

Mariusz R. RZAŚA

e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Metoda wyznaczania trajektorii ruchu pęcherzyków gazu poruszających się w cieczy

### Wstęp

W wielu procesach przemysłowych wykorzystuje się proces aeracji [1]. Bardzo istotna w tym procesie jest wymiana masy, pomiędzy cieczą i gazem poruszającym się w niej w postaci pęcherzyków. Na stopień wymiany masy poza kształtem i wymiarem poruszających się pęcherzyków, mają wpływ parametry ruchu pęcherzyków [2].

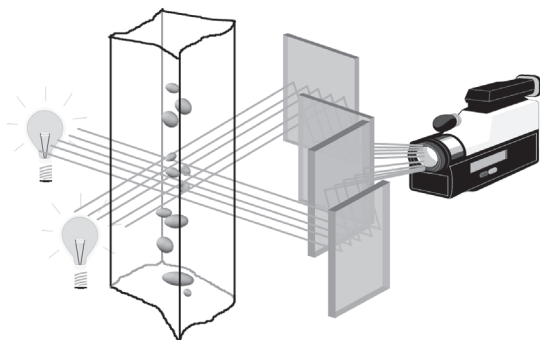
Do parametrów ruchu zalicza się prędkość poruszania się pęcherzyka oraz jego kierunek. Ponieważ, pęcherzyki bardzo rzadko poruszają się po torze prostoliniowym niejednokrotnie potrzebna jest znajomość trajektorii ruchu pęcherzyków. W pracy przedstawiono metodę opartą na tomografii obrazowej umożliwiającą wyznaczenie zarówno trajektorii ruch poruszających się pęcherzyków jak i wyznaczenia ich prędkości lokalnych.

### Idea tomografii obrazowej

Tomografia obrazowa opiera się na zastosowaniu metody fotograficznej, połączonej z analizą obrazu [1]. Czasem fotografuje się pęcherze od góry, co daje możliwości określenia ich średnicy. W przypadku cyfrowej rejestracji obrazu możliwe jest nie tylko obserwacja przepływu, lecz po poddaniu obrazu cyfrowej analizie można wyznaczyć pewne parametry charakteryzujące przepływ [3]. Metody fotograficzne pozwalają nie tylko na określenie kształtu pęcherzyków czy struktury przepływu, ale również na wyznaczenie prędkości poruszania się pęcherzyków. Występuje wiele ich odmian o różnym stopniu złożoności [4–6], jednak wymagają one dużego nakładu obliczeniowego w przypadku przestrzennego odwzorowania kształtu pęcherzyka.

W celu określenia przestrzennego rozkładu prędkości opracowano metodę wyznaczania trajektorii ruchu pęcherzyków na podstawie obrazów wideo uzyskanych z prześwietlenia przepływu z dwóch prostopadłych kierunków (Rys. 1) [7]. W odróżnieniu od tomografii optycznej obraz jest rejestrowany dla pewnego wycinka przepływu a nie jak w tomografii optycznej jedynie dla bardzo wąskiego przekroju poprzecznego. Na podstawie dwóch obrazów jest wyznaczany środek masy dla poszczególnych pęcherzyków, które są odpowiednio archiwizowane. Kolejne klatki obrazów umożliwiają określenie zwrotu jak i wartości wektora prędkości poruszającego się pęcherzyka. Na tej podstawie możliwe jest określenie trajektorii ruchu pęcherzyków poruszających się w cieczy.

Bardzo istotne jest otrzymanie klatek obydwóch obrazów synchronizowanych w czasie, gdyż tylko wtedy jest możliwe dokonanie rekonstrukcji obrazu. Rejestrację obrazu z dwóch stron można przeprowa-



Rys. 1. Tomograf obrazowy

dzić za pomocą dwóch kamer z synchronizowanym czasem otwierania migawki. Rozwiązanie to jest jednak trudne w realizacji technicznej. Z tego powodu opracowano układ pomiarowy polegający na zastosowaniu układu luster umożliwiający rejestrację obrazu z wykorzystaniem tylko jednej kamery. Rozwiązanie to nie wymaga kłopotliwego synchronizowania obrazów.

