

SPOSÓB ANALIZY WYZNACZANIA TRAJEKTORII RUCHU PĘCHERZYKA GAZU POPRZECZ ŚLEDZENIE JEGO ŚRODKA MASY I ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ

Mariusz R. RZAŚA¹, Joanna BOGUNIEWICZ-ZABŁOCKA²

1. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny
tel.: 77 449 80 71 e-mail: m.rzasa@po.opole.pl
2. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny
tel.: 77449 88 76 e-mail: j.boguniewicz@po.opole.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono sposób analizy ruchu pęcherzyków powietrza oraz zwrócono uwagę na interakcje, jakie zachodzą pomiędzy nimi. Omówiono budowę stanowiska badawczego oraz ideę tomografu obrazowego za pomocą, którego dokonano pomiaru trajektorii ruchu pęcherzyków. Wyniki pomiaru przedstawiono w przestrzeni trójwymiarowej i na tej podstawie przeprowadzono analizę poszukującą charakterystycznych zachowań pęcherzyków podczas ruchu. W pracy sklasyfikowano kilka podstawowych mechanizmów dzielenia się pęcherzyków gazu.

Słowa kluczowe: tomograf, ruch pęcherzyków, trajektoria ruchu, mechanika.

1. WSTĘP

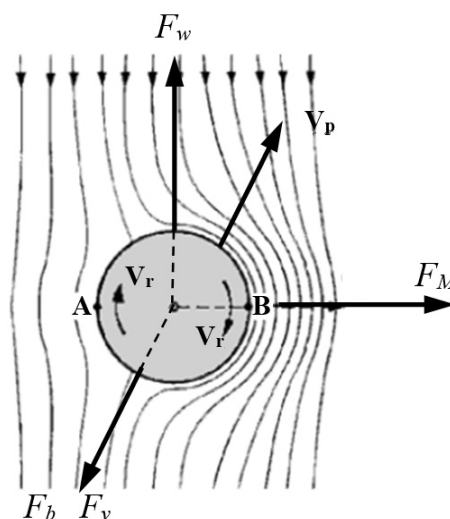
Pomimo wielu prac na temat ruchu pęcherzyków gazu w cieczy [1-5], zagadnienie to ciągle jest przedmiotem badań. Powodem jest bardzo złożony proces ruchu pęcherzyków. Dodatkowo utrudnia analizę ruchu pęcherzyków konieczność uwzględniania ruchu cieczy unoszącej pęcherzyki. Ze względu na złożoność tych zjawisk w celu oceny zachowań pęcherzyków niezbędne są badania eksperymentalne.

Ruch pęcherzyków gazu jest silnie zależy od rozkładu sił działających na poruszający się pęcherzyk. Na rysunku 1 przedstawiono podstawowy układ sił, jakie działają na pęcherzyk poruszający się w nieruchomej cieczy. W zależności od wielkości pęcherzyka oraz jego kształtu udział poszczególnych sił ulega ciągłej zmianie. Powoduje to, że trajektorie ruchu pęcherzyków poruszających się w cieczy mogą być bardzo nieregularne oraz często dochodzi do łączenia się pęcherzyków lub ich rozpadu.

Kształt pęcherzyka podczas ruchu rzadko zbliżony jest do kuli, kształt kulisty zachowują jedynie bardzo małe pęcherzyki [5]. W większości przypadków pęcherzyki przybierają kształt spłaszczonej elipsoidy, czaszy kulistej oraz ich kształty mogą być bardzo nieregularne [4].

Na prędkość unoszenia się pęcherzyka ma wpływ jego kształt oraz jego orientacja przestrzenna. Ponieważ pęcherzyki mogą zmieniać położenie względem swojej osi obrotu, co w przypadku kształtu odbiegającego od kul będzie powodowało zmianę kierunku wektora prędkości. W opisie ruchu należało uwzględnić cztery podstawowe siły: siłę wyporu F_w , siłę oporu F_v oraz siłę bezwładności F_b , które są

zwrócone przeciwnie do kierunku ruchu oraz siła Magnusa F_M powstająca w wyniku cyrkulacji gazu wewnątrz pęcherzyka i opływającej go cieczy. Siła oporu jest skierowana przeciwnie do kierunku przepływu.



