

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Zastosowanie filmów nagrywanych szybką kamerą w analizie dynamiki wzrostu pęcherzy gazowych

*EWELINA SUSZCZYŃSKA, WOJCIECH MENCEL, ROMUALD MOSDORF*  
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

### STRESZCZENIE

W pracy zaproponowano metodę analizy dynamiki ruchu powierzchni rozdziału faz opartą na analizie klatek filmu wykonanego szybką kamerą. Zastosowano algorytmy: desaturacji, filtr Sobela, inwersji, binaryzacji, dylatacji oraz erozji. Zaproponowana metoda pozwala na analizę dynamiki zmian w czasie położenia powierzchni pęcherzy w długich przedziałach czasu. Metodę wykorzystano w analizie dynamiki powstawania pęcherzy powietrza w prostokątnym minikanale wypełnionym wodą destylowaną. W celu weryfikacji poprawności metody przeprowadzono analizę częstotliwościową ruchu ścianki pęcherzy. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi z analizy sygnału rejestrowanego z zastosowaniem czujnika laserowego.

### Using the high speed video in analysis of air bubbles growth dynamics

### ABSTRACT

In the paper the method of analysis of dynamics of gas-liquid interface movement has been presented. In analysis the frames from high speed video have been used. The image processing technique and the Sobel operator have been used. The method can be useful for analysis of interface movement in long time period. In the paper the method has been used for analysis of movement of bubbles wall in the rectangular channel. The Fourier analysis of obtained data has been prepared. The results of calculation has been compared with measurement of frequency of bubbles departure using the laser sensor.

## 1. WSTĘP

Jedną z najczęściej stosowanych technik pomiarowych w analizie przepływów dwufazowych w kanałach jest zastosowanie szybkiej kamery. Technika ta pozwala na wizualizację zachodzących z dużą prędkością procesów. Porównanie zarejestrowanych w odstępach czasu obrazów pozwala na ocenę szybkości zmian w czasie położenia powierzchni rozdziału faz. Jednak analiza dynamiki wymaga rejestracji zmian położenia powierzchni rozdziału faz w długich przedziałach czasu. W tym przypadku konieczne jest opracowanie algorytmów pozwalających na przetwarzanie dużej ilości klatek filmu w celu tworzenia długich szeregów czasowych pozwalających na identyfikację zmiany w czasie wybranych cech obrazu. W pracy przedstawiono kroki przetwarzania klatek filmu wykonanego szybką kamerą. Wykorzystano algorytmy: desaturacji, filtr Sobela, inwersji, binaryzacji, dylatacji oraz erozji. Zaproponowana metoda pozwala na rekonstrukcję występujących w długich przedziałach czasu zmian położenia powierzchni pęcherzy. Uzyskane w ten sposób dane mogą być przydatne w analizie dynamik powstawania i oddziaływania pęcherzy gazowych.

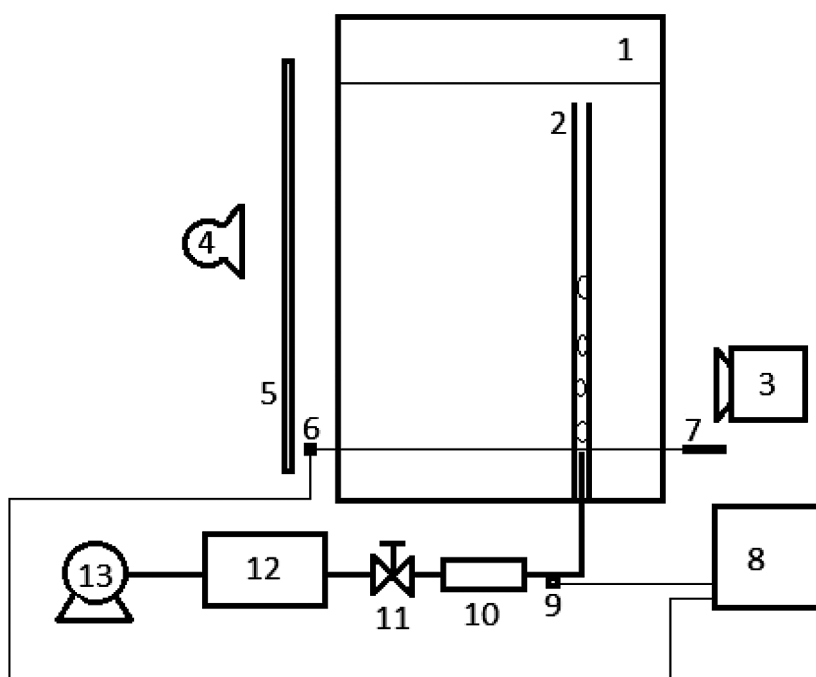
Opracowaną metodę zastosowano do analizy formowania się kolejnych pęcherzy wydostających się metalowej dyszy do płaskiego minikanalu. Minikanaly mają duże zastosowanie w analizie medycznej i chemicznej. Dzięki systemom MEMS (micro-electro-mechanical-system), jest możliwe wykonywanie coraz mniejszych stanowisk laboratoryjnych i aparatur medycznych [1]. Stosując MEMS można ograniczyć ilość potrzebnej badanej próbki jak i ograniczyć ilość zużywanych odczynników, jest to tak zwana technologia lab-on-a-chip [2]. Najczęściej spotykanymi i najlepiej zbadanymi są minikanaly o kołowym przekroju poprzecznym. Ostatnimi laty badaczy zaintrygowały minikanaly o prostokątnym, kwadratowym i trapezowym przekroju poprzecznym, które mogą być bardziej wydajne. Badano zarówno wpływ kształtu kanału i rodzaju cieczy na charakter przepływów dwufazowych. Wyniki badań dotyczących przepływów dwufazowych w płaskich kanałach omówione są między innymi w pracach [3-5].

## 2. STANOWISKO POMIAROWE

Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na Rysunku 1. W eksperymencie sprężone powietrze wytwarzane było przez kompresor powietrza (13), następnie przechodziło przez: zbiornik wyrównawczy (12), zawór (11), rotametr (10) i mosiężną dyszę o wewnętrznej średnicy  $\varnothing 1,1\text{mm}$ . Pęcherze powietrza odrywające się od dyszy poruszały się w prostokątnym pionowo usytuowanym, szklanym kanale (2) o wymiarach  $16 \times 2 \times 50\text{mm}$ , umieszczonym w szklanym zbiorniku (1) o wymiarach  $400 \times 400 \times 700\text{mm}$  wypełnionym wodą destylowaną. Wahania ciśnienia powietrza mierzone były za pomocą czujnika ciśnienia (9) o zakresie pomiarowym  $0-10\text{kPa}$ . Fototranzystor (6) mierzył częstotliwość odrywania się pęcherzy od dyszy. Ciśnienia i sygnał z fototranzystora były rejestrowane za pomocą systemu akwizycji danych (8) z częstotliwością próbkowania  $2000\text{Hz}$ . Ruch pęcherzy powietrza był nagrywany jednocześnie kamerą (3) rejestrującą obraz z szybkością  $600\text{kl./s}$ . Przykładowe obrazy zarejestrowane podczas eksperymentu przedstawiono na Rysunku 2.

## 3. METODA PRZETWARZANIA OBRAZU

Pierwszy etap przetwarzania obrazu polegał na rozłożeniu zarejestrowanego filmu na klatki. Następnie, klatki filmu przekształcano do postaci czarno-białej.



**Rysunek 1.** Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik wody, 2 – prostokątny kanał, 3 – kamera fotograficzna Casio EX FX1, 4 – oświetlenie, 5 – przesłona rozpraszająca światło, 6 – fototranzystor, 7 – laser, 8 – stacja akwizycji danych (DT9800), 9 – czujnik ciśnienia (MPX12DP), 10 – rotametr (Kytola OY, A-2k), 11 – zawór, 12 – zbiornik wyrównawczy powietrza, 13 – kompresor powietrza

Do powyższych operacji wykorzystano aplikację bazującą na platformie Eclipse JDT, napisaną w ramach pracy magisterskiej Karola Lewandowskiego [6]. Przykładowa klatka filmu poddana procesowi przetwarzania została przedstawiona na Rysunku 3.

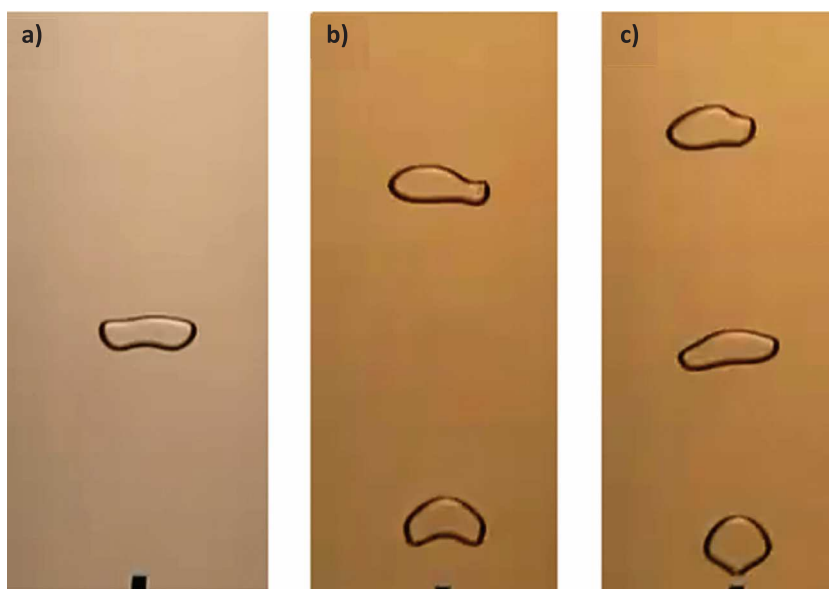
Pierwszy etap przetwarzania polegała na desaturacji. W tym algorytmie obliczano średnią ważoną wartości kolorów (RGB). W wyniku otrzymano obraz w odcieniach szali szarości przedstawiony na Rysunku 3b. Krawędzie pęcherzy wykrywano z wykorzystaniem gradientowej filtracji górnoprzepustowej w postaci filtru Sobela. Algorytm polega na wykonaniu dwuwymiarowego splotu obrazu A z dwoma macierzami 3x3 o postaci:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{---} \quad C_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A \quad (1)$$

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

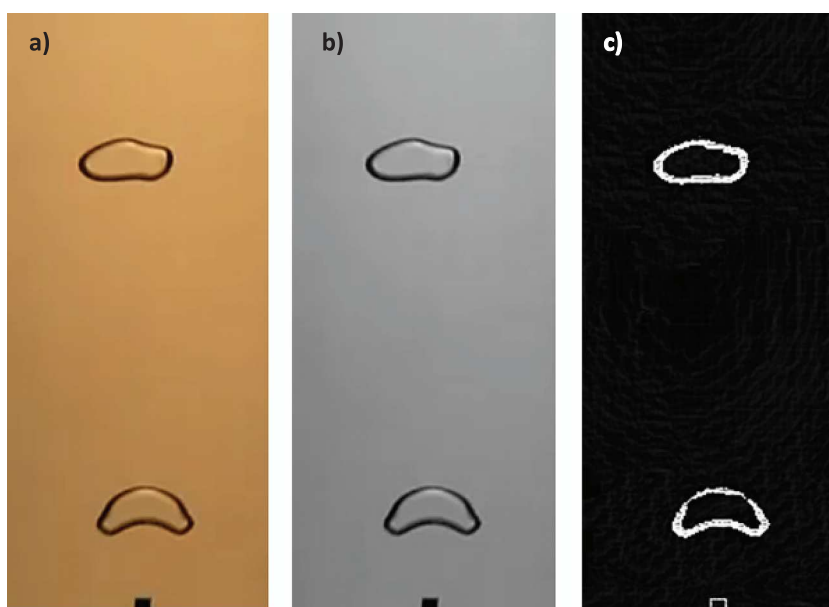
W wyniku obraz A przekształca się na obraz G przedstawiony na Rysunku 3c. Z uwagi na to, iż po operacji nastąpiła zamiana jasnych pikseli na ciemne, zastosowano dodatkowo operację inwersji obrazu, której efekt został przedstawiony na Rysunku 4a.

Obraz pokazy na Rysunku 4a jest obrazem w skali szarości. Przekształcenie go na obraz czarno biały wymaga zamiany pikseli o określonej skali szarości na czarne a pozostałych na białe. W rezultacie otrzymujemy obraz pokazany na Rysunku 4b. Następnym etapem przetwarzania obrazu było wykonanie operacji dylatacji, która spowodowała domknięcie się konturu pęcherza. Efekt zastosowania operacji dylatacji przedstawiono na Rysunku 4c. Wykonanie operacji dylatacji spowodowało dodatkowo zwiększenie powierzchni pęcherza. Zewnętrzny kontur pęcherza z przetworzonego obrazu z Rysunku 4c nałożono na obraz nie poddany żadnym operacjom przetwarzania obrazu. Kontur ten na Rysunku 5 zaznaczono kolorem białym.

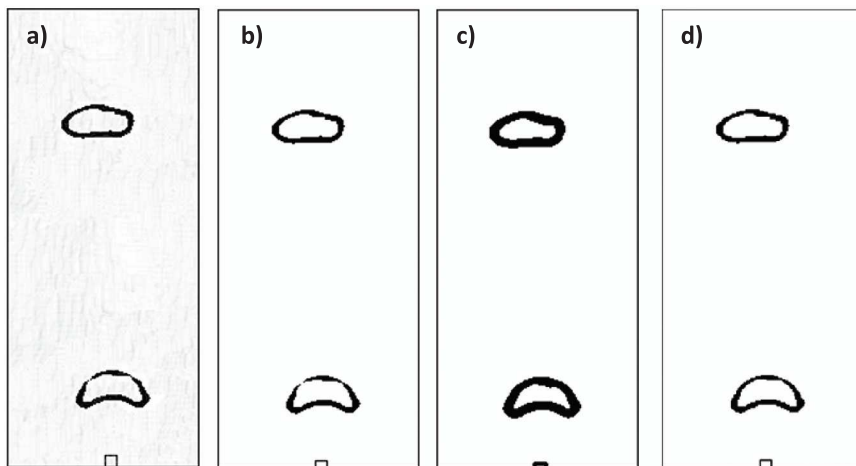


**Rysunek 2.** Przykładowe obrazy z eksperymentu zarejestrowane szybką kamerą z częstotliwością. a)  $f_1 = 1,8$  Hz, b)  $f_4 = 4,7$  Hz, c)  $f_7 = 7,8$  Hz

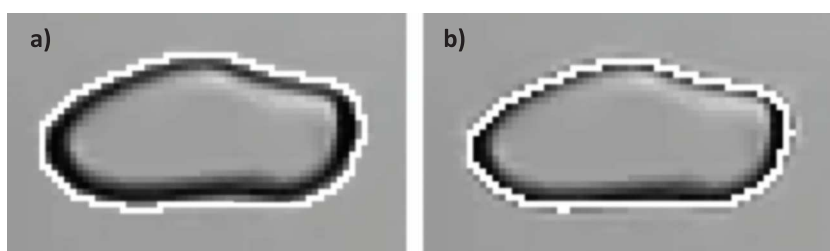
Zwiększenia powierzchni pęcherza poprzez dylatację zostało cofnięte poprzez wykonanie operacji erozji. Efekt zastosowania operacji erozji pokazano na Rysunku 4d. Wykonanie operacji erozji spowodowało pomniejszenie powierzchni pęcherza do rozmiaru jaki był przed przetwarzaniem obrazu. Porównanie powierzchni pęcherza przed i po przetwarzaniu klatek przedstawiono na Rysunku 5b. Kolorem białym zaznaczono zewnętrzny kontur pęcherza uzyskany po wszystkich operacjach przetwarzania obrazu. Kontur ten nałożono na obraz nie poddany obróbce.



**Rysunek 3.** Kolejne etapy przetwarzania klatki filmu: a) nie przetworzona, b) po desaturacji, c) po zastosowaniu algorytmu Sobela



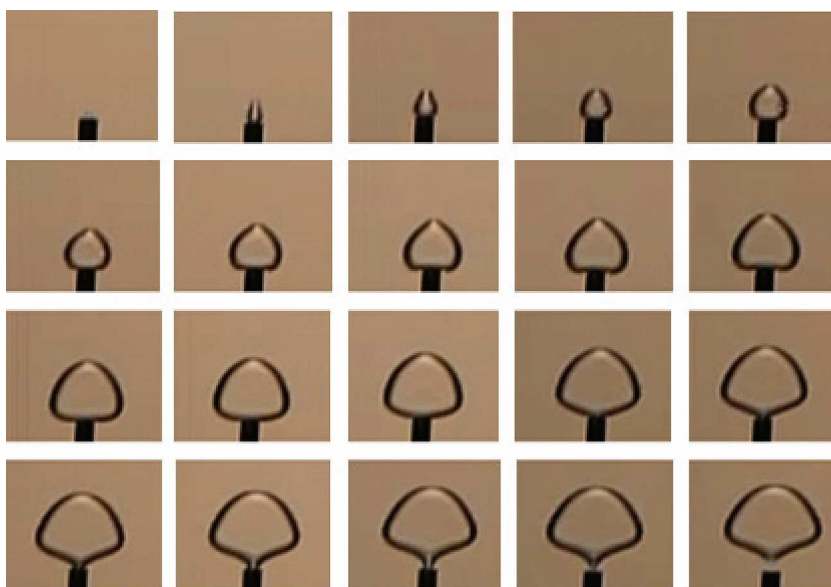
**Rysunek 4.** Klatka filmu przedstawiająca efekt: a) algorytmu inwersji, b) algorytmu binaryzacji, c) algorytmu dylatacji, d) algorytmu erozji



**Rysunek 5.** Kontury pęcherza. a) zwiększenia powierzchni pęcherza spowodowanego wykonaniem algorytmu dylatacji, b) zmniejszenia powierzchni pęcherza spowodowanego algorytmem erozji

#### 4. REKONSTRUKCJA RUCHU ŚCIANKI PĘCZERZA

Rosnący w kanale pęcherz przybiera kształt pokazany na Rysunku 6. Dla porównania kształt pęcherza powstającego w cieczy bez kanału pokazano na Rysunku 7.



**Rysunek 6.** Wzrost pęcherza gazowego w kanale prostokątnym dla  $q = 0,5 \text{ l/min}$ ; Kolejne zdjęcia wykonane co  $1/600 \text{ s}$ .

Do rekonstrukcji ruchu ścianki pęcherza w minikanale zastosowano przetworzone klatki filmu w postaci czarno-białej. Na otrzymanych obrazach 1 piksel był równy  $0,22 \text{ mm}$ . Program dla każdej klatki wyznaczał położenie zewnętrznego konturu pęcherza na wysokości  $2,2 \text{ mm}$  nad wylotem dyszy. Położenie lewej ścianki pęcherza oznaczono  $x1$  a prawej  $x2$ . Sposób pomiaru ruchu powierzchni rozdziału faz pokazano schematycznie na Rysunku 8b. Dla każdej częstotliwości odrywania się pęcherzy rejestrowano szeregi o długości 60s.

Przedstawione na Rysunku 8 wyniki pokazują, że poziomy rozmiar pęcherza zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości odrywania się pęcherzy. Wzrost częstotliwości odrywania się pęcherzy zmniejsza również niesymetryczność wzrostu pęcherza obserwowaną dla  $f = 1.8 \text{ Hz}$ . Zmniejszenie się poziomego rozmiaru pęcherza na skutek wzrostu częstotliwości odrywania

się pęcherzy można tłumaczyć jako efekt wpływu oddziaływania gazu wydostającego się z dyszy z górną powierzchnią pęcherza. Ta dodatkowa siła wydłuża pęcherz prowadząc w efekcie do zmniejszenia jego poziomego rozmiaru.

Kształt pęcherza rosnącego w płaskim kanale zdeteminowany jest nie tylko przez siłę grawitacji i oporu

cieczy ale również przez siły oporu ruchu powierzchni rozdziału faz po ściance kanału. Ta dodatkowa siła prowadzi do zmniejszenia wysokości pęcherza w stosunku do pęcherza, którego wzrost odbywa się w zbiorniku. Czas wzrostu pęcherza w kanale jest również uzależniony od oporu ruchu powierzchni międzyfazowej powietrze-woda po ściance kanału.

W celu oszacowania wpływu tej dodatkowej siły oporu na dynamikę wzrostu pęcherza w płaskim kanale uzyskane wyniki porównano do wyników uzyskanych w przypadku wzrostu pęcherza w zbiorniku (Rys. 7). Pomiar wzrostu pęcherza w zbiorniku wykonano dla tej samej dyszy



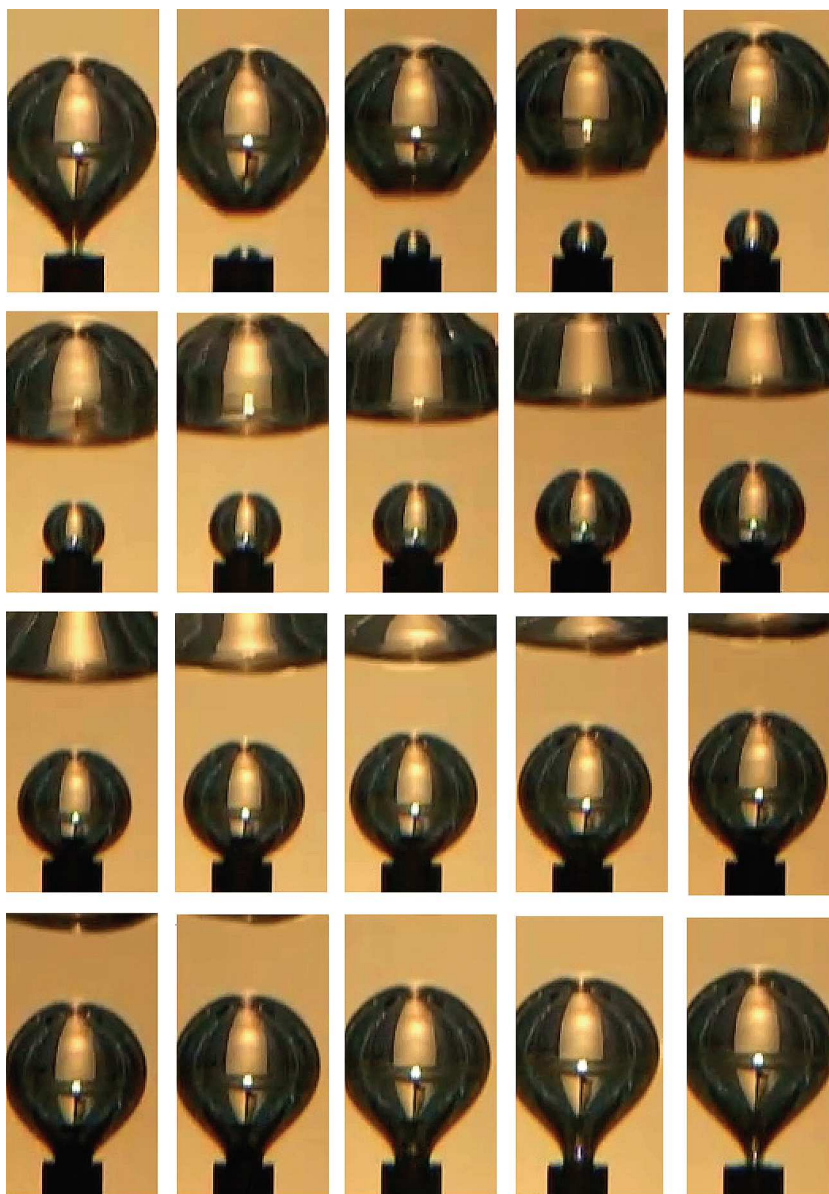
oraz dla tej samej częstotliwości odrywania się pęcherzy, wyniki pomiarów pokazano na Rysunku 9. Mierzono promień pęcherza ( $r$ ) oraz położenie środka ciężkości ( $z$ ) pęcherza.

Uzyskane wyniki pokazują, że:

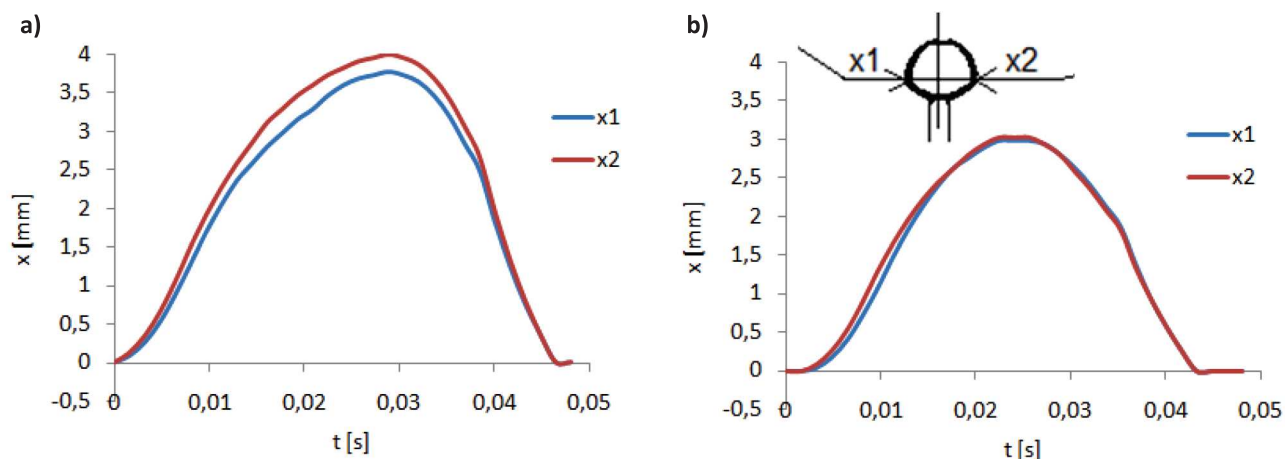
- początkowa faza wzrostu pęcherza w kanale jest podobna do wzrostu pęcherza w zbiorniku (gdy  $r < 1,5\text{mm}$ ),
- całkowity czas wzrostu pęcherza w kanale jest dłuższy do czasu wzrostu pęcherza w zbiorniku (w kanale:  $t = 0,036\text{s}$ , w zbiorniku:  $t = 0,011\text{s}$ ),
- pęcherz rosnący w zbiorniku ma kształt prawie kulisty podczas gdy pęcherz rosnący w kanale jest spłaszczony.

## 5. ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCI ODRYWANIA SIĘ PĘCHERZY

W eksperymencie pomiar wzrostu pęcherza odbywał się również z zastosowaniem czujnika laserowego, który rejestrował czas przecięcia wiązki lasera przez pęcherz. Analiza tak zarejestrowanego sygnału umożliwia bezpośredni pomiar częstotliwości odrywania się pęcherzy. Zaproponowana w pracy metoda analizy klatek filmu nagrywanego szybką kamerą może być wykorzystana do określenia częstotliwości odrywania się pęcherzy.



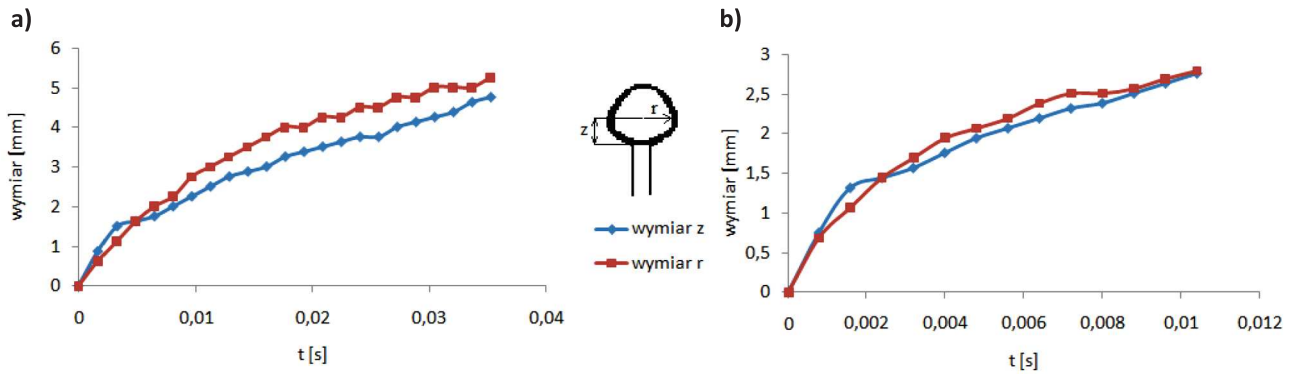
Rysunek 7. Wzrost pęcherza gazowego bez kanału dla  $q = 0,1 \text{ l/min.}$ ; kolejne zdjęcia wykonane co  $1/600 \text{ s}$ .



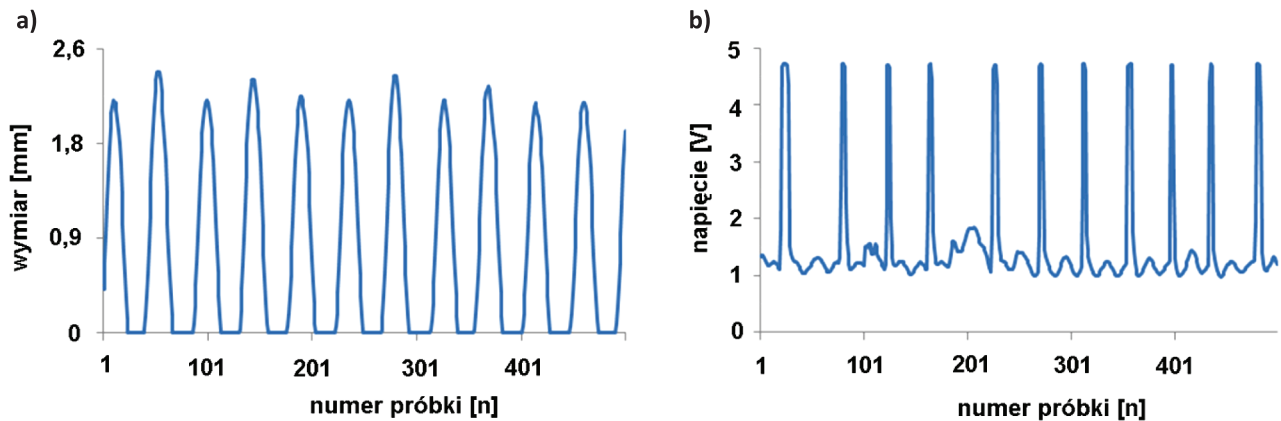
Rysunek 8. Ruch ścianek pęcherza dla częstotliwości: a)  $f = 1,8 \text{ Hz}$ , b)  $f = 8,6 \text{ Hz}$  oraz schemat pomiaru ruchu powierzchni rozdziału faz cieczy-gaz

Zestawienie danych rejestrowanych z czujnika laserowego z danymi uzyskanymi z analizy klatek filmu pokazano na Rysunku 10. Wyniki analizy fourierowskiej obu sygnałów pokazano na Rysunku 11. Na obu wykresach zaznaczono

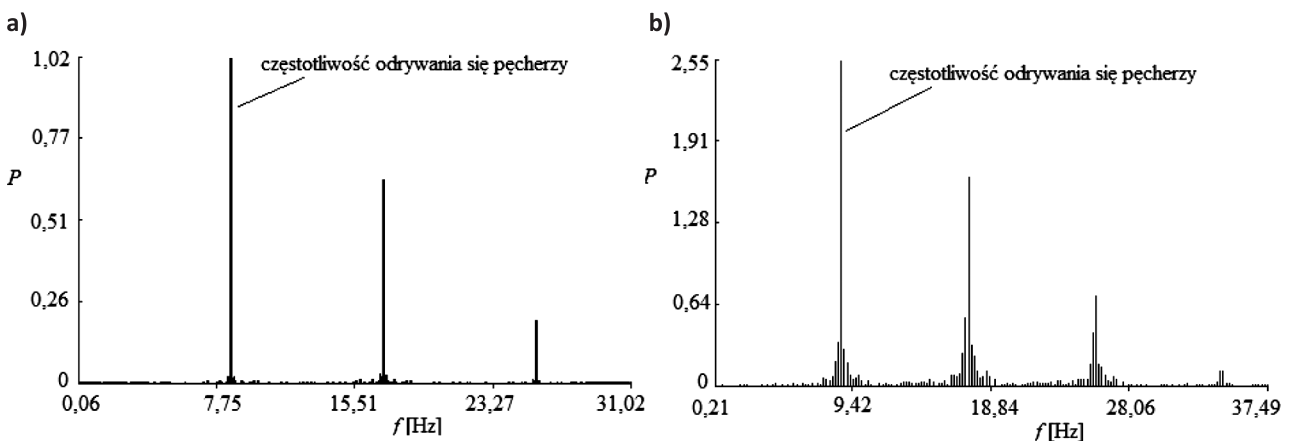
częstotliwość odrywania się pęcherzy. We wszystkich analizowanych przypadkach częstotliwości uzyskane z obu badanych szeregów były z dokładnością do jednego miejsca po przecinku takie same.



**Rysunek 9.** Porównanie zmian rozmiarów pęcherza rosnącego w zbiorniku i w kanale dla częstotliwości  $f_i=1,8$  Hz; a) wzrost pęcherza w prostokątnym kanale umieszczonym w zbiorniku, b) wzrost pęcherza w zbiorniku



**Rysunek 10.** Zestawienie danych rejestrowanych z czujnika laserowego z danymi uzyskanymi z analizy klatek filmu; a) dane rejestrowane za pomocą analizy obrazu przy wydatku równym  $q = 0,05$  l/min, b) dane rejestrowane za pomocą odczytu z czujnika laserowego przy wydatku równym  $q = 0,1$  l/min.



**Rysunek 11.** Widmo mocy na podstawie danych pochodzących z: a) pomiaru natężenia światła laserowego, b) szeregów pochodzących z analizy obrazu (x1)

## 6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie analizy obrazu do rekonstrukcji ruchu ścianki pęcherza, z zastosowaniem omawianych w pracy algorytmów, pozwala na jednoznaczną identyfikację pęcherzy oraz pozwala na ocenę położenia oraz szybkość ruchu powierzchni rozdziału faz. Poprawność identyfikacji potwierdzone zostało poprzez zastosowanie alternatywnej (bezpośredniej) metody pomiarowej przy pomocy czujnika laserowego. Zaproponowana w pracy metoda analizy może być stosowana zarówno w analizie formowa-

nia się pęcherza w kanale jak i bez kanału. Przy zastosowaniu analizy obrazu jest możliwe również określenie objętości pęcherzy gazowych. Dzięki dokładnej interpretacji obrazu jest możliwe śledzenie zmian kształtu powierzchni rozdziału faz. Metodę analizy obrazu rekonstrukcji ruchu ścianki można wykorzystać w przypadkach, kiedy nie jest możliwe uzyskanie wiarygodnych wyników z innych czujników pomiarowych.

## LITERATURA

- [1] King K.R., Wang S., Irimia D. A., A high-throughput microfluidic realtime gene expression living cell array. *Lab on Chip*, 7(1). 77-85, 2007.
- [2] Scholz O.A., Wolff A., Schumacher A., Drug delivery from the oral cavity: focus on a novel mechatronic delivery device. *Drug Discovery Today*, 13(5-6). 247-253, 2008.
- [3] Choi C.W., Yu D.I., Kim M.H., Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios Part I - Flow pattern pressure drop and void fraction, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 54, 616-624, 2011.
- [4] Kandlikar S.G., Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, 389-407, 2002.
- [5] Singh S.G., Kulkarni A., Impact of aspect ratio on flow boiling of water in rectangular microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 153-160, 2008.
- [6] Lewandowski K., Rekonstrukcja dynamiki pęcherzy powietrza z zastosowaniem metod analizy obrazu. Praca magisterska wykonania w Politechnice Białostockiej, 2010, Wydział Informatyki, promotor: R. Mosdorf.