

Czesław KUNCEWICZ, Jacek STELMACH

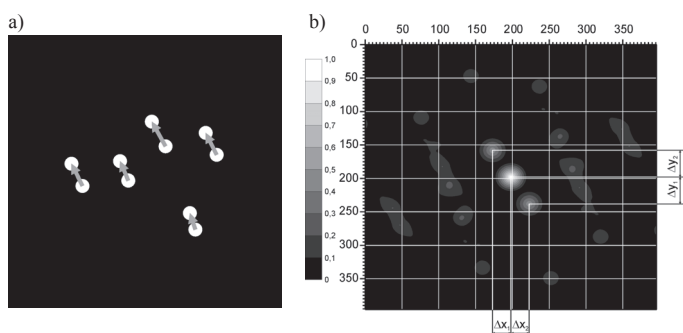
e-mail: kuncewic@wipos.p.lodz.pl

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

## Zastosowanie autokorelacji do określania prędkości pęcherzyków gazu na podstawie zdjęć z podwójną ekspozycją

### Wstęp

Hydrodynamika układu dwufazowego ciecz – gaz ma wpływ na szybkość transportu masy. Dlatego ważnym zagadnieniem procesowym jest znajomość prędkości pęcherzyków gazu poruszających się w cieczy. Prędkości pęcherzyków gazu w mieszalniku mogą być określane przez analizę przesunięć pęcherzyków na kolejnych klatkach filmu [1]. Wymaga to użycia kamer o szybkości filmowania większej od telewizyjnej, tj. od 25 kl/s w systemie PAL. Przykładowo, kamera *RedLake PCI500C* pozwala przy rozdzielczości 420×480 pikseli filmować z szybkością 250 kl/s. Przy tej rozdzielczości dla całego przekroju mieszalnika nie są jednak rejestrowane najmniejsze pęcherzyki, co może powodować błędy w wyznaczaniu prędkości. Biorąc pod uwagę, że koszty systemów o większej rozdzielczości zaczynają się od kilkudziesięciu tysięcy USD, postanowiono sprawdzić możliwość określania prędkości pęcherzyków przez analizę zdjęć uzyskanych z podwójną ekspozycją [2]. Wówczas na jednej klatce o dużej rozdzielczości (ponad 8 Mpx) rejestrowane są po dwa obrazy każdego pęcherzyka. Omówiona sytuacja przedstawiona jest na obrazie testowym (Rys. 1a).



Rys. 1. Obraz testowy z przesuniętymi obiektami i mapa uzyskana z autokorelacji

Do określenia prędkości potrzebna jest znajomość przesunięć i odstępu czasowego. Odstęp czasowy wynika z konstrukcji oświetlacza stroboskopowego, natomiast do określania przesunięć obrazów pęcherzyków stosuje się korelację krzyżową dla tego samego obrazu czyli autokorelację. Dla jądra  $K$  o rozmiarze  $(2k_j + 1)(2j_j + 1)$  korelowanego z tablicą  $P$  wartość korelacji w punkcie o współrzędnych  $x, y$  opisuje zależność

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

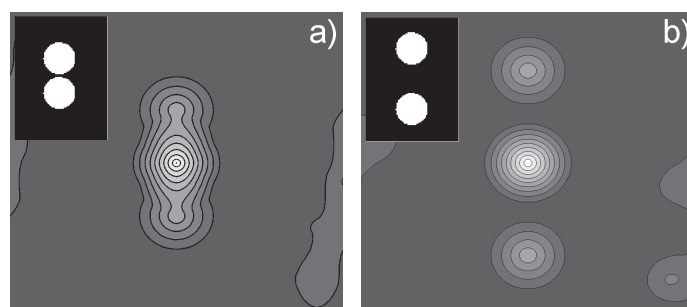
W wyniku zastosowania autokorelacji otrzymuje się na wykresie dwa piki położone symetrycznie względem pików centralnego (Rys. 1b). Dlatego właściwy kierunek przesunięcia musi być określany na podstawie dodatkowych obserwacji układu [1].

W przypadku rzeczywistych obrazów pęcherzyków, ze względu na silne zawirowania i ruch do góry, brak jest możliwości otrzymania tak idealnych obrazów jak na rys. 1a. Dlatego celem niniejszej pracy jest sprawdzenie przydatności metody autokorelacyjnej do określania prędkości pęcherzyków gazu w mieszalniku na podstawie podwójnie nświetlonych klatek.

### Badania

Badania przeprowadzono w szklanym zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $T = 292$  mm, zaopatrzonym w cztery standardowe przegrrody.

Zbiornik był napełniony wodą destylowaną ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) do wysokości  $H = 300$  mm ( $H \approx T$ ), a górna powierzchnia samozasysającego mieszadła tarczowego o średnicy  $D = 125$  mm znajdowała się na wysokości  $h = 70$  mm. Prostopadle do dna zbiornika umieszczono aparat fotograficzny *Canon EOS 20D* (matryca 2348×3522 piksele) połączony z lampą błyskową *Speedlite 580EX II*, stanowiącą źródło światła stroboskopowego. Lampa oświetlała przez tunel świetlny boczną powierzchnię mieszalnika na wysokości mieszadła. W trakcie sprawdzania oprogramowania z obrazami testowymi stwierdzono, że przy zbyt małych przesunięciach może dochodzić do zlania się pików centralnego z bocznymi (Rys. 2a). Z kolei przy zbyt dużym odstępie czasowym pęcherzyk przemieści się ku powierzchni cieczy, co zmieni rozmiary i zmniejszy podobieństwo pierwszego i drugiego obrazu pęcherzyka. Ponadto zwiększeniu ulegnie obszar poszukiwania największego podobieństwa, co wydłuży czas obliczeń. Częstotliwość błysków ustalono doświadczalnie na 130 Hz.



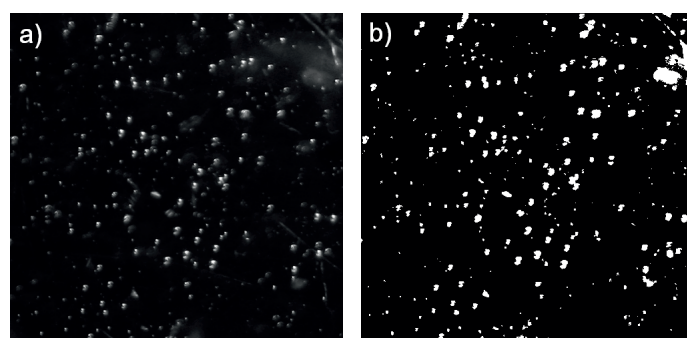
Rys. 2. Odległości pików bocznych w zależności od przesunięć pęcherzyków

Częstości obrotowe mieszadła wynosiły  $N = 362, 364, 366, 368, 370, 372$  i  $374 \text{ min}^{-1}$ . Dla każdej częstości obrotowej wykonywano 10 zdjęć.

### Opracowanie danych doświadczalnych

W fazie wstępnej obróbki zdjęć konwertowano je do skali szarości (Rys. 3a) a następnie binaryzowano do postaci zero-jedynkowej (Rys. 3b) z progiem określanym metodą gradientową [3], a obszar mieszadła maskowano jako nieistotny.

Rozmiar jądra dla autokorelacji  $K$  określono na 127×127 pikseli, a wielkość przesunięcia jądra na 40 pikseli (co daje rozmiar tablicy przeszukiwań  $P$  równy 207×207 pikseli). W wyniku użycia autokorelacji otrzymywano tablicę, którą przeszukiwano w celu znalezienia maksimum lokalnych. Biorąc pod uwagę drugi co do wartości pik, określano jego lokalizację (współrzędne pików). Określenie wartości przesu-