Rys. 1. Rozkład sił działających na pęcherzyk podczas jego ruchu

Siłę wyporu F_w , określa prawo Archimedes'a:

$$F_w = (\rho_c - \rho_g)gV_p \quad (1)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2], ρ_g , ρ_c – gęstość: odpowiednio gazu i cieczy [kg/m^3], V_p – objętość pęcherzyka [m^3],

Ogólną zależność na siłę oporu F_v zapisuje się następującą zależnością:

$$F_v = C_D A_p \rho_c \frac{v_p |v_p|}{2} \quad (2)$$

gdzie: C_D – współczynnik oporu, A_p – pole przekroju pęcherzyka w płaszczyźnie poziomej [m^2], v_p – prędkość przepływu pęcherzyka [m/s].

Określenie współczynnika oporu C_D dla pęcherzyków, które ciągle zmieniają swój kształt nie jest sprawą prostą a niejednokrotnie niemożliwą do dokładnego wyznaczenia. Jedną z propozycji przybliżonego wyznaczenia współczynnika C_D zaproponował Akio Tomiyama [6], uzależniając go od stopnia zanieczyszczenia cieczy. Równanie (3) dotyczy cieczy czystej, natomiast równanie (4) jest dla cieczy lekko zanieczyszczonej, a równanie (5) dla cieczy zanieczyszczonej. Przykład ten ukazuje złożoność zagadnienia i stopień trudność w jednoznacznym określeniu wartości współczynnika oporu, gdyż niemożliwe jest uwzględnienie wszystkich czynników, jakie mają wpływ na jego wartość.

$$C_D = \max \left[\min \left[\frac{16}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) ; \frac{48}{Re} \right] ; \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (3)$$

$$C_D = \max \left[\min \left[\frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) ; \frac{72}{Re} \right] ; \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (4)$$

$$C_D = \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) ; \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (5)$$

gdzie: Eo - liczba Eötvösa, Re - liczba Reynoldsa

Liczby Eötvösa i Reynoldsa zdefiniowano następująco:

$$Eo = \frac{g (\rho_c - \rho_g) d_p^2}{\sigma_c} \quad (6)$$

$$Re = \frac{v_p d_p \rho_c}{\eta_c} \quad (7)$$

gdzie: d_p - średnica pęcherzyka [m], σ_c - współczynnik napięcia powierzchniowego cieczy [N/m], η_c - lepkość dynamiczna cieczy [Pa·s],

Siła Magnusa wywołuje ruch pęcherzyka w kierunku poprzecznym. Jest to spowodowane powstaniem różnicy ciśnień na przeciwległych krańcach pęcherzyka (punkty A i B, rys.1). Wartość siły Magnusa można wyznaczyć z równania Bernoulli'ego. Stąd wzór na siłę Magnusa przyjmuje następującą postać [7, 11]:

$$F_M = \rho_c \frac{\pi d_p^2}{4} v_p v_r \quad (8)$$

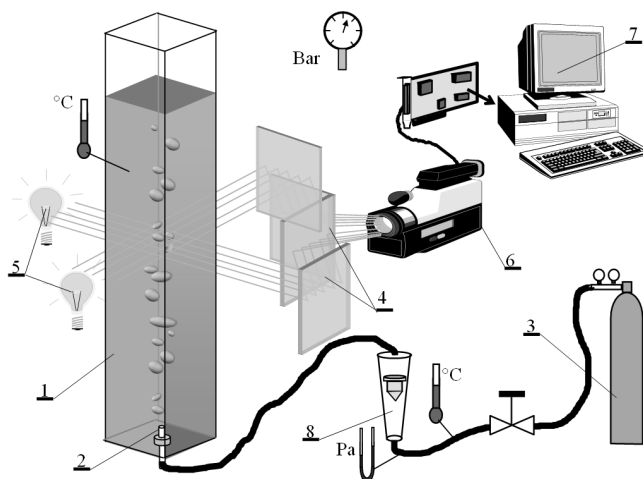
gdzie: v_r - prędkość cyrkulacji powietrza [m/s],

Cyrkulacja powietrza wewnątrz pęcherzyka jest uzależniona zarówno od wymiarów pęcherzyka jak i jego kształtu. Jednoznaczne wyznaczenie tej prędkości jest bardzo trudne, a niejednokrotnie niemożliwe. Stąd dla ruchu pęcherzyków niejednokrotnie siłę Magnusa wyznacza się na podstawie zależności empirycznych [6, 8].

