

JACEK STELMACH

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Pomiary prędkości cieczy w mieszalniku z użyciem znaczników przepływu

## Wprowadzenie

Mieszanie mechaniczne w zbiornikach jest operacją często stosowaną w przemyśle [1, 2]. Jej celem jest m.in. intensyfikacja procesów wymiany masy. Proces taki ma miejsce podczas napowietrzania cieczy (np. ścieków). Osiągnięcie dużych wartości współczynnika wnikania masy odbywa się zwykle przez zwiększenie burzliwości w mieszanej cieczy. Obecność pęcherzy gazowych zmienia jednak warunki hydrodynamiczne w mieszalniku i utrudnia pomiar prędkości cieczy. Gdy liczba i rozmiary pęcherzy gazu są małe (mniejsze od 0,3 mm), możliwe jest określenie prędkości cieczy i pęcherzy metodą LDA/PDA. Podczas pomiaru rejestrowane są prędkości i rozmiary obiektów, które przeszły przez przestrzeń pomiarową. Ponieważ cząstki traseru są znacznie mniejsze od pęcherzy to można łatwo określić prędkość cząstek traseru (czyli cieczy) i pęcherzy gazu. Ze względu na załamywanie promieni lasera na powierzchniach międzyfazowych częstotliwość próbkowania jest zbyt mała do przeprowadzenia analizy częstotliwościowej i otrzymania widma energetycznego. Można jedynie określić prędkość średnią i pulsację prędkości w punkcie pomiarowym. Podobnych rezultatów można oczekiwać przy zastosowaniu znaczników przepływu [3, 4]. Informacje literaturowe wskazują na możliwość usunięcia obrazów pęcherzy [5], jeżeli są one kilka razy mniejsze od rozmiarów wskaźników przepływu. Przeprowadzone próby potwierdzają te informacje. Zastosowanie prostych przekształceń morfologicznych obrazu prowadzi do pozostawienia obrazów znaczników przepływu.

Wylimitowanie informacji o pęcherzach gazu ułatwia automatyczne śledzenie torów ruchu znaczników przepływu. Aby uzyskane wyniki były poprawne wymagane jest określenie metodyki pomiarowej oraz dokładności metody. Jest łatwiejsze w układzie jednofazowym (tzn. bez pęcherzy gazu). Zatem ustalenie metodyki pomiaru prędkości z użyciem wskaźników przepływu i porównanie otrzymanych rezultatów z wcześniejszymi wynikami uzyskanymi w pomiarach LDA stanowi cel niniejszej pracy.

## Badania

Pomiary zostały wykonane w szklanym zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $T = 292$  mm zaopatrzonym w cztery standardowe przegrody. Zbiornik wypełniony był wodą do wysokości  $H = 300$  mm ( $H \approx T$ ). Nad dnem zbiornika na wysokości  $h = 62$  mm umieszczone było samozasysające mieszadło tarczowe o średnicy  $D = 100$  mm. Częstość obrotowa mieszadła wynosiła  $N = 350$  min<sup>-1</sup>, a otwór w wale mieszadła był zaślepiiony. Użyto 10 wskaźników przepływu w kształcie kulistego wycinka płaszczyzn kartezjańskiego układu współrzędnych o średnicy równej 3,9 mm i grubości płatków równej 0,3 mm.

Wskaźniki były wykonane z tworzywa sztucznego o gęstości  $\rho = 1118$  kg/m<sup>3</sup>. Kamera *Redlake Motion Scope PCI 500C* o rozdzielczości 420×480 pikseli umieszczona była pod dnem zbiornika, a oś optyczna obiektywu była prostopadła do dna. Ostrość obrazu ustawiono na dolną część mieszadła. Z boków zbiornika umieszczono dwa oświetlacze halogenowe o mocy 1000 W każdy. Oświetlały one dolną część zbiornika na poziomie mieszadła. Wykonano 10 filmów po 256 klatek z częstotliwością filmowania 125 kl/s.