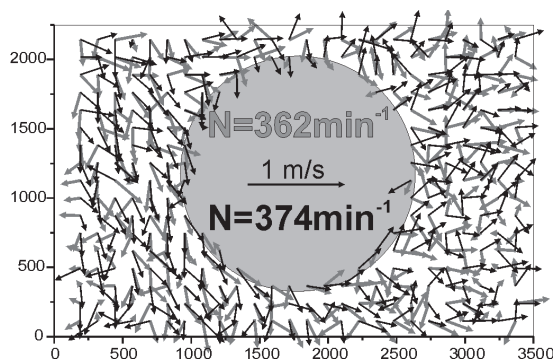


Rys. 3. Fragment obrazu w skali szarości i po binaryzacji

nię w pionie i w poziomie pozwalało obliczyć wartość promienia wodzącego (długość wektora) i kąt obrotu wektora prędkości. Przyjmując jako biegun oś obrotu mieszadła przeliczano współrzędne kartezjańskie na biegunowe. Ponieważ na wysokości mieszadła przepływ cieczy ma charakter promieniowo-obwodowy [4], a na zdjęciach kierunek obrotów mieszadła był zgodny z kierunkiem trygonometrycznym, to kąt dla piku określającego przesunięcie powinien być większy od kąta dla piku centralnego. Jeśli był mniejszy, do wcześniej obliczonego kąta obrotu wektora dodawano  $2\pi$ . Długość wektora i kąt obrotu określano dla każdego podobzaru. Procedurę tę powtarzano dla kolejnych zdjęć i uśredniano wyniki.

### Omówienie wyników

W wyniku przeprowadzonej obróbki danych wyjściowych otrzymano mapy wektorowe obrazujące prędkości pęcherzyków gazu. Na rys. 4 przedstawiono mapy dla dwu skrajnych przebadanych częstości obrotowej mieszadła  $N = 362$  i  $374 \text{ min}^{-1}$  (osie wykresów w pikselach, na szaro zaznaczono obszar mieszadła).



Rys. 4. Wektory prędkości pęcherzyków powietrza dla  $N = 362$  i  $374 \text{ min}^{-1}$

Z analizy uzyskanych map wektorów prędkości wynika, że:

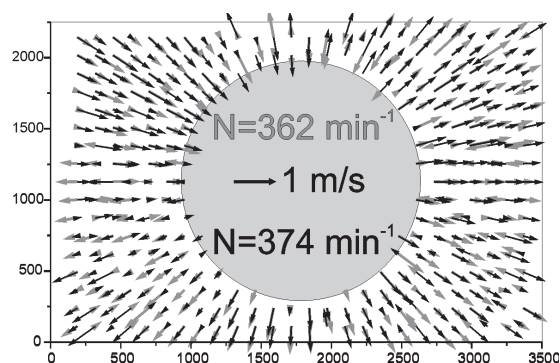
- mimo, iż zmiana częstości obrotowej wynosiła tylko 3,3% występują duże różnice w zwrotach wektorów prędkości, natomiast różnice w długościach są znacznie mniejsze,
- zwrot niektórych wektorów jest przeciwny do kierunku ruchu strumienia wody,
- prędkości pęcherzyków są rzędu 0,2–0,5 m/s, czyli że są one ok. 10 razy mniejsze od prędkości obwodowej końców łopatek mieszadła (2,37–2,45 m/s).

Dokładniejszych analiz można dokonać po rozłożeniu wektorów prędkości na składowe obwodową (Rys. 5) i promieniową (Rys. 6). Na podstawie analizy rys. 5 i 6 można stwierdzić, że ruch pęcherzyków na wysokości mieszadła ma charakter obwodowo-promieniowy. Wpływają one z obszaru łopatek i pod wpływem siły odśrodkowej płyną promieniowo w kierunku ścianek zbiornika. Zastosowana częstotliwość błysków podczas podwójnej ekspozycji okazała się zbyt mała, co spowodowało, że część wektorów ma zwroty przeciwne do oczekiwanych. W metodach PIV nie są śledzone poszczególne pęcherzyki czy cząstki znacznika, a określane podobieństwo obszarów ma charakter statystyczny, co oznacza, że jeżeli w danym obszarze występują pęcherzyki to zostanie znalezione jakieś maksimum lokalne.