Powyższa analiza skłania do wniosku, iż wyznaczenie trajektorii ruchu pęcherzyków na drodze teoretycznej jest bardzo skomplikowane. Zatem wymagane jest uzupełnienie rozważań teoretycznych o wyniki eksperymentalne. W pracy przedstawiono metodę pomiarową jak również wyniki pomiaru zachowań pęcherzyków powietrza poruszających się w nieruchomej cieczy.

2. BUDOWA STANOWISKA

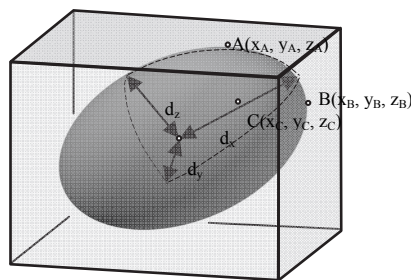
Budowę stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2. Podstawowym elementem jest pionowa kolumna 1 o wymiarach 0,2x0,2x1,5 m wypełniona wodą. W podstawie zainstalowano dyszę 2, przez którą doprowadzane jest powietrze z butli gazowej 3, którego przepływ jest mierzony za pomocą rotametu 8, przy kontrolowanych warunkach zewnętrznych. W środkowej części kolumny zainstalowano zespół zwierciadeł 4. Źródła światła stanowią dwie lampy halogenowe 5 o mocy 1500 W. Obraz jest rejestrowany za pomocą kamery cyfrowej 6, a następnie poddany analizie obrazu w komputerze 7.



Rys. 2. Budowa stanowiska badawczego

Układ lusterek składa się z dwóch zwierciadeł ustawionych pod kątem 45° i dwóch 22,5°. Umożliwia to uzyskanie obrazów kolumny z dwóch stron prześwietlania zsynchronizowanych w czasie. Rozwiązanie to umożliwia rejestrację obrazu z wykorzystaniem tylko jednej kamery, co nie wymaga kłopotliwego synchronizowania obrazów, znacznie upraszczając proces rekonstrukcji.

Na podstawie obrazu otrzymanego z kamery określa się przestrzenny rozkład prędkości. Kolejne klatki obrazów umożliwiają określenie zwrotu, jak i wartości wektora prędkości poruszającego się pęcherzyka, co z kolei umożliwia określenie trajektorii ruchu. Ze względu na możliwość analizy ruchu pęcherzyka bardzo istotna jest znajomość jego objętości. Przybliżoną wartość objętości obliczono na podstawie przybliżenia kształtu pęcherzyka elipsoidą. (rys. 3).

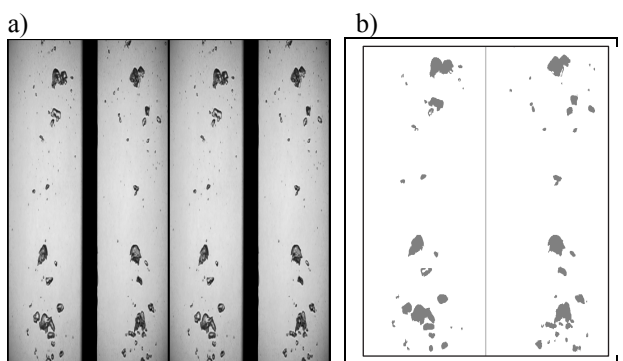


Rys. 3. Idea przybliżenia kształtu pęcherzyka elipsoidą

Wyznaczenie wymiarów elipsoidy dokonuje się w procesie rekonstrukcji. Proces ten polega na wyznaczeniu wartości średnic elipsoidy oraz punktów styczności

(A, B, C) elipsoidy z bokami graniastosłupa opisanego na elipsoidzie. Określenie zwrotów i kierunków poszczególnych średnic pozwoli na określenie orientacji przestrzennej pęcherzyka. Proces ten został szczegółowo opisany w pracy [10].

Na rysunku 4a przedstawiono typowy obraz przepływu zarejestrowany kamerą. Prędkości poszczególnych 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 rekonstrukcję. Algorytm rekonstrukcji jest kilkietapowy. Pierwszy etap polega na wyodrębnieniu z obrazu obiektów oraz posegregowania ich a następnie na podstawie analizy kolejnych klatek obrazu wyznacza się ich położenie. Dokonuje się tego na obrazie, który został przetworzony na postać binarną (rys. 4b) [9].

