

DOI: 10.5604/01.3001.0010.4607

PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH OPARTYCH NA TOMOGRAFII OPTYCZNEJ W ZASTOSOWANIU DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW PRZEPIŁYWÓW GAZ-CIECZ

Mariusz Rzaśa, Ewelina Podgórn

Politechnika Opolska, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej

Streszczenie. W pracy przedstawiono przegląd metod tomografii optycznej, stosowanych do badania przepływu dwufazowego gaz-ciecz. Wykorzystanie tomografii optycznej pozwala wyznaczać parametry ruchu fazy rozproszonej (gazowej). W opracowaniu przedstawiono ideę pomiaru oraz opisano własne metody prześwietlania obiektów badanych. Przeprowadzono analizę możliwości zastosowania poszczególnych metod do pomiaru wybranych parametrów przepływu dwufazowego. Opisano metodę prześwietlania równoległą i rozproszonej wiązką światła oraz trójwymiarową metodę analizy obrazu. Prezentowane metody mogą posłużyć do pomiaru pęcherzyków w cieczach przezroczystych, ale również ruchu kropli cieczy w gazie, ciał stałych w cieczy lub ciał stałych w gazie.

Słowa kluczowe: tomografia optyczna, analiza obrazu, przepływ dwufazowy

REVIEW OF METHODS OF MEASURING BASED ON OPTICAL TOMOGRAPHY APPLICABLE TO DETERMINING FLOW PARAMETERS OF GAS-LIQUID

Abstract. Optical tomography is a diagnostic method that allows to obtain a wide range of images. With these images, you can perform the submission of horizontal or spatial test object. This paper presents a number of imaging methods used to study the flow of two-phase gas-liquid. The use of optical tomography allowed to track the movement of air bubbles during their flow through the test column. The presented methods can be used to measure the bubbles in transparent fluids, but also the movement of a drop of liquid in gas, solids in liquids or solids in the gas.

Keywords: Optical tomography, image processing, two-phase flow

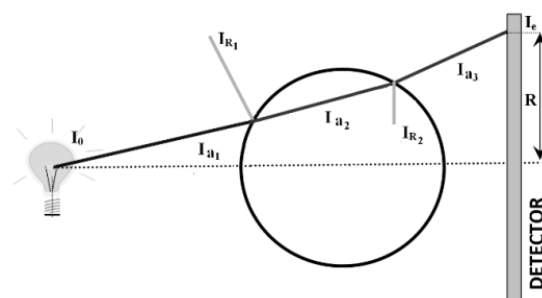
Wstęp

Przepływem dwufazowym nazywa się wspólny ruch dwóch faz, fazy ciągłej i rozproszonej. W szczególności mogą występować przepływy dwufazowe z oboma fazami ciągłymi. Fazą ciągłą oraz rozproszonej może być zarówno ciecz jak i gaz. Przez pojęcie faza rozumie się jednorodną pod względem fizycznym część układu, oddzieloną od pozostałej jego części granicą faz. Przy przechodzeniu przez tę granicę następuje skokowa zmiana stanu termodynamicznego i często zmiana stanu chemicznego. Na ruch i zjawiska zachodzące w mieszaninie dwufazowej mają wpływ oddziaływania zewnętrzne od strony ścian przewodu i elementów urządzeń, a także oddziaływania wewnętrzne (międzyfazowe), wywołujące zmianę pól prędkości, ciśnienia i temperatur.

Różnorodność form przepływu sprawia, że pomiar parametrów mieszaniny dwufazowej zalicza się do jednych z najbardziej złożonych problemów metrologii (parametry geometryczne i przepływowe). Dodatkowo pomiary utrudnia stochastyczny charakter zjawisk zachodzących w każdej fazie. Powoduje to, że koncentracja fazy rozproszonej zależy od położenia i czasu. Szybkie zmiany w czasie i przestrzeni: powierzchni międzyfazowej, koncentracji, lokalnych prędkości przemieszczania się faz oraz kierunku ich przemieszczania, w znacznym stopniu utrudnia prowadzenie pomiarów. W pracy przedstawiono przegląd różnych rozwiązań układowych, opartych na tomografii optycznej, mających zastosowanie do wyznaczania wybranych parametrów mieszaniny dwufazowej.

1. Idea optycznej metody pomiarowej

Idea tomografii optycznej oparta jest na zjawiskach optycznych zachodzących na granicy faz. Zasada działania polega na prześwietlaniu badanego przekroju wiązką światła, a następnie pomiarze natężenia światła przechodzącego przez przekrój w wybranym kierunku (rys. 1). Światło emitowane ze źródła przechodząc przez przekrój badany ulega częściowej absorpcji I_a zarówno przez gaz, jak i ciecz. Ponadto po natrafieniu na pęcherzyk gazu strumień światła ulega na granicy faz odbiciu I_R i rozproszeniu, jest to przyczyną znacznego osłabienia natężenia światła docierającego do detektora [6]. Miarą obecności pęcherzyka w polu widzenia detektora jest stosunek natężenia światła I_e padającego na czujnik, do natężenia promieniowania światła emitowanego ze źródła I_0



Rys. 1. Idea optycznej metody pomiarowej

Rozkład natężenia światła zależy od geometrii układu, a pęcherzyk gazu można potraktować jak cienką soczewkę, na której następuje załamanie promienia świetlnego z jednoczesnym odbiciem i częściową absorpcją światła. Stosunek natężenia światła wyraża się ogólną zależnością [3]:

$$\frac{I_e}{I_0} = \delta_r \delta_b \delta_a \quad (1)$$

gdzie: δ_r – współczynnik odbicia światła, δ_b – współczynnik rozproszenia światła, δ_a – współczynnik absorpcji światła.

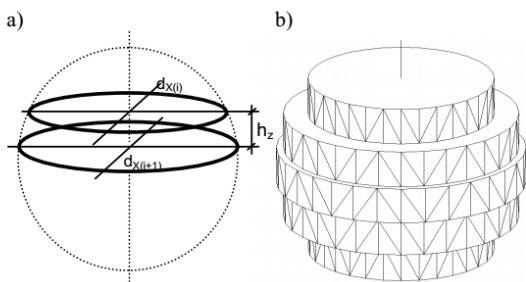
Szczegółowy opis zjawiska osłabienia wiązki światła na skutek natrafienia na pęcherzyk znajduje się w pracach [4, 5, 12]. Na błędy związane z detekcją i pomiarem parametrów poruszających się cząstek istotny wpływ ma rodzaj zastosowanego źródła światła. Budowę typowych źródeł światła stosowanych w tomografii optycznej opisano w pracy [8]. Nie bez znaczenia jest również budowa detektora. Bardzo często, w celu zmniejszenia kąta aperturowego, stosuje się tulejki kolimacyjne oraz odpowiednie układy kształtowania sygnału elektrycznego pochodzącego z detektora. Szczegóły budowy układu detekcji omówiono w pracy [14].

Za pomocą metod optycznych możliwe jest wyznaczenie podstawowych parametrów fazy rozproszonej, do których zalicza się objętość pęcherzyków lub kropli, prędkość ich ruchu, trajektoria ruchu oraz wielkości pochodne takie jak udział objętościowy lub masowy. W zależności od potrzeb związanych z dokładnością pomiaru poszczególnych wielkości w tomografii optycznej stosuje się prześwietlanie równoległą wiązką światła lub

wiązką rozproszoną. W dalszej części pracy przedstawiono kilka rozwiązań technicznych oraz podano ich wady, zalety i zakres zastosowania.

2. Wyznaczanie objętości poruszających się pęcherzyków gazu z zastosowaniem równoległej wiązki światła

Małe pęcherzyki gazu przyjmują kształty kuliste lub kształty brył obrotowych. Dla tego rodzaju przepływów wystarczające jest prześwietlenie tylko z jednego kierunku. Objętość można wyznaczyć na podstawie przybliżenia kształtu pęcherzyka szeregiem walców (rys.2).



Rys. 2. Przybliżenie kształtu pęcherzyka a) idea b) wyznaczenie objętości [10]

Pomiaru średnicy przekroju badanego dokonuje się poprzez pomiar poziomej natężenia światła, docierającego do poszczególnych czujników znajdujących się w detektorze (rys.3). Na rys. 3 przedstawiono budowę typowego detektora stosowanego w tomografii z równoległą wiązką światła. Detektor składa się z dwóch warstw równolegle ułożonych detektorów światłowodowych (górny-1 i dolny-2), które są od siebie oddalone o odległość s . Tego typu rozwiązanie umożliwia pomiar prędkości poruszających się pęcherzyków. Na podstawie prędkości poruszającego się pęcherzyka oblicza się wymiar h_z .



Rys. 3. Budowa detektora

Obliczenie objętości pęcherzyka polega na zsumowaniu objętości walców składających się na pęcherzyk, wzór na objętość przyjmuje następującą postać:

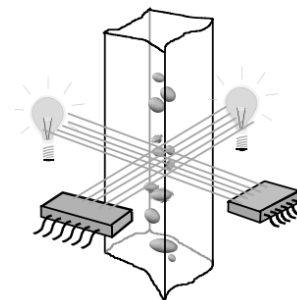
$$V = \sum_{i=1}^{n-1} V_i = \frac{h_z \pi}{4} \sum_{i=1}^{n-1} d_{(i)}^2 \quad (2)$$

gdzie: V_i – objętość składowa jednego walca, $d_{(i)}$ – średnice i -tego walca, h_z – wysokość walca, n – liczba walców składających się na pęcherzyk.

3. Rekonstrukcja obrazu z dwóch rzutów

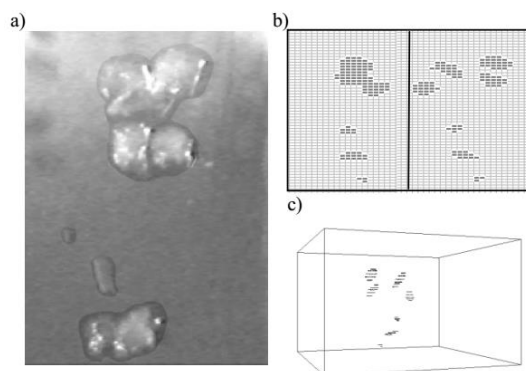
Rozwiązanie z prześwietlaniem obiektu z jednego kierunku, ma stosunkowo ograniczone zastosowanie. W przypadku pęcherzyków których kształt nie jest bryłą obrotową lub gdy w przepływie jest duża koncentracja pęcherzyków, pomiar prędkości i objętości poruszających się pęcherzyków jest możliwy za pomocą tomografu optycznego. Bardzo prostym rozwiązaniem może być rekonstrukcja obrazu na podstawie dwóch rzutów przekroju badanego (rys. 4). Czujnik takiego tomografu składa się z dwóch prostopadle ustawionych źródeł światła, i dwóch detektorów promieniowania światła. Wyniki pomiaru są gromadzone w pamięci komputera, gdzie następnie jest dokonywana rekonstrukcja obrazu, na podstawie której oblicza się podstawowe parametry przepływu gazu.

Rekonstrukcja polega na przybliżeniu kształtu pęcherzyka szeregiem elips. Różnica w stosunku do rozwiązania z prześwietlaniem z jednego kierunku polega na tym, że do wyznaczenia wymiarów pęcherzyka używa się dwóch średnic stanowiących podstawę wyznaczenia elipsy. Rozwiązanie takie może być zastosowane do pęcherzyków o kształtach zarówno obrotowych jak i nieregularnych. Pewną trudność w poprawnej rekonstrukcji kształtu pęcherzyków stanowi to, gdy w jednej płaszczyźnie znajduje się kilka pęcherzyków. Poprawna rekonstrukcja jest możliwa wymaga ona jednak zastosowania algorytmów uwzględniających dodatkową wiedzę na temat procesu. Jeden z takich algorytmów oparty na sieci neuronowej opisano szczegółowo w pracy [14].



Rys. 4. Tomograf z równoległą wiązką światła

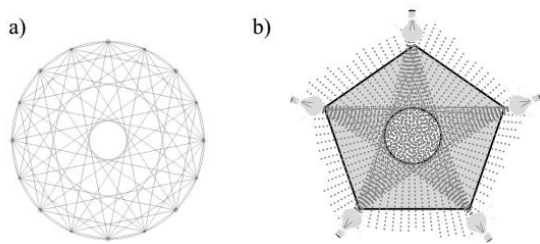
Wyniki działania tego rodzaju algorytmu przedstawiono na rysunku 5. W przypadku niewielkiej grupy pęcherzyków możliwe jest prawidłowe odtworzenie ich przestrzennego położenia. Jednakże metoda ta nie może być stosowana do większej liczby pęcherzyków poruszających się w tej samej płaszczyźnie. Rozwiązanie to w zastosowaniu do pęcherzyków o kształcie nieregularnym prowadzi do powstawania dużych błędów odwzorowania [9] i nie zaleca się stosowania tej metody przy wyznaczaniu objętości pęcherzyków.



Rys. 5. Obrazy grupy poruszających się pęcherzyków widziane: a) z kamery, b) z detektorów tomografu, c) po rekonstrukcji

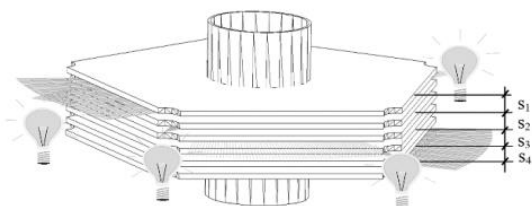
4. Tomograf z rozproszoną wiązką światła

Prześwietlenie rozproszoną wiązką światła nie wymaga zastosowania złożonych układów optycznych skupiających światło. Wymaga natomiast stosowania odmiennych algorytmów rekonstrukcji obrazu. Niejednokrotnie stosuje się w tym przypadku algorytmy znane z tomografii rentgenowskiej [2]. Metoda polega na emitowaniu wiązki z jednego punktowego źródła światła, a następnie dokonywaniu detekcji w promieniu pola rozproszenia wiązki (rys. 6). Rozwiązanie przedstawione na rysunku 6a wymaga zastosowania źródeł światła i detektorów o dużym kącie aperturowym, co nie zawsze jest łatwe do wykonania. Ponadto w rozwiązaniu tym, największa strefa nieczułości występuje w środku przekroju badanego. W pewnym stopniu poprawia to asymetryczne ustawienie źródeł i detektorów światła [12]. Zaletą tego rozwiązania jest stosunkowo niewielka ilość par źródło-detektor.



Rys. 6. Idea tomografu optycznego z wiązką rozproszoną: a) z symetrycznie ułożonymi sensorami oraz źródłami światła (naprzemiennie ułożone w ściance) [14] b) ze źródłem umieszczonym na zewnątrz [11]

W rozwiązaniu z rysunku 6a można dostrzec, że w środku obiektu badanego nie ma żadnej drogi promienia świetlnego pomiędzy źródłem, a detektorem. Powoduje to powstawanie martwej strefy w środku obiektu. Metodę umożliwiającą zmniejszenie obszaru nieczułości opisano w pracy [14]. Rozwiązanie z rysunku 6b polega na umieszczeniu źródeł światła w pewnej odległości od obiektu badanego, w taki przypadku możliwe jest zastosowanie źródła światła o stosunkowo małym kącie aparaturowym. W rozwiązaniu z rysunku 6b nie ma niedogodności w postaci obniżonej czułości w środku przekroju badanego, lecz znacząco zwiększa to wymiary tomografu. Z uwagi na konieczność określania prędkości poruszających się pęcherzyków zaleca się przesunięcie płaszczyzn prześwietlania (rys. 7). Umożliwia to wyznaczenie prędkości poruszających się pęcherzyków, stosując metody korelacyjne. Przykładowo dla rozwiązania składającego się z pięciu projekcji można stosować przesunięcie wszystkich wiązek światła o odległość oraz można przesunąć tylko kilka wybranych, a pozostałe są umieszczone w jednej płaszczyźnie.



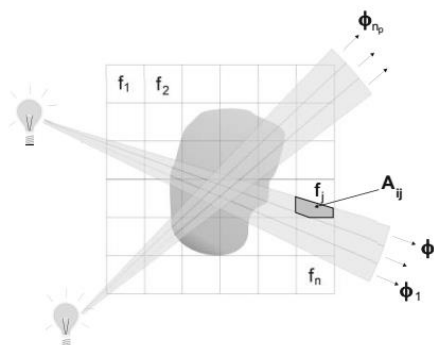
Rys. 7. Przesunięcia wiązek światła w zgodzie z kierunkiem ruchu pęcherzyków [7]

Bazując na metodach rekonstrukcji znanych z tomografii rentgenowskiej bardzo popularny jest algorytm oparty na metodzie macierzowej.

$$W[n, n_p] \cdot F[n] = \Phi[n_p] \tag{3}$$

W równaniu tym $F[n]$ oznacza macierz wartości funkcji obrazu (wartość poszczególnych pikseli), natomiast $\Phi[n_p]$ stanowi wektor dyskretnych wartości pomiarowych. W równaniu tym bardzo istotne jest określenie macierzy wrażliwości W .

W pracy [11] przedstawiono różne metody generowania macierzy wrażliwości. W zastosowaniu do przepływów gaz-ciecz dobre wyniki rekonstrukcji obrazu uzyskuje się przy zastosowaniu metody śledzenia obszaru ograniczonego wiązką światła [14].



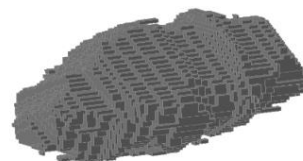
Rys. 8. Idea wyznaczania macierzy wrażliwości metodą śledzenia obszaru ograniczonego wiązką światła [11]

Metoda ta uwzględnia geometrię układu pomiarowego, a wartości elementów macierzy wrażliwości są równe stosunkowi pola powierzchni pokrywanej przez promień wiązki światła do sumy pól wszystkich promieni przechodzących przez dany piksel (rys. 8). A zatem wagi różnych promieni światła, które prześwietlają dany piksel obrazu będą różne. Nie bez znaczenia jest również, położenie wybranego piksela obrazu, gdyż udział powierzchniowy wiązki światła silnie zależy od odległości od źródła światła.

$$w_{i,j} = \begin{cases} \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_p} A_{ij}} & \text{dla } k_j \geq 2 \\ 0 & \text{dla } k_j < 2 \end{cases} \tag{4}$$

gdzie: k_j – liczba promieni przechodzących przez j-te pole funkcji obrazu, A_{ij} – pole powierzchni, jaką pokrywa wiązka Φ_i w polu obrazu f_j .

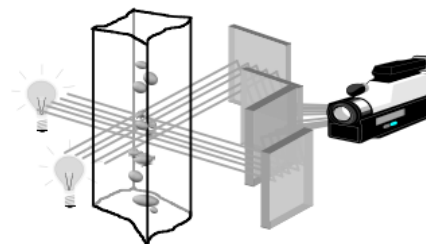
W celu poprawy, jakości obrazu i wyraźnego określenia granicy faz niejednokrotnie stosuje się progowanie. Na rysunku 9 przedstawiono przykładową trójwymiarową rekonstrukcję kształtu pęcherzyka gazu. Pomiary wykonano z czasem próbkowania $t_p=10$ ms, liczba pikseli składająca się na obraz w jednej płaszczyźnie wynosiła 100. Prędkość poruszania się pęcherzyka wynosiła $v=0,045$ m/s. Pęcherzyk składa się z 54183 elementów. Stosując tego rodzaju metody pomiarowe możliwe jest zarówno wyznaczenie kształtu, jak i obliczenie objętości poruszających się pęcherzyków.



Rys. 9. Przykładowa rekonstrukcja 3D pęcherzyka [12]

5. Trójwymiarowa analiza obrazu

Do pełnego opisu ruchu pęcherzyków gazu poza znajomością objętości poruszających się pęcherzyków istotna jest również informacja o trajektorii jego ruchu. Metody polegające na prześwietlaniu przepływu tylko w jednym wybranym przekroju nie umożliwiają wyznaczenia trajektorii ruchu pęcherzyków.

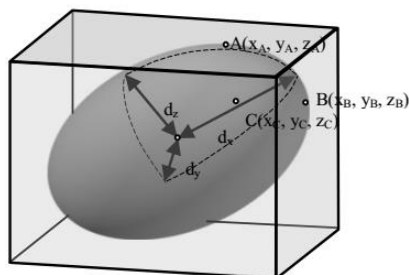


Rys. 10. Budowa skanera do trójwymiarowej analizy obrazu [14]

W odróżnieniu od tomografii optycznej obraz jest rejestrowany dla pewnego wycinka przepływu, a nie jak w tomografii optycznym dla wybranego przekroju poprzecznego. W przypadku cyfrowej rejestracji obrazu możliwa jest nie tylko obserwacja przepływu, lecz po poddaniu obrazu cyfrowej analizie można wyznaczyć pewne parametry charakteryzujące przepływ. Wadą tego rozwiązania jest duży nakład obliczeniowy w przypadku przestrzennego odwzorowania kształtu pęcherzyka.

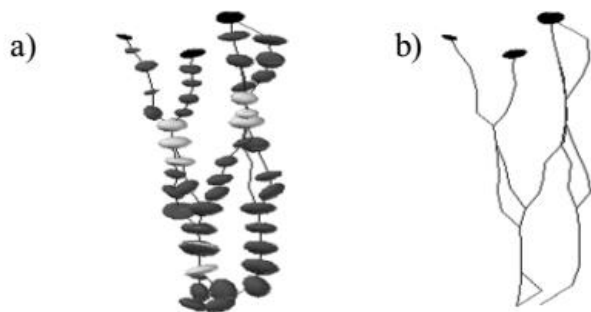
Na rysunku 10 przedstawiono jedno z rozwiązań układu do trójwymiarowej analizy obrazu. Metoda polega na synchronicznym zarejestrowaniu obrazów przepływu pęcherzyków z dwóch prostopadłych kierunków. Ponieważ rejestracja obrazu z dwóch kierunków za pomocą dwóch kamer wymaga synchronicznego otwierania migawki, zaproponowano

rozwiązanie polegające na rejestracji obrazu za pomocą jednej kamery z odpowiednim układem lusterek. Zwierciadła ustawiono odpowiednio pod kątem $2 \times 45^\circ$ i $2 \times 22.5^\circ$. Analiza i korelacja obrazowa w ten sposób uzyskanych klatek obrazu umożliwia określenie zwrotu jak i wartości wektora prędkości poruszającego się pęcherzyka.



Rys. 11. Przybliżony obraz pęcherzyka za pomocą elipsoidy w przestrzeni 3D [13]

Wektory prędkości miejscowych są wyznaczone na podstawie przemieszczenia się środka masy pęcherzyka. Obraz z kamery jest poddany procesowi binaryzacji [1], a następnie określone są współrzędne środka masy. Z uwagi na analizę ruchu pęcherzyków gazu oraz wzajemne interakcje, bardzo istotna jest informacja na temat prędkości lokalnej poruszających się pęcherzyków, a niejednokrotnie wystarczająca jest przybliżona wartość objętości pęcherzyków. Z tego względu celowe jest przybliżenie kształtu oraz orientacji przestrzennej za pomocą elipsoidy (rys.11). Tego typu figura geometryczna może opisywać usytuowanie pęcherzyka w przestrzeni w oparciu o trzy wartości liczbowe (średnice elipsy d_x , d_y , d_z oraz kątów nachylenia poszczególnych osi elipsy względem układu współrzędnych). Szczegółowy algorytm wyznaczania tych parametrów opisano w pracy [13].



Rys. 12. Przykładowy ruch pęcherzyków gazu: a) przestrzenny obraz ruchu pęcherzyków, b) trajektorie ich ruchu

Przykładowy obraz przedstawiono na rysunku 12. Na podstawie tego rodzaju obrazów możliwa jest nie tylko analiza ruchu pęcherzyków gazu, ale możliwe jest również śledzenie oscylacji jakie wykonuje pęcherzyk podczas ruchu.

6. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie oparte na tomografii optycznej umożliwia pomiar bardzo małych obiektów o średnicach kilku milimetrów. Możliwe jest rekonstruowanie kształtu poruszających się pęcherzyków oraz obliczenie ich podstawowych parametrów. W przypadku przepływów dwufazowych, gdzie następuje wyraźna granica faz, możliwa jest detekcja obecności gazu w wybranym pikselu przestrzeni pomiarowej, za pomocą zapisu dyskretnego i za pomocą wartości logicznej „0” lub „1”.

Zastosowanie dyskretnego przetwarzania sygnałów znacznie upraszcza konstrukcję tomografu i algorytm rekonstrukcji. Zaproponowane rozwiązania umożliwiają wyznaczanie podstawowych parametrów przepływu z zadowalającą dokładnością, wystarczającą do jakościowej oceny zjawisk zachodzących w przepływach dwufazowych.

Literatura

- [1] Chalubiec J., Rząsa M.R., Dobrowolski B.: Application of image tomography for determination of gas flow parameters in aeration process. 5th International Symposium on Process Tomography in Poland, 25–26 August Zakopane 2008.
- [2] Dehghani H., Srinivasan S., Pogue B.W., Gibson A.: Numerical modeling and image reconstruction in diffuse optical tomography. *Philosophical Transactions of The Royal Society A* 367/2009, 3073–3093.
- [3] Dugdale P., Green R.G., Hartley A.J., Jackson R.G., Landauro J.: Characterisation of Single Bubbles by an Optical Tomographic System. Conference of Workshop on Process Tomography, Karlsruhe 1993.
- [4] Dugdale P., Green R.G., Hartley A.J., Jackson R.G., Landauro J.: Optical sensors for process tomography. *Computational Mechanics Publications* 1993.
- [5] Halliday D., Resnick R., Walker J.: Podstawy fizyki, Tom 4, PWN Warszawa 2007.
- [6] Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M.: Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique. *Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing 13/2002, 308–315.
- [7] Rząsa M.R.: Metoda wyznaczania kształtu pęcherzyków powietrza poruszających się w przepływie dwufazowym gaz-ciecz z wykorzystaniem tomografu optycznego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2/2010, 109–110.
- [8] Rząsa M.R., Płaskowski A.: Application of Optical Tomography for Measurements of Small Gas Flows 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada 2003.
- [9] Rząsa M.R., Płaskowski A.: Application of optical tomography for measurements of aeration parameters in large water tanks. *Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing 14(2)/2003, 199–204.
- [10] Rząsa M.R., Sawicki J.: Pomiar ilości gazu wydzielającego się z mas formiarskich, *Pomiary Automatyka Kontrola* 6/2003.
- [11] Rząsa M.R.: Selection of parameters of the optical tomograph applied for tests of gas bubble shapes, *Chemical and Process Engineering*, 35(1)/2014, 19–33.
- [12] Rząsa M.R.: The Optical Tomograph for Tests of Dust Concentration Distribution: 2nd International Symposium on Process Tomography in Poland 2002. Wrocław 11th -12th September 2002.
- [13] Rząsa M.R.: Zastosowanie tomografii obrazowej do pomiaru parametrów poruszających się pęcherzyków gazu - algorytm rekonstrukcji. *Przegląd Elektrotechniczny* 9a/2011, 116–120.
- [14] Rząsa R. M.: Ocena możliwości zastosowania tomografii optycznej w badaniu dwufazowych procesów przepływowych, *Monografia*, Polska Akademia Nauk, Katowice 2011.

Dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa
e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Opolskiej o specjalności Automatyka i metrologia elektryczna. Zatrudniony w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Posiada stopień doktora o specjalności Budowa i Eksploatacja Maszyn. Habilitację uzyskał na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechniki Częstochowskiej. Prace naukowe prowadzi z zakresu pomiaru przepływów dwufazowych.



Mgr inż. Ewelina Podgórná
e-mail: e.podgorni@po.opole.pl

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej, o kierunku Inżynieria środowiska - gospodarka wodno-ściekowa. Zatrudniona w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Prace naukowe prowadzi z zakresu sedimentacji zawiesin pokoagulacyjnych.



otrzymano/received: 20.09.2016

przyjęto do druku/accepted: 15.02.2017