

## Jacek STELMACH

e-mail: stelmach@wipos.p.lodz.pl

Katedra Aparatury Procesowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

## Określanie prędkości pęcherzyków gazu na wysokości samozasysającego mieszadła tarczowego

### Wstęp

Intensyfikacja procesu wnikania masy podczas napowietrzania cieczy jest ważnym zagadnieniem procesowym. W przypadku gazów trudno rozpuszczalnych w wodzie, a takim jest właśnie tlen, główny opór w transporcie masy ma miejsce w fazie ciekłej. Dlatego też większa prędkość pęcherzyków powietrza w mieszalniku powinna zapewnić lepsze odświeżanie warstwy granicznej i łatwiejszy transport tlenu do rdzenia fazy ciekłej.

Do określania prędkości pęcherzyków gazu w cieczy można użyć metody PIV (*Particle Image Velocimetry*), w której rolę „posiewu” spełniają pęcherzyki gazu. Metoda PIV może być realizowana dwoma sposobami [1]:

- przez podwójną ekspozycję na jednej klatce,
- przez rejestrację dwu obrazów na dwóch oddzielnych klatkach.

W pierwszym przypadku do określania przesunięć obrazów używana autokorelacja, a w drugim korelacja krzyżowa [2]. Preferowany jest drugi sposób realizacji metody PIV, który może być realizowany przez użycie kamery wideo o większej od telewizyjnej częstotliwości rejestracji obrazów. Na podstawie przesunięć fragmentów obrazów i odstepu czasowego między kolejnymi klatkami można określić prędkość ziaren „posiewu”. Zatem pierwszym celem niniejszej pracy jest zbadanie przydatności metody PIV z użyciem szybkich kamer wideo do określania prędkości pęcherzyków przy większych strumieniach gazu, gdy obrazy pęcherzyków wzajemnie się przesłaniają.

W przypadku mieszadeł samozasysających strumień dyspergowanego gazu dla danej średnicy mieszadła i wysokości cieczy nad nim jest ściśle związany z częstością obrotową mieszadła. Jednak dotychczas nie określono prędkości pęcherzyków dla większych częstości obrotowych mieszadła. Zagadnienie to stanowi drugi cel tej pracy.

### Badania

Badania przeprowadzono w szklanym zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $T = 292$  mm, zaopatrzonym w cztery standardowe przegrody. Zbiornik był napełniony wodą destylowaną ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) do wysokości  $H = 300$  mm ( $H \approx D$ ), a górna powierzchnia samozasysającego mieszadła tarczowego o średnicy  $D = 125$  mm znajdowała się na wysokości  $h = 70$  mm. Prostopadle do dna zbiornika umieszczono kamerę *Redlake PCI 500C*, która przy szybkości filmowania 250 kl/s ma rozdzielczość  $420 \times 480$  pikseli. Ze względu na niewielką rozdzielczość matrycy kamery obraz obejmował ok.  $\frac{1}{4}$  powierzchni przekroju mieszalnika między dwiema przegradami. Powierzchnie boczne zbiornika oświetlono dwiema lampami halogenowymi o mocy 1 kW każda, co pozwoliło uzyskać czas ekspozycji  $1/1250$  s przy liczbie przysłony od 1,2 (mała liczebność pęcherzyków) do 2 przy większych zatrzymaniach fazy gazowej i silniejszym rozpraszaniu światła w zbiorniku.

Częstości obrotowe mieszadła wynosiły  $N = 365, 370, 375, 380, 400, 420, 440$  i  $460$   $\text{min}^{-1}$ . Przy większych częstościach obrotowych pod mieszadło wpływało zbyt dużo pęcherzyków, a wymagane bardzo duże natężenie oświetlenia uniemożliwiało oświetlenie jedynie fragmentu mieszalnika. Po ustaleniu się warunków hydrodynamicznych w mieszalniku rejestrowano 256 klatek dla każdej częstości obrotowej.