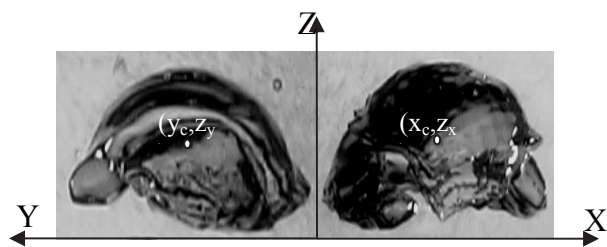


Rys. 4. Obraz przepływu pęcherzyków: a) z kamery wideo b) po binaryzacji

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. 5). Wyznaczenie współrzędnych x_c i y_c środka masy oblicza się na podstawie zależności:

$$x_c = \frac{\sum A_p x_i}{\sum A_p} \quad y_c = \frac{\sum A_p y_i}{\sum A_p} \quad (9)$$

gdzie: A_p – pole powierzchni jednego piksela obrazu, x_i , y_i – wartość współrzędnej i-tego piksela



Rys. 5. Idea wyznaczania środka masy pęcherzyka

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

$$z = \frac{z_x + z_y}{2} \quad (10)$$

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

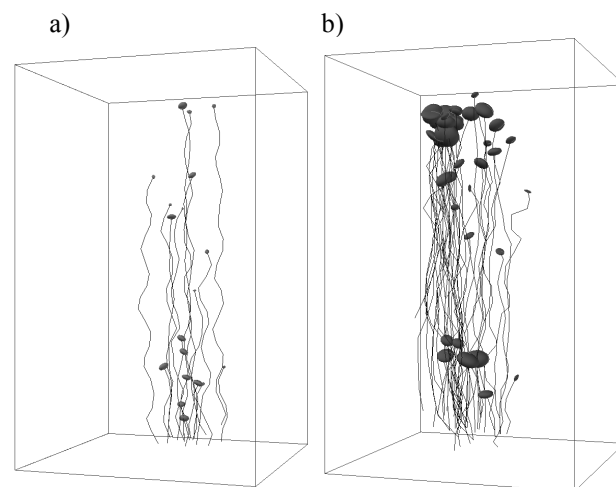
$$v_g = \frac{\sqrt{(x_n + x_{n-1})^2 + (y_n + y_{n-1})^2 + (z_n + z_{n-1})^2}}{t_k} \quad (11)$$

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

3. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzono badania przepływu pęcherzyków gazu w kolumnie aeracyjnej, dla różnych strumieni gazu wydostającego się z dyszy o średnicy 2 mm. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki zarejestrowanych trajektorii ruchu grup pęcherzyków.

Dla bardzo małych strumieni gazu (rys. 6a) ruch pęcherzyków odbywa się po linii śrubowej, powoduje to ciągłą zmianę kształtu i ułożenia przestrzennego pęcherzyków. Jak wynika z przedstawionych wyników, nawet bardzo małe pęcherzyki nie zawsze zachowują kształt kulisty. Objętość poruszających się pęcherzyków jest zbliżona, aczkolwiek większe pęcherze poruszają się zdecydowanie bliżej rdzenia gazowego i to one mają decydujący wpływ na ruch pęcherzy poruszających się obok niego. Trajektorie pęcherzyków znajdujących się w środku rdzenia gazowego są bardziej zbliżone do linii prostej, niż pęcherzyków znajdujących się w znacznej odległości od rdzenia gazowego. Podczas przepływu dla małych strumieni gazu łączenie się pęcherzyków lub rozpada w zasadzie nie występuje. Różnice w objętości pęcherzyków powstają jedynie podczas ich tworzenia się.



Rys. 6. Rekonstrukcja trajektorii ruch pęcherzyków dla strumieni gazu a) 0,27 cm³/s b) 5,5 cm³/s

Dla większych strumieni gazu znacząco zwiększają się turbulencje w rdzeniu gazowym (rys. 6b). Powoduje to, że rdzeń gazowy zaczyna oscylować wokół pionowej osi

kolumny. Charakterystyczne jest to, że większe pęcherzyki poruszają się w roju, natomiast mniejsze niejako odrywają się od cyrkulującego roju i poruszają się niezależnymi torami, do czasu aż z powrotem nie zostaną wchłonięte przez cyrkulujący rdzeń. Wiele pęcherzyków łączy się ze sobą lub łączy się w większe aglomeraty i porusza się, jako grupa ciągle mieszających się ze sobą pęcherzyków. Bardzo często dochodzi do rozpadu dużych pęcherzyków na kilka mniejszych. Występuje wiele interakcji pomiędzy poruszającymi się pęcherzykami z uwagi na zwiększoną liczbę pęcherzyków oraz większe prędkości poruszania się w bezpośrednim sąsiedztwie. Obserwuje się silne wzajemne oddziaływanie pęcherzyków, stąd ich ruch jest zakłócony, w zasadzie nie występuje tu swobodny ruch pęcherzyków. Zwiększanie strumienia gazu zwiększa intensywności cyrkulacji rdzenia gazowego, co prowadzi do powiększenia jego średnicy.