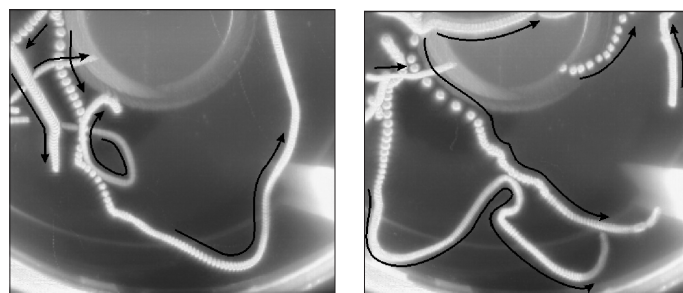
## Omówienie wyników

Na pojedynczej klatce filmu jest zwykle widocznych kilka znaczników przepływu. Przez elektroniczne nałożenie na siebie wszystkich klatek uzyskuje się trajektorie poszczególnych znaczników. Przez analizę pojedynczych klatek można jednoznacznie określić kierunek ich ruchu. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe trajektorie znaczników przepływu uzyskane z nałożenia 256 klatek.

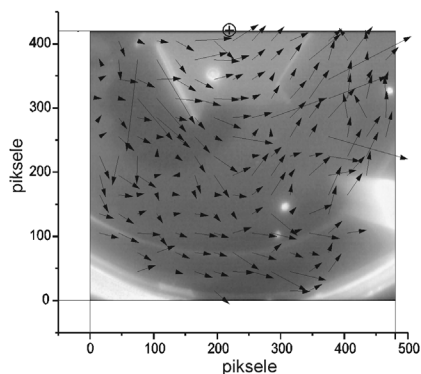
Na podstawie uzyskanych trajektorii można wyciągnąć kilka ogólnych wniosków dotyczących przepływu cieczy w tej części mieszalnika:

- trajektorie mogą mieć skomplikowane kształty świadczące o występujących w mieszalniku zawirowaniach o energiach zdolnych zmienić kierunek ruchu znaczników;
- przy mieszadle prędkości są znacznie większe niż w pozostałej części mieszalnika;
- widoczny jest wpływ ścianek i przegród na ruch znaczników (cieczy), po wyhamowaniu i odbiciu od ścianki znaczniki są unoszone w kierunku osi zbiornika;
- w widocznym na zdjęciach fragmencie mieszalnika dominuje promieniowo-obwodowy ruch cieczy, znaczniki poruszają się również w kierunku osiowym o czym świadczy zmiana wielkości i stopnia szarości (jasności) obrazów znaczników, zmiany te są niewielkie, co świadczy o małej wartości składowej osiowej prędkości w tym obszarze.

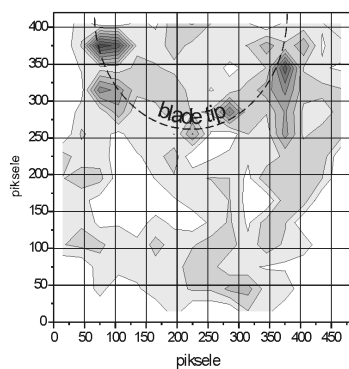
Używając programu *MathCAD* z pakietem *Image Processing* określano położenie środka obrazu określonego znacznika na dwu kolejnych klatkach. Współrzędne kartezjańskie z pierwszej klatki stanowią początek wektora, natomiast



Rys. 1. Trajektorie znaczników przepływu



Rys. 2. Wektory prędkości



Rys. 3. Wartości bezwymiarowych prędkości obwodowych

współrzędne z drugiej klatki określają położenie końca wektora przesunięcia znacznika. Na podstawie obliczonych przesunięć w pionie i w poziomie odszukiwano na trzeciej klatce obraz znacznika i określano współrzędne kartezjańskie jego środka. Określają one współrzędne kolejnego wektora, którego początek ma te same współrzędne co koniec poprzedniego wektora. Procedurę tę powtarzano dla kolejnych klatek i kolejnych znaczników. Otrzymano w ten sposób wektory przesunięć znaczników przepływu. Ponieważ skala obrazowa wszystkich klatek jest taka sama i odstępów czasowe między klatkami również są równe, to można te wektory utożsamiać z wektorami prędkości.

Ponieważ w tej metodzie nie jest możliwa obserwacja znaczników przechodzących przez określony punkt (tak jak ma to miejsce w metodzie LDA), to w celu uzyskania informacji o prędkościach znaczników uśredniano wartości przesunięć w obszarach o rozmiarach 30×30 pikseli (jest to rozmiar zbliżony do stosowanego w metodzie PIV [2]). Łączna liczebność znaczników zaobserwowanych w każdym obszarze wynosiła od 30 do 80. Zwiększenie liczby obserwacji w danym obszarze można uzyskać albo przez zwiększenie liczby znaczników w zbiorniku (grozi to zwiększeniem liczby pomyłek przy automatycznym śledzeniu znaczników na kolejnych klatkach) albo przez zwiększenie liczby analizowanych filmów. Uzyskane wektory prędkości przedstawiono na rys. 2. Ponieważ dla mieszalników cylindrycznych podaje się zwykle wartości składowych prędkości obwodowej  $U_t$  i promieniowej  $U_r$ , to uzyskane wartości należy przetransponować względem osi obrotu mieszadła, aby uzyskać wartości i zwroty prędkości składowych.