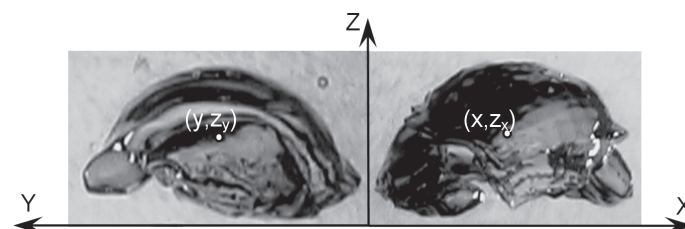
### Wyznaczanie trajektorii ruchu pęcherzyków

Na rys. 2 przedstawiono typowy obraz przepływu zarejestrowany kamerą tomografu obrazowego. Prędkości poruszających się pęcherzyków znacznie różnią się od siebie. W trakcie przepływu niejednokrotnie dochodzi do łączenia się pęcherzyków, jak i ich dzielenia się na mniejsze, co znacznie utrudnia wyznaczenie trajektorii. Algorytm wyznaczenia trajektorii polega na wyodrębnieniu z obrazu obiektów, a następnie na podstawie analizy kolejnych klatek obrazu wyznacza się przesunięcie przestrzenne obiektów. Na podstawie określenia drogi jaką pokonują poszczególne pęcherzyki w kolejnych klatkach obrazu wyznacza się ich prędkość.



Rys. 2. Typowy obraz pęcherzyków zarejestrowany tomografem obrazowym

Ponieważ kształt poruszającego się pęcherzyka ulega ciągłym zmianom w czasie jako punkt względem którego określa się drogę przebytą przez pęcherzyk przyjęto środek masy. Ponieważ z tomografu otrzymuje się dwa obrazy pęcherzyka widzianego z dwóch stron wyznacza się środek masy dla każdego z obrazów oddzielnie (Rys. 3).



Rys. 3. Idea wyznaczania środka masy pęcherzyka

Wyznaczenie współrzędnych  $x_c$  i  $y_c$  środka masy oblicza się na podstawie zależności:

$$x_c = \frac{\sum A_p x_i}{\sum A_p} \quad y_c = \frac{\sum A_p y_i}{\sum A_p} \quad (1)$$

gdzie:

$A_p$  – pole powierzchni jednego piksela obrazu  
 $x_i, y_i$  – wartości współrzędnych  $i$ -tego piksela

Wzdłuż osi  $Z$  środka masy dla dwóch obrazów pęcherzyków mogą się od siebie nieznacznie różnić, stąd przyjęto wartość uśrednioną dla wartości  $z_x$  i  $z_y$ .

$$z = \frac{z_x + z_y}{2} \quad (2)$$

gdzie:

$z_x$  – współrzędne środka masy dla rzutni  $XZ$

$z_y$  – współrzędne środka masy dla rzutni  $YZ$

Wyznaczenie środka masy oparte jest na przyporządkowaniu obrazowi pęcherzyka pikseli, których kolor odpowiada zadanemu przedziałowi. W praktyce znacznie łatwiej jest to uczynić dla obrazu binarnego (dwukolorowego). W tym celu obrazy z kamery wideo poddano procesowi binaryzacji [7]. Wyniki takiej operacji dla obrazów z rys. 2 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Obraz pęcherzyków po binaryzacji

Prędkość poruszającego się pęcherzyka można wyznaczyć na podstawie wektora przesunięcia w kolejnych klatkach obrazu, przy znanym czasie wynikającym z liczby klatek na sekundę. Prędkość taką wyraża wzór:

$$v_g = \frac{\sqrt{(x_n + x_{n-1})^2 + (y_n + y_{n-1})^2 + (z_n + z_{n-1})^2}}{t_k} \quad (3)$$

gdzie:

$x_n, y_n, z_n$  – współrzędne środka masy dla  $n$ -tej klatki obrazu

$x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}$  – współrzędne środka masy dla  $n-1$  klatki obrazu