Jak wynika z przeprowadzonych badań możliwa jest analiza ruchu pęcherzyków gazu uwzględniając ich orientację przestrzenną, która ma wpływ na trajektorię ruchu pęcherzyka. Umożliwia to również analizę interakcji wzajemnych pęcherzyków. Jest to bardzo istotne zagadnienie dla mechaniki płynów i mechanizmu poruszania się pęcherzyków.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzono analizę typowych zachowań pęcherzyków gazu poruszających się w wodzie. Analiza wskazuje na bardzo złożony charakter ruchu oraz wzajemnych oddziaływań. Wpływ na to ma wiele czynników niejednokrotnie niemożliwych do określenia na drodze teoretycznej. Przedstawiona metoda pomiarowa umożliwia wyznaczenie istotnych parametrów ruchu niezbędnych do opracowań teoretycznych ruch pęcherzyka. Wyniki pracy posłużą do opracowania modeli teoretycznych opisujących ruch i interakcje pomiędzy poruszającymi się pęcherzykami. Zagadnienie to jest bardzo istotne z punktu wymiany masy, oraz określania intensywności napowietrzania w wielu gałęziach przemysłu chemicznego, oczyszczania ścieków czy przemysłu wydobywczym.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Kolev N. I., *Multiphase Flow Dynamics, 1 Fundamentals*, Springer 2007.
2. Kolev N. I., *Multiphase Flow Dynamics, 2 Mechanical Interaction*, Springer 2010.
3. Brennen C. E., *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press 2005
4. Orzechowski Z., *Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabaticznie*, PWN Warszawa 1990
5. Dziubiński M., Prywer J. *Mechanika płynów dwufazowych*; WNT, Warszawa 2010
6. Tomiyama A.: *Struggle With Computational Bubble Dynamics*, Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon France June 8-12, 1998
7. Mikielwicz D., *Modelowanie wymiaru pędu i ciepła w dwufazowym przepływie pęcherzykowym*, Monografia Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002r.
8. Tomiyama A., Sou A., Zun I., Kanami N., Sakaguchi T., *Effects of Eötvös Number and Dimensionless Liquid Volumetric Flux on Lateral Motion of a Bubble in Laminar Duct Flow*, *Advances in Multiphase Flow*, Elsevier nr 3, 1995
9. Chałubiec J., Rząsa M.R., Dobrowolski B., *Application of image tomography for determination of gas flow parameters in aeration proces*, 5th International Symposium on Process Tomography in Poland, 25-26 August Zakopane 2008.
10. Rząsa M.R., *Zastosowanie tomografii obrazowej do pomiaru parametrów poruszających się pęcherzyków gazu - algorytm rekonstrukcji*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9a/2011.
11. Tomiyama A., Sou A., Zun I., Kanami N., Sakaguchi T., *Effects of Eötvös Number and Dimensionless Liquid Volumetric Flux on Lateral Motion of a Bubble in Laminar Duct Flow*, *Advances in Multiphase Flow*, Elsevier nr 3, 1995

ANALYSIS METHOD FOR DETERMINING GAS BUBBLE TRAJECTORY THROUGH THE TRACK OF THE BUBBLE CENTROID AND SPATIAL ORIENTATION

The paper presents a method to analyze the movement of gas bubbles and highlights the interactions that occur between them. The authors describe the construction of the test stand and the idea of tomograph used to measure the trajectory of bubbles. The measurement results are shown in three-dimensional space and on that basis the analysis of characteristic behavioral of bubbles during movement was done. The method of the trajectory determination has been analysed and a way of technical realization of the presented problem have been discussed. The study classified some basic sharing mechanisms of gas bubbles. This solution makes it possible to analyze trajectory of the moving gas bubbles.

Keywords: tomography, gas bubble movement, trajectory, mechanic.