Znajomość skali (0,322 mm/piksel) i odstępów czasowych między klatkami (8 ms) umożliwia określenie bezwzględnych wartości prędkości. Dla ułatwienia porównania otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi metodą LDA [10] wartości te podzielono przez prędkość końca łopatki mieszadła  $U_{tip} = \pi DN$ . Otrzymane rezultaty dla składowej obwodowej przedstawiono na rys. 3. Otrzymano dość dobrą zgodność wartości składowych prędkości zmierzonych metodą LDA oraz za pomocą znaczników przepływu.

Równie ważnym zagadnieniem jest określenie pulsacji prędkości. Ich znajomość pozwala na określenie szybkości dyssypacji energii w danym punkcie mieszalnika. Największe wartości pulsacji prędkości osiągają w pobliżu końców łopatek mieszadła. Zgadza się to z wynikami pomiarów LDA [11], w których maksymalne wartości bezwymiarowych pulsacji prędkości nie przekraczały wartości 0,4 [12, 13].

## Wnioski

Użycie znaczników przepływu pozwala na określenie pola prędkości i pulsacji prędkości cieczy w wybranej części mieszalnika. Cyfrowa obróbka obrazu powinna doprowadzić do określenia prędkości cieczy i pęcherzyków gazu podczas napowietrzania.

W celu zwiększenia dokładności pomiarów należy zwiększyć liczbę wystąpień znaczników przepływu w poszczególnych obszarach oraz użyć drugiej, ustawionej prostopadle kamery, aby określić położenie każdego znacznika przepływu w przestrzeni trójwymiarowej. W celu zwiększenia dokładności należy również oświetlać wycinek przestrzeni mieszalnika o mniejszej wysokości aniżeli miało to miejsce w niniejszej pracy.

Pod samozasysającym mieszadłem tarczowym dominuje promieniowo-obwodowy ruch cieczy, a największe wartości prędkości osiągane są w pobliżu łopatek mieszadła. Poza obszarem mieszadła zarówno prędkości, jak i pulsacje prędkości, szybko maleją w kierunku ścianki mieszalnika. Otrzymane wyniki są zbliżone do rezultatów uzyskanych wcześniej metodą LDA.

## LITERATURA

1. J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych, Warszawa, WNT, 2004.
2. E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng: Handbook of Industrial Mixing, New Jersey, Wiley-Interscience, 2004.
3. F. Stręg: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1981.
4. P. Mavros: TranslChemE. vol.79, Part A, (2001).
5. M.J.J. Jak, C. Konstapel, A. van Kreuningen, J. Verhoeven., R. van Gastel, J.W.M. Frenten: Surface Science 491, s.43-52, (2001).
6. A. Heim, M. Tomalczyk, A. Leśniak: Mat. V Ogólnop. Konf. Przepływów Wielofazowych, Gdańsk, s.102, 1997.
7. A. Heim, E. Rzycki, J. Stelmach, M. Tomalczyk: Prace Wyd. Inż. Chem. i Proc. Polit. Warszawskiej, T. XXV, z.1-3, 1999.
8. J. Stelmach, E. Rzycki, M. Tomalczyk: Inż. Ap. Chem. 42, nr 5s, 195, (2003).
9. A. Heim, M. Tomalczyk, A. Sadowy: Inż. Ap. Chem. 41, nr 4s, 51, (2002).
10. J. Stelmach, E. Rzycki, A. Heim: Inż. Ap. Chem. 41, nr 4s, 115, (2002).
11. E. Rzycki, J. Stelmach: Inż. i Ap. Chem. 41, nr 4s, 112, (2002).
12. J. Stelmach, E. Rzycki, F. Rieger: Inż. Ap. Chem. 42, nr 3s, 143, (2003).
13. J. Stelmach, E. Rzycki, A. Kania: Mater. 11th Europ. Conf. on Mixing, Niemcy, s. 405, Bamberg 2003.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej Katedry Aparatury Procesowej PŁ W-10/1/2008/Dz.St.