmierzenie prędkości w okolicy ściany zbiornika.



Rys. 1. Schemat mieszalnika; na szaro zaznaczono obszary pomiarowe I i II

W pomiarach PIV wykorzystano podwójny, pulsacyjny laser o mocy 50 mJ na puls. Laser generował światło o długości fali równej 532 nm. Użyto 12-bitowej kamery PIV z matrycą CCD o rozdzielczości 1344 × 1024 pikseli. Analizę zdjęć PIV przeprowadzono za pomocą programu *DynamicStudio* wykorzystując technikę *adaptive correlation*.

W przypadku układu jednofazowego pomiaru prędkości dokonywano wykorzystując poliamidowe, kuliste cząstki posiewowe o średniej średnicy równej 20 μm. W przypadku emulsji badano dyspersję czystych, filtrowanych cieczy bez cząstek znacznikowych. Na powierzchni kropeł, podobnie jak na cząstkach posiewu, następowało rozproszenie światła laserowego, które w postaci miejscowych rozbłysków było rejestrowane przez kamerę. Zjawisko to pokazano schematycznie na rys. 2. Badanie przesunięcia rozbłysków w czasie pozwoliło wyznaczyć wektory prędkości kropeł.



Rys. 2. Schemat oświetlanej kropli; linie – kierunek padania promieni laserowych, gwiazdy – miejsca rozproszenia światła

Ten sposób pomiaru prędkości kropeł w emulsji nie był do tej pory opisany w literaturze. Jego zastosowanie niesie ze sobą szereg ograniczeń. Stężenie kropeł musi być niskie i dobrane na tej samej zasadzie, na jakiej dobiera się stężenie cząstek posiewowych w klasycznej technice PIV dla układów jednofazowych. Nie można więc dowolnie zmie-

niać stężenia kropeł. Również rozmiar kropeł podlega ograniczeniom. Musi być tak dobrany, aby podczas analizy zdjęć PIV, w każdym oknie próbkowania widać było od kilku do kilkunastu kropeł.

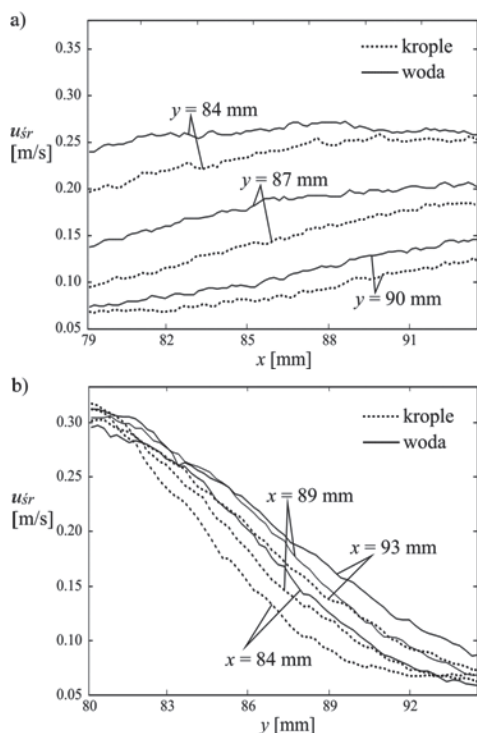
120 Biorąc pod uwagę powyższe ograniczenia, możliwe było wykonanie pomiarów dla ułamka objętościowego oleju w wodzie równego 0,3% i dla liczby *Reynoldsa* Re w zakresie od 21 200 do 31 800, co odpowiadało częstości obrotów mieszadła od 200 do 300 rpm. Każde badanie przeprowadzono w ustalonym stanie pracy mieszalnika w temperaturze 23°C. Zbiornik był całkowicie wypełniony wodą lub emulsją.

Wyniki badań i wnioski

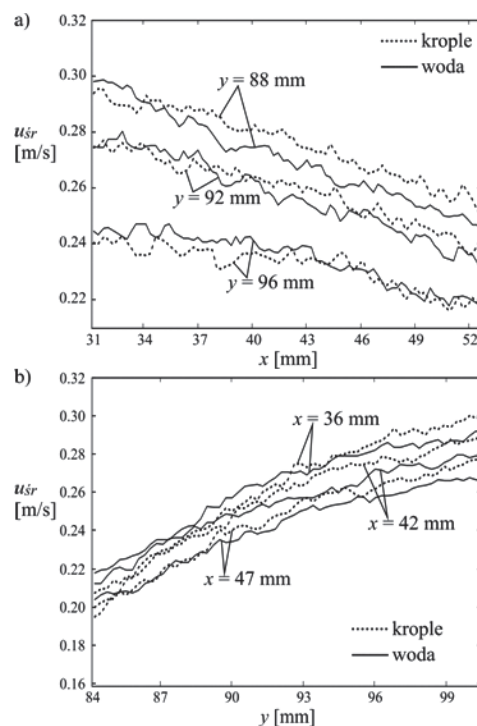
W wyniku badań wyznaczono dwuwymiarowe rozkłady lokalnej prędkości chwilowej u w badanych obszarach. Poprzez analizę statystyczną wyników obliczono też rozkłady lokalnej prędkości średniej u_{sr} oraz lokalne rozkłady prawdopodobieństwa prędkości $f(u)$ dla kropeł i wody. Analiza zdjęć pozwoliła również na wyznaczenie średnic kropeł w badanych obszarach. Krople miały średnice od 70 do 250 mikrometrów, w zależności od częstości obrotów mieszadła.