$t_k$  – czas pomiędzy kolejnymi klatkami obrazu

### Wyniki badań przepływu pęcherzyków

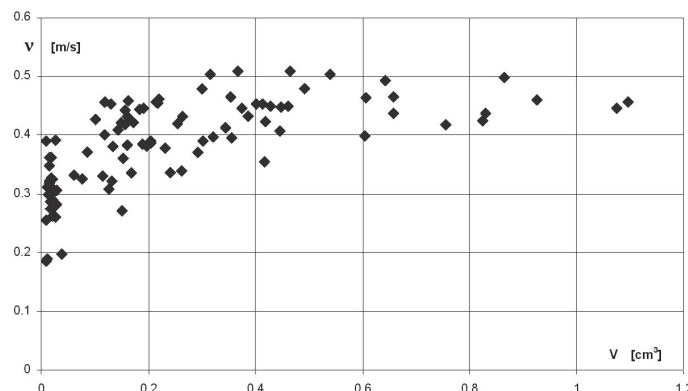
Przeprowadzono przykładowe badanie przepływu pęcherzyków w kolumnie aeracyjnej o wymiarach  $0,2 \times 0,2 \times 1,5$  m. Do badań zastosowano dyszę, której średnica wynosiła 2 mm i zarejestrowano obrazy przepływu pęcherzyków dla strumienia powietrza równego  $0,001 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Na rys. 5 przedstawiono wyniki rekonstrukcji trajektorii ruchu dla sekwencji obrazów z rys. 2. Jak wynika z przedstawionych wyników dla nawet bardzo małych przepływów nie wszystkie pęcherzyki zachowują kształt kulisty. Ponadto ruch takich pęcherzyków odbywa się po linii śrubowej, co powoduje ciągłą zmianę kształtu i ułożenia przestrzennego takich pęcherzyków. Dostrzegalne są znaczne deformacje kształtu, pomimo tego, że trajektoria ruchu w dalszym ciągu zachowuje kształt spirali. Obserwuje się sporadyczne łączenie się pęcherzyków lub ich rozpad.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy rozkład prędkości poruszających się pęcherzyków gazu z zależności od objętości pęcherzyka. Obrazuje to wyraźny wpływ objętości na jego prędkość poruszania się. Dla małych pęcherzyków dostrzegalny jest duży rozrzut prędkości. Spowodowane jest to niejednokrotnie tym, że małe pęcherzyki poruszające



Rys. 5. Rekonstrukcja trajektorii ruch pęcherzyków dla strumienia gazu  $0,001 \text{ m}^3/\text{h}$



Rys. 6. Zależność prędkości poruszania się pęcherzyków gazu od ich objętości

się w bliskim sąsiedztwie dużego pęcherza są porywane przez prądy wytwarzane przez ten pęcherz. Powoduje to, że prędkość poruszania się małego pęcherzyka jest wtedy znacznie większa, niż gdy ten sam pęcherzyk porusza się swobodnie.

### Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie oparte na tomografii obrazowej umożliwia wyznaczenie trajektorii ruchu pęcherzyków poruszających się w kolumnie aeracyjnej. Metoda ta umożliwia precyzyjne wyznaczenie trajektorii, a następnie na tej podstawie określenie prędkości lokalnych dla poruszających się pęcherzyków. Stanowi to bardzo pomocne narzędzie pomiarowe w badaniach procesów, w których istotna jest znajomość ruchu pęcherzyków.

### LITERATURA

- [1] Z. Orzechowski, J. Prywer, R. Zarzycki: Mechanika płynów w inżynierii środowiska. WNT Warszawa 1997.
- [2] Min-Yan Chang, B. I. Morsi: Chem. Eng. Science, **47**, 13-14, 3541 (1992).
- [3] R. Ulbrich, M. Krótkiewicz: Wykorzystanie metody automatycznej analizy obrazu do oceny struktury przepływu dwufazowego, IV Ogólnopolska Konferencja Przepływów Wielofazowych, Gdańsk 1994.
- [4] Ch. Brücker: Bubble interaction in swarms: A study of the wake structures with 3-D scanning particle image velocimetry (3-D SPIV), The 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Multiphase Flow, ICMF'98. Lyon France June 8-12, 1998.
- [5] H. Fogt, W. Häfner: Application of two-phase modelling to the time dependent flow in a gas-stirred vessel, FED-vol. 236, Fluids Engineering Division Conference ASME 1996.
- [6] G. Matsui, H. Monji: Behavior of Single Particle/Droplet/Bubble in Vertical Liquid Flow; Two-Phase Flow Modeling and Experimentation 1995.
- [7] J. Chalubiec., M. R. Rzaśa: Inż. Ap. Chem. **46**, nr 4-5, 24 (2007).