

Zbigniew Garncarek

Propozycja jakościowej klasyfikacji struktur pęcherzykowych

Od wielu lat podejmuje się próby dokonania klasyfikacji struktur przepływu, w których uwzględnia się zarówno przestrzenne, jak i czasowe rozkłady koncentracji faz¹. Tworzy się mapy przepływów², wyróżnia pewne struktury jako wzorcowe³ oraz charakteryzuje struktury za pomocą pewnych parametrów ilościowych⁴. W niniejszym artykule, ograniczając rozważania o strukturze do rozkładu koncentracji faz, przeanalizowano niejednoznaczności w jej opisie za pomocą frakcji objętościowej, powierzchni międzyfazowej i rozkładu średnic obiektów fazy rozproszonej i zwrócono uwagę na ich przyczyny. Potem, zawężając dalsze rozważania do struktur pęcherzykowych, zaproponowano metodę ilościowej charakteryzacji struktury pozwalającą rozróżnić struktury nierozróżnialne stosowanymi dotąd metodami ilościowymi. Proponowana metoda ilościowa bazuje na miarach cech rozkładu skonstruowanych w pracy Autora⁵, a przykłady ich zastosowań zawierają wymienione w przypisie prace⁶. Zaproponowano

¹ J. Drahos, J. Cermak, *Diagnostics of gas liquid flow patterns in chemical engineering systems*, „Chem. Eng. Process” 1989, vol. 26, s. 147–164.

² O. Baker, *Simultaneous flow of oil and gas*, „Oil and Gas Journal” 1954, vol. 53, s. 185–194.

³ G. Hetsroni, *Handbook of multiphase systems*, Hemisphere Publ. Corp., Washington 1983.

⁴ O.C. Jones Jr, J.M. Delhaye, *Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review*, „Int. of Multiphase Flow” 1976, vol. 3, s. 89–116; R. Ulbrich, *Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz*, ZN SI, Opole 1989, s. 1–198.

⁵ Z. Garncarek, *Konstrukcje miar cech rozmieszczenia zbiorów punktowych z przykładami zastosowań w naukach przyrodniczych i technicznych*, ZN WSP, Opole 1993, s. 1–114.

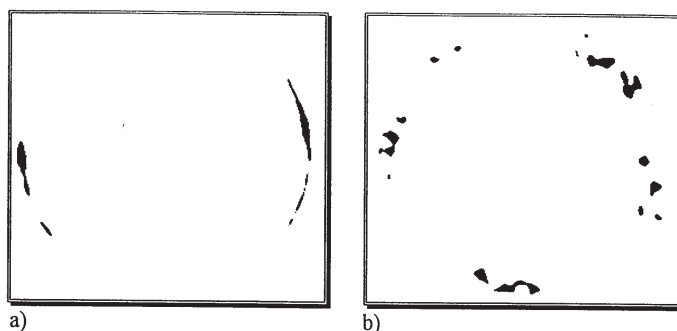
⁶ Z. Garncarek, J. Idzik i W. Spisak, *Three circle method in the investigations of shapes of gas bubble clusters in two-phase flow*, „Chem. Eng. Sci.” 1991, vol. 46, no. 8, s. 2156–2158; Z. Garncarek, J. Idzik i W. Spisak, *A new method in investigations of bubble cluster shapes in two-phase flow*, „Chem. Eng. Process” 1991, no. 30, s. 107–112; M. Zabierowski, *Observational paradoxa in extragalactic astronomy. The G_3 non-isomorphic clustering graph and the problem of the physical reality of the clustering tendency*, „Astrophysics and Space Science” 1993, no. 201, s. 125–130.

także szczegółową klasyfikację jakościową struktur pęcherzykowych uwzględniającą nasilenie cech kształtu skupisk pęcherzy wyznaczone za pomocą jednej ze wspomnianych miar. Wzorce struktur tej klasyfikacji zamieszczono na rys. 8, a ilościową ocenę różnic między nimi w tabeli 1.

1. Przykłady ilościowej charakteryzacji realnych struktur⁷

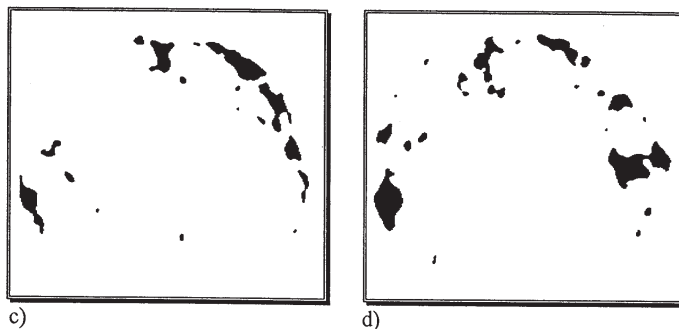
W tej części artykułu wykorzystano cztery serie zdjęć realnych struktur przepływu zbliżonego do pierścieniowego, które były już zaprezentowane wcześniej w innych pracach⁸. Na rys. 1–4 zamieszczono ich monochromatyczne obrazy otrzymane za pomocą skanera o rozdzielczości 600 dpi. Przeanalizowano wyznaczoną dla nich frakcję objętościową/powierzchniową i powierzchnię międzyfazową, by stwierdzić, w jakim stopniu dokładny jest opis ilościowy struktury za pomocą tych parametrów. Wykazano, że wymienione parametry nie wystarczają do jednoznacznego ilościowego opisu struktury, a skala powstających w takim opisie niejednoznaczności uniemożliwia klasyfikowanie struktur za pomocą tych parametrów.

Spis oznaczeń: VF – frakcja objętościowa/powierzchniowa, IS – powierzchnia międzyfazowa, DDODP – rozkład średnic obiektów fazy rozproszonej, PCD – rozkład koncentracji faz



⁷ Spis oznaczeń: VF – frakcja objętościowa/powierzchniowa, IS – powierzchnia międzyfazowa, DDODP – rozkład średnic obiektów fazy rozproszonej, PCD – rozkład koncentracji faz.

⁸ Z. Garncarek i R. Ulbrich, *The problem of ambiguity in the description of flow pattern by means of void fraction and interphase surface*, *Recent Development in Multiphase Flow – Conference Stawiska*, 18–20 June 1999, s. 89–103; Z. Garncarek i R. Ulbrich, *Problem niejednoznaczności w określeniu struktury przepływu mieszaniny dwufazowej*, V Ogólnopolska Konferencja nt. Przepływów Wielofazowych, Materiały, t. I, Gdańsk 15–17 października 1997, s. 71–76; Z. Garncarek, M. Krótkiewicz, R. Ulbrich, *Problem doboru cech w rozpoznawaniu struktur przepływu płynów*, III Krajowa Konferencja Naukowa nt. „Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe”, Wrocław 10–12 czerwca 1997, t. 2, s. 143–150.



Rys. 1. Rozkład koncentracji faz przy przepływie pierścieniowo-dyspersyjnym w rurze pionowej dla rosnących wartości strumienia cieczy przy stałym strumieniu gazu

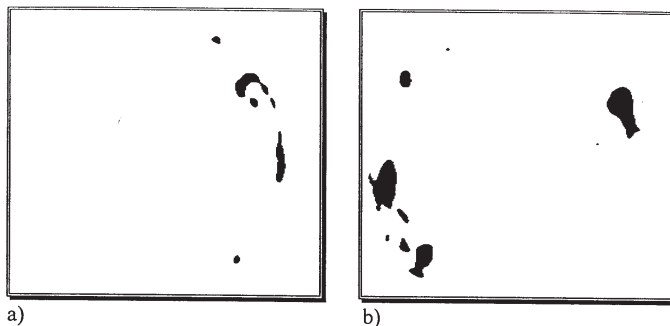
Struktury zamieszczone na rys. 1. dobrano w taki sposób, że dla każdej z nich parametrem niezmiennym jest strumień gazu. Obliczone dla kolejnych zdjęć wartości VF:

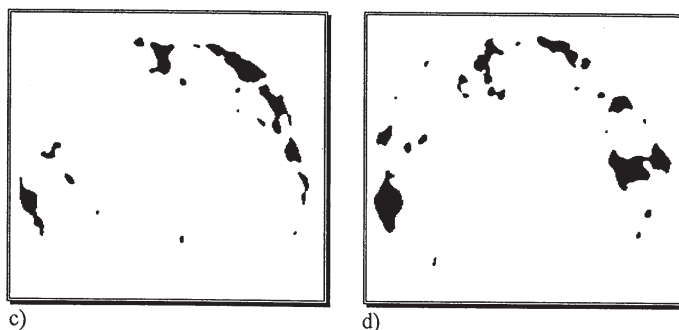
$$VF(a) = 0.988, VF(b) = 0.977, VF(c) = 0.950, VF(d) = 0.936$$

tworzą ciąg ściśle malejący (ale bardzo wolno). Odpowiadające tym zdjęciom wartości unormowanej IS (odniesionej do obwodu wewnętrznego rury) tworzą ciąg ściśle rosnący:

$$IS(a) = 0.90, IS(b) = 1.24, IS(c) = 2.38, IS(d) = 3.82.$$

Jest to przykład ciągu realnych struktur, w którym nieznacznemu zmniejszaniu się wartości VF odpowiada szybki wzrost wartości IS.





Rys. 2. Rozkład koncentracji faz przy przepływie pierścieniowo-dyspersyjnym w rurze pionowej dla rosnących wartości strumienia gazu przy stałym strumieniu cieczy

Cechą wspólną przepływów, których struktury zamieszczono na rys. 2. jest stały strumień cieczy. Obliczone wartości VF:

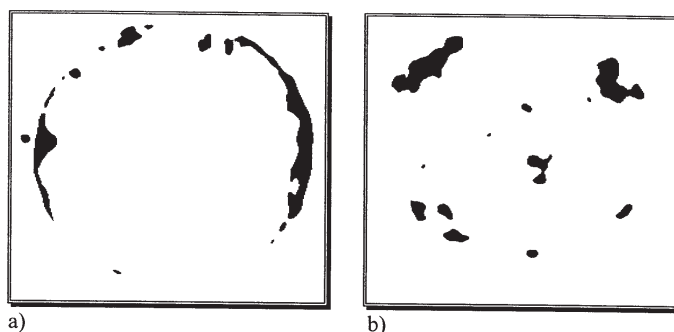
$$VF(a) = 0.986, VF(b) = 0.958, VF(c) = 0.807, VF(d) = 0.741$$

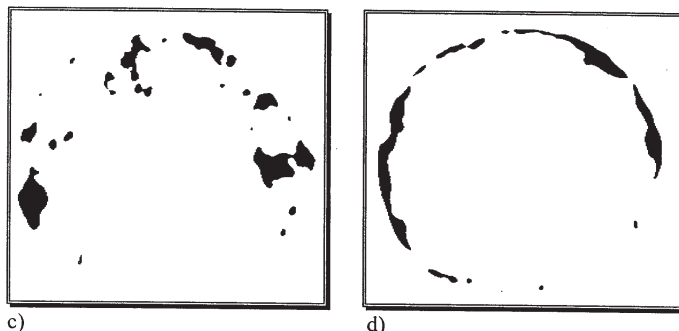
tworzą ciąg ściśle malejący (znacznie szybciej niż dla struktur analizowanych na rys. 1.), a odpowiadające kolejnym zdjęciom wartości unormowanej IS:

$$IS(a) = 0.40, IS(b) = 3.56, IS(c) = 7.61, IS(d) = 13.13$$

tworzą ciąg ściśle rosnący (i to bardzo szybko).

Jest to przykład ciągu realnych struktur, w którym wyraźnemu zmniejszaniu się wartości VF odpowiada gwałtowny wzrost wartości IS.





Rys. 3. Rozkład koncentracji faz przy przepływie pierścieniowo-dyspersyjnym w rurze pionowej przy stałej *gas void fraction* VF

Struktury na rys. 3. dobrano w taki sposób, że stałej wartości

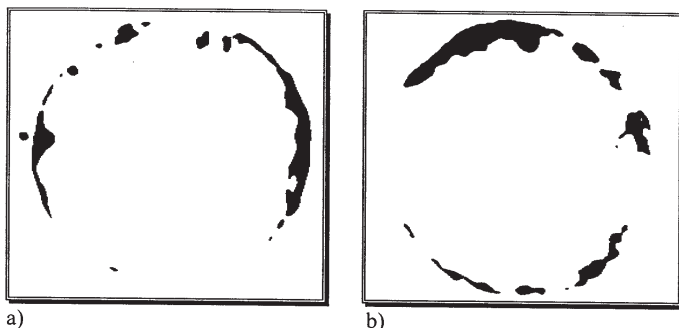
$$VF(a) = VF(b) = VF(c) = VF(d) = 0.936 \pm 0.002$$

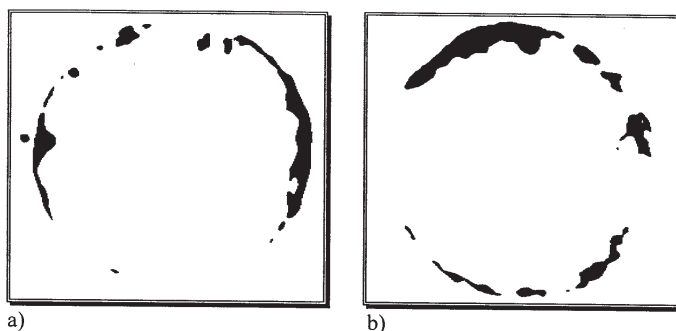
odpowiada ściśle rosnący ciąg unormowanej IS:

$$IS(a) = 2.10, IS(b) = 3.63, IS(c) = 3.82, IS(d) = 4.20.$$

Tym razem, w odróżnieniu od struktur z rys. 1. i rys. 2., gdzie ciągi VF były malejące, mamy tu stały ciąg wartości VF, któremu (podobnie jak dla struktur poprzednio analizowanych) odpowiada szybko rosnący ciąg wartości IS. Przeanalizowane dotąd przykłady realnych struktur dowodzą, że możliwe są następujące sytuacje:

1. Stałemu ciągowi VF odpowiada ściśle rosnący ciąg IS (rys. 3.);
2. Ściśle malejącemu (ale bardzo wolno) ciągowi VF odpowiada ściśle rosnący ciąg IS (rys. 1.);
3. Ściśle malejącemu (relatywnie dość szybko) ciągowi VF odpowiada ściśle rosnący (relatywnie bardzo szybko) ciąg IS (rys. 2.).





Rys. 4. Rozkład koncentracji faz przy przepływie pierścieniowo-dyspersyjnym w rurze pionowej przy stałej *interphase surface* IS

Na rys. 4. struktury dobrano w taki sposób, że niezmiennym parametrem jest unormowana IS:

$$IS(a) = IS(b) = IS(c) = IS(d) = 2.29 \pm 0.13,$$

a wartości VF są mało różniące się:

$$VF(a) = 0.937, F(b) = 0.923, VF(c) = 0.952, VF(d) = 0.950.$$

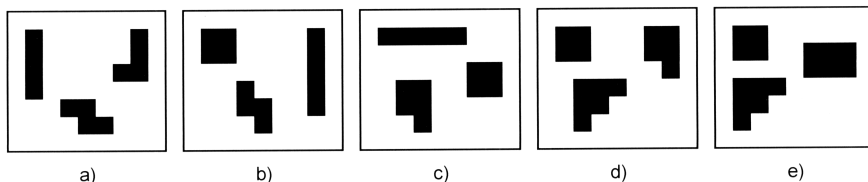
Uporządkowane rosnąco wartości VF otrzymane dla analizowanych tu struktur różnią się między sobą co najwyżej o 0.15. Analizę struktur z rys. 4. można zatem podsumować stwierdzeniem: niemal stałemu ciągowi VF odpowiada stały ciąg IS. Gdyby tak było zawsze dla struktur tego samego typu i nigdy dla struktur różnych typów, to parametry VF i IS wystarczyłyby do ilościowego opisu struktury.

Zamieszczone struktury przepływu należą do dość wąskiego obszaru ich występowania, a mianowicie są to struktury w przybliżeniu pierścieniowe (pierścieniowo-pianowe lub dyspersyjno-pierścieniowe). Analizując ich zdjęcia, otrzymano bardzo różniące się wartości IS dla struktur tego samego typu (rys. 2.) oraz mało różniące się wartości zarówno VF, jak i IS dla struktur różnych typów (rys. 3.). Zatem występujące często w strukturach realnych przepływów zależności polegające na tym, że malejącemu ciągowi VF odpowiada rosnący ciąg IS (rys. 1–2.), nie wykluczają odmiennych relacji między parametrami VF i IS. Oznacza to, że opis ilościowy struktur za pomocą parametrów VF i IS nie jest zadowalający z powodu dużych niejednoznaczności. Strukturom tego samego typu mogą odpowiadać znacząco różne wartości badanych parametrów i odwrotnie – struktury różnych typów mogą mieć zbliżone wartości tych parametrów. Wynika stąd, że należy podjąć poszukiwania innych ilościowych charakterystyk struktury odpowiedzialnych za tak różnorodne wzajemne relacje pomiędzy VF i IS. Powstaje pytanie, czy dołączenie do rozważanych tu dwóch parametrów jeszcze jednego, a mianowicie DDODP, wpłynie na tyle

istotnie na dokładność opisu struktury, że trójka parametrów, tj. VF, IS i DDODP okaże się wystarczająca do w miarę dokładnego ilościowego opisu struktury? Temu problemowi poświęcono następną część artykułu.

2. Struktury symulowane i ich ilościowa charakteryzacja

Analizowane wyżej przykłady realnych struktur przepływu nie ukazują w pełni skali niejednoznaczności opisu struktury za pomocą VF i IS. Dla lepszego ujawnienia skali tego zjawiska zasymulowano struktury o uproszczonych kształtach. Elementarnym obiektem każdej struktury jest 1 piksel. Na rys. 5–7 zamieszczono przykłady symulowanych struktur, w których obiekty elementarne zajmowane przez tę samą fazę są styczne do siebie wzdłuż boku kwadratu, którym jest 1 piksel albo rozłączne. W każdym z obrazów faza rozproszona składa się z trzech klastrów złożonych z czterech, pięciu lub sześciu obiektów elementarnych. Przyjęte założenia (tylko 15 obiektów elementarnych, w każdym obrazie dokładnie trzy klastry i ściśle określony sposób sąsiedowania obiektów elementarnych) bardzo silnie ograniczają możliwości tworzenia różnych struktur. Okazuje się, że nawet na tak prostych przykładach można wykazać, że VF, IS i DDODP nie wystarczają do ilościowego opisu struktury.

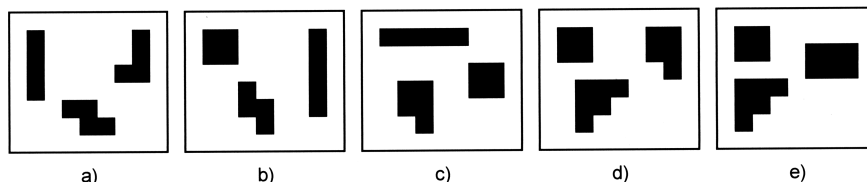


Rys. 5. Przykłady pięciu struktur symulowanych, w których niezmienna jest VF, a IS tworzy ciąg ściśle monotoniczny

Na rys. 5. zamieszczono struktury, dla których:

$$\begin{aligned} VF(a) = VF(b) = VF(c) = VF(d) = VF(e) &= 15, \\ IS(a) = 28, IS(b) = 30, IS(c) = 32, IS(d) = 34, IS(e) &= 36. \end{aligned}$$

Jest to przykład ciągu struktur, w którym stałym wartościom VF odpowiada ściśle rosnący ciąg wartości IS. Struktury różnią się między sobą kształtem co najmniej jednego z obiektów fazy rozproszonej.



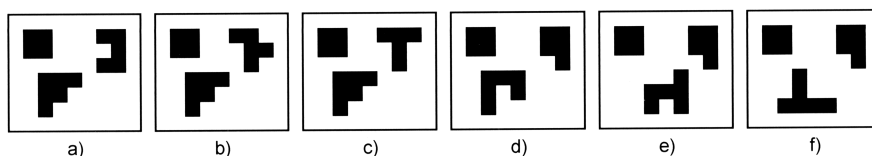
Rys. 6. Przykłady pięciu struktur symulowanych, w których niezmienna jest wartość IS, a VF tworzy ciąg ściśle monotoniczny

Na rys. 6. zamieszczono struktury, dla których:

$$IS(a) = IS(b) = IS(c) = IS(d) = IS(e) = 30,$$

$$VF(a) = 12, VF(b) = 13, VF(c) = 14, VF(d) = 15, IS(e) = 16.$$

Jest to przykład ciągu struktur, w którym stałym wartościom IS odpowiada ściśle rosnący ciąg wartości VF. Podobnie jak na rys. 5. struktury różnią się między sobą kształtem co najmniej jednego z obiektów fazy rozproszonej. W pierwszym z rozważanych przykładów (rys. 5.) struktury są rozróżnialne za pomocą wartości IS, a w drugim przykładzie – za pomocą wartości VF.



Rys. 7. Przykłady sześciu struktur symulowanych, w których niezmiennie są VF, IS i rozkład średnic obiektów fazy rozproszonej DDODP

Na rys. 7. zamieszczono struktury, dla których:

$$VF(a) = VF(b) = VF(c) = VF(d) = VF(e) = 15,$$

$$IS(a) = IS(b) = IS(c) = IS(d) = IS(e) = 32,$$