Na rys. 3 przedstawiono wybrane rozkłady wartości prędkości średniej w obszarze pomiarowym I dla $Re = 21\ 200$. Widać, że w okolicy mieszadła różnice w prędkościach kropeł w emulsji i wody w układzie jednofazowym osiągają maksymalnie 30%, choć w większości obszaru nie przekraczają 10%. Podobne wyniki uzyskano dla wyższych liczb *Reynoldsa* (26 500 i 31 800). Wybrane rozkłady wartości prędkości średniej w obszarze pomiarowym II dla $Re = 31\ 800$ pokazano na rys. 4. W obszarze blisko ściany zbiornika różnice pomiędzy prędkościami kropeł i wody nie przekraczają 10%. Podobne wyniki uzyskano dla niższych liczb *Reynoldsa* (21 200 i 26 500).

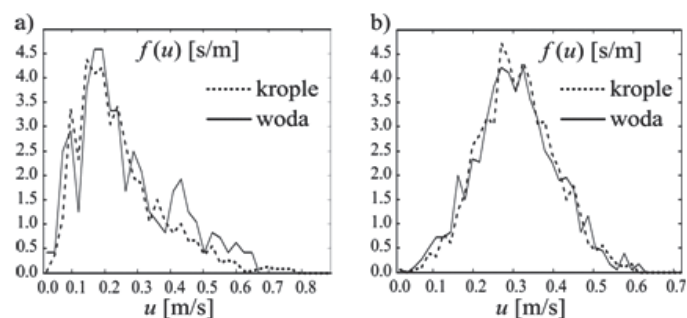
W wybranych punktach mieszalnika porównano również rozkłady prawdopodobieństwa lokalnych, chwilowych prędkości kropeł oleju w emulsji i wody w układzie jednofazowym. Przykłady rozkładów prawdopodobieństwa pokazano na rys. 5.



Rys. 3. Prędkość średnia u_{sr} kropeł oleju w układzie woda – olej i wody w układzie jednofazowym w obszarze pomiarowym I dla $Re = 21\ 200$; a) wzdłuż współrzędnej x dla trzech wartości współrzędnej y , b) wzdłuż współrzędnej y dla trzech wartości współrzędnej x



Rys. 4. Prędkość średnia u_{sr} kropeł oleju w układzie woda – olej i wody w układzie jednofazowym w obszarze pomiarowym II dla $Re = 31\ 800$; a) wzdłuż współrzędnej x dla trzech wartości współrzędnej y , b) wzdłuż współrzędnej y dla trzech wartości współrzędnej x



Rys. 5. Rozkłady prawdopodobieństwa prędkości $f(u)$ dla kropeł oleju w układzie woda-olej i wody w układzie jednofazowym w punkcie: a) $x = 89$ mm, $y = 87$ mm i $z = 0$ mm dla $Re = 21\ 200$, b) $x = 42$ mm, $y = 92$ mm i $z = 80$ mm dla $Re = 31\ 800$

Okazało się, że kształty rozkładów dla kropeł i wody są bardzo zbliżone. Porównywalny poziom wariancji prędkości dla kropeł i czystej wody świadczy o tym, że w obu przypadkach, w tych samych miejscach aparatu, mamy zbliżone wartości szybkości dysypacji energii. Jest to wielkość, od której zależy rozmiar kropeł poddawanych hydrodynamicznym naprężeniom podczas przepływu burzliwego. Jeśli więc dysponujemy odpowiednio precyzyjnym modelem CFD dla układu jednofazowego, możemy go użyć do przewidywania rozmiarów kropeł czy rozwinięcia powierzchni w aparatach zawierających rozcieńczoną emulsję, tak jak w badanym przypadku.

LITERATURA

- Podgórska W., 2006. Rozpad i koalescencja kropeł w intermitentnym polu burzliwym. *Prace Wydz. Inż. Chem. i Proc. Pol. Warszawskiej*, **30**, nr 1, 3-266
- Sridhar G., Ran B., Katz J., 1991. Implementation of particle image velocimetry to multi-phase flow. *Cavitation Multiphase Flow Forum ASME*, **109**, 205-210
- Svensson F. J. E., Rasmuson A., 2006. PIV measurements in a liquid-liquid system at volume percentages up to 10% dispersed phase. *Exp. Fluids*, **41**, 917-931. DOI: 10.1007/s00348-006-0211-0