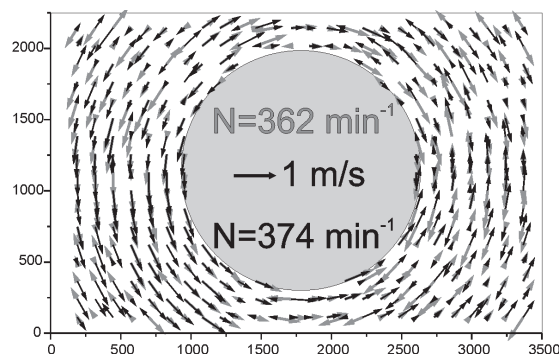
Skrócenie odstępu czasowego między ekspozycjami powinno skutkować zmniejszeniem obszaru poszukiwania podobieństwa, a to z kolei powinno skrócić czas obliczeń, który dla procedur napisanych w programie *MathCAD* z pakietem *Image Processing* wynosił kilka godzin.

Kolejną przyczyną uzyskania błędnych zwrotów wektorów prędkości może być zbyt duża wysokość oświetlanej przestrzeni mieszalnika. W omawianych doświadczeniach była ona równa wysokości głowicy lampy błyskowej (ok. 4 cm). Rejestrowane były zatem pęcherzyki znajdujące się ok. 1,3 cm nad i pod mieszadłem. Przy takiej wysokości osiowy przepływ pęcherzyków spowodowany siłą wyporu jest już silny i wpływa na otrzymane rezultaty.

Ze względu na ograniczenia w wysokości umieszczenia zbiornika nad aparatem (ok. 75 cm pod dnem) do uzyskania obrazu niemal ca-



Rys. 5. Wektory prędkości obwodowej pęcherzyków powietrza



Rys. 6. Wektory prędkości promieniowej pęcherzyków powietrza

łego przekroju mieszalnika konieczne stało się użycie obiektywu krótkoogniskowego (szerokokątnego). Odbiło się to niekorzystnie na perspektywie uzyskanych obrazów i jest również potencjalnym źródłem błędów pomiarowych. Korzystniejsze będzie zastosowanie obiektywu o dłuższej ogniskowej i fotografowanie tylko fragmentu powierzchni przekroju mieszalnika między dwoma przegrodami.

Zdjęcia wykonane na potrzeby niniejszej pracy nie obejmowały obszaru przy przegrodach. Dlatego nie można jednoznacznie określić ich wpływu na przepływ pęcherzyków. Można jedynie sądzić, że w ich pobliżu będzie następowała zmiana kierunku przepływu.

### Wnioski

Metoda określania prędkości pęcherzyków gazu w mieszalniku na podstawie zdjęć z podwójną ekspozycją powinna dawać prawidłowe wyniki, jednak pod warunkiem spełnienia kilku wymogów:

- czas między ekspozycjami powinien być jak najkrótszy, ale na tyle długi, aby piki uzyskane z autokorelacji były rozróżnialne,
- wysokość oświetlanej części mieszalnika powinna być mniejsza od wysokości mieszadła, a na powierzchni zbiornika powinien być umieszczony odbłyśnik zwiększający równomierność oświetlenia,
- ze względu na zniekształcenia perspektywiczne i ograniczoną ilość miejsca pod mieszalnikiem należy ograniczyć się do analizy wycinka mieszalnika, którego obraz uzyska się przy największej możliwej odległości aparatu od dna zbiornika.

Po spełnieniu tych wymogów metoda ta może nie zdać egzaminu przy dużej liczbie pęcherzyków, gdy ich obrazy nakładają się na siebie.

### 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. Smiatacz: Cyfrowe przetwarzanie obrazów. EXIT, Warszawa 2008.
- [4] J. Stelmach, E. Rzycki, A. Heim: Inż. Ap. Chem. 41, nr 4s, 115 (2002).

Praca wykonana w ramach grantu N N208 097735 MNiSW.