### Opracowanie danych doświadczalnych

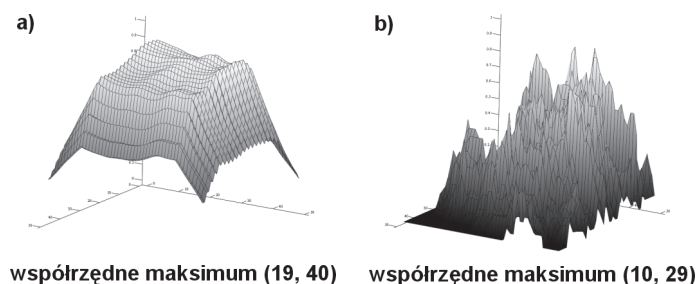
W metodach PIV do znalezienia na dwu kolejnych klatkach obszarów o największym podobieństwie stosuje się metodę korelacji krzyżowej. Dla jądra  $K$  o rozmiarze  $3 \times 3$  korelowanego z tablicą  $P$  wartość korelacji w punkcie o współrzędnych  $x, y$  opisuje zależność

$$N(x, y) = \sum_{k=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 K(j, k) P(x+j, y+k) \quad (1)$$

natomiast dla jąder o większych rozmiarach należy odpowiednio zmodyfikować wartości zmiennych  $k$  i  $j$ . Obliczeń dokonano w programie *MathCAD 2001* z pakietem *Image Processing*, mającym wbudowaną funkcję korelacji krzyżowej.

Użyta kamera cyfrowa generuje obrazy kolorowe w systemie RGB i w pierwszej kolejności dokonano ich konwersji do skali szarości. Wówczas każda klatka jest reprezentowana przez tablicę o wymiarach  $420 \times 480$ , której każdy element może przyjmować wartości całkowite z zakresu od 0 do 255 (ułatwia to dalsze obliczenia, gdyż w systemie RGB każda z barw składowych zapisana jest w analogicznej tablicy). Ze względu na małą rozdzielczość obrazu do obliczeń przyjęto rozmiar jądra  $20 \times 20$  pikseli, nieco mniejszy od podawanej w literaturze [1] wielkości  $32 \times 32$  piksele. Natomiast w oparciu o analizę przesunięć łopatek mieszadła i założenie, że prędkość pęcherzyków nie powinna być większa od prędkości obwodowej końca łopatki mieszadła ustalono maksymalne przesunięcie w pionie i w poziomie dla obszaru poszukiwania największego podobieństwa na 14 pikseli. Rozmiar tablicy  $P$ , w obszarze której dokonywano tego poszukiwania wynosił zatem  $48 \times 48$  pikseli. Z analizy zależności (1) wynika, że korelowane mogą być obrazy w skali szarości, jednak w metodzie PIV obrazy cząstek „posiewu” są zbliżone do obrazów binarnych. Dlatego w następnej kolejności obrazy ze skali szarości przetransponowano do binarnych (zerowejedynkowych). Ponieważ przy większych zatrzymaniach fazy gazowej obrazy pęcherzyków wzajemnie się przesłaniają dalszą analizę oparto na wyznaczonych konturach pęcherzyków. Użyto do tego celu metody *Canny'ego* [3, 4] z eksperymentalnie dobranymi wartościami współczynników, jednakowymi dla wszystkich obrazów. Na rys. 1 pokazano różnice w wynikach użycia korelacji krzyżowej dla obrazu w skali szarości (a) i dla tego samego obrazu przekształconego do postaci binarnej (b). W celu umożliwienia porównania obu wykresów wyniki zostały znormalizowane przez podzielenie przez największą wartość.

Dla obrazu w skali szarości otrzymano bardzo zbliżone wyniki dla różnych przesunięć fragmentu obrazu z pierwszej klatki względem obszaru poszukiwań na drugiej klatce. Dla obrazu binarnego występuje natomiast kilka pików o zbliżonych wartościach. Oba wykresy różnią się od podawanych w literaturze, gdzie widoczny jest jeden dominujący pik. Wynika to z różnicy obrazów małych cząstek „posiewu” i wielo-

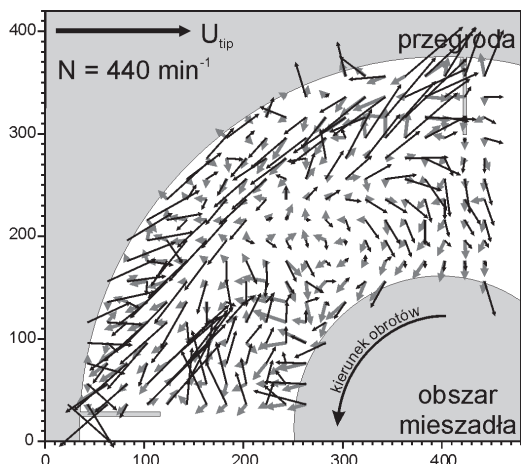


Rys. 1. Wyniki korelacji znormalizowane do zakresu  $\langle 0, 1 \rangle$

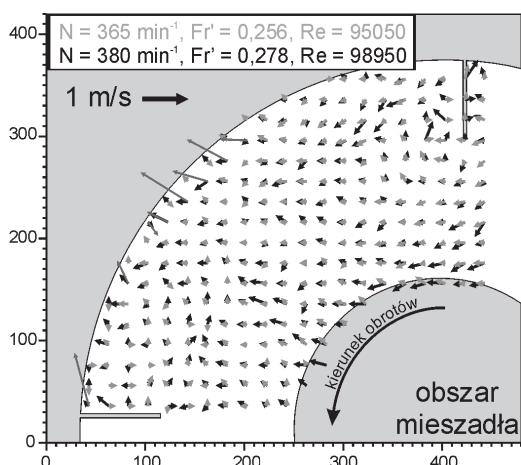
krotnie od nich większych pęcherzyków gazu. Mimo iż współrzędne maksimum w obu przypadkach znacznie się od siebie różnią wiarygodniejsze są wyniki otrzymywane dla obrazów binarnych. Na tym etapie skorelowano obrazy w skali szarości i binarne. W celu zwiększenia wiarygodności analizowano wszystkie klatki filmów i uśredniano przesunięcia w pionie i w poziomie. Pozwoliło to na sporządzenie map wektorowych przedstawionych na rys. 2. Czarne wektory uzyskano dla obrazów w skali szarości, szare dla obrazów binarnych.

Porównanie uzyskanych map wektorowych prędkości pęcherzyków z ich ruchem obserwowanym na filmach pozwala stwierdzić dwie nieprawidłowości dla wektorów prędkości otrzymanych z obrazów w skali szarości (czarne wektory):

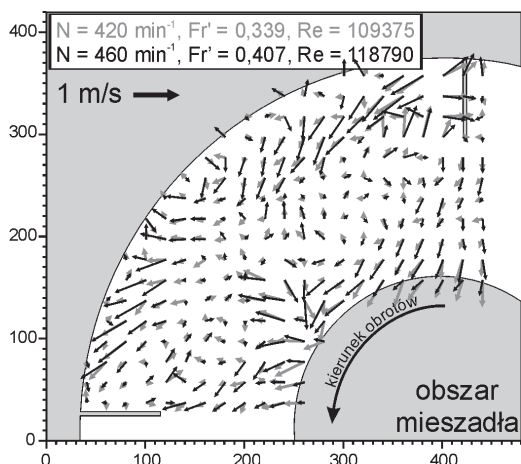
- w pobliżu ścianki mieszalnika nie występuje, sugerowany przez zwroty wektorów, wsteczny ruch pęcherzyków,



Rys. 2. Mapy wektorów prędkości dla obrazów w skali szarości i binarnych



Rys. 3. Mapy wektorów prędkości pęcherzyków gazu na wysokości mieszadła



Rys. 4. Mapy wektorów prędkości pęcherzyków gazu na wysokości mieszadła

- w pobliżu przegrody prędkości pęcherzyków nie osiągają 2/3 prędkości końca łopatki mieszadła  $U_{tip}$ , jak to wynika z analizy długości wektorów.

Dla obrazów binarnych uzyskano lepszą zgodność wyników z przepływami obserwowanymi na filmach. Potwierdza to wcześniejszy wniosek o większej wiarygodności rezultatów otrzymanych dla obrazów binarnych.

Mapy wektorów prędkości dla dwu mniejszych częstotliwości obrotowych mieszadła przedstawiono na rys. 3. Dla częstotliwości obrotowej  $N = 365 \text{ min}^{-1}$  liczba pęcherzyków jest niewielka i wzajemnie na siebie nie oddziałują, co sprawia, że ich prędkości w badanym przekroju mieszalnika są wyrównane. Zwiększenie częstotliwości obrotowej mieszadła do  $N = 380 \text{ min}^{-1}$  powoduje zwiększenie prędkości pęcherzyków w pobliżu mieszadła. Poza tym obszarem przyrost prędkości pęcherzyków w porównaniu do  $N = 365 \text{ min}^{-1}$  jest niewielki. Uwidacznia się też „martwa strefa” o małej prędkości pęcherzyków w połowie odległości między końcami łopatek mieszadła a ścianką mieszalnika bliżej poziomo zaznaczonej przegrody.

Zwiększanie częstotliwości obrotowej mieszadła zwiększa strumień dyspergowanego gazu i prędkości pęcherzyków, które dochodzą do wartości ok. 1 m/s (Rys. 4), podczas gdy prędkość obwodowa końca łopatki mieszadła dochodzi do 3,01 m/s. Jednak silne oddziaływanie pęcherzyków na siebie powoduje, że przyrost ich prędkości pomiędzy  $N = 420 \text{ min}^{-1}$  i  $460 \text{ min}^{-1}$  jest bardzo niewielki. Bardziej widoczne stają się natomiast „martwe strefy” powolnej cyrkulacji pęcherzyków. Również nie obserwuje się opływania przegród. Pęcherzyki wyhamowane na nich płyną w kierunku powierzchni cieczy.

## Wnioski

Obrazy zarejestrowane szybkimi kamerami wideo o niewielkiej rozdzielczości mogą być używane do określania prędkości pęcherzyków gazu w mieszalniku metodą PIV. Konieczna jest jednak ich binaryzacja np. określająca kontury pęcherzyków, gdyż korelacja krzyżowa obrazów w skali szarości prowadzi w tym przypadku do błędnych rezultatów.

W celu zwiększenia wiarygodności wyników konieczne jest albo zwiększenie częstotliwości rejestracji filmów albo skorygowanie algorytmu znajdujących obszarów o największym podobieństwie. W pierwszym przypadku użytej kamery zmniejsza się wielkość obrazu, musi ulec skróceniu czas ekspozycji, a zwiększeniu natężenia oświetlenia. Drugi przypadek wymaga dalszej analizy problemu, np. uwzględnienia ruchu obrotowego, ale wydaje się bardziej obiecujący.

Zwiększanie częstotliwości obrotowej mieszadła powoduje wzrost prędkości przemieszczania się pęcherzyków gazu, jednak powyżej częstotliwości obrotowej  $N = 440 \text{ min}^{-1}$  wzrost ten dla badanego układu staje się bardzo mały. Maksymalne prędkości pęcherzyków nie przekroczyły wartości 1 m/s.

Nawet dla największej przebadanej częstotliwości obrotowej mieszadła obserwuje się na jego wysokości zawieszenia strefy, w których pęcherzyki poruszają się znacznie wolniej niż na ich obrzeżach. Obserwacje filmów pozwalają również stwierdzić, że w tych strefach występuje mniejsza koncentracja pęcherzyków. Z punktu widzenia wnikania masy można klasyfikować te strefy jako „martwe”.

## LITERATURA

- [1] E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta: Handbook of industrial mixing. Science and practice. John Wiley & Sons, New Jersey 2004.
- [2] Particle Image Velocimetry, (17.11.2009): <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>
- [3] W. Malina, M. Smiatcz: Cyfrowe przetwarzanie obrazów. EXIT, Warszawa 2008.
- [4] Cz. Kuncewicz, J. Stelmach: Wykrywanie krawędzi obrazów pęcherzyków. Mat. IX Ogólnopol. Konf. Przepł. Wielofaz., s. 39, Gdańsk 2009.

Praca wykonana w ramach grantu N N208 097735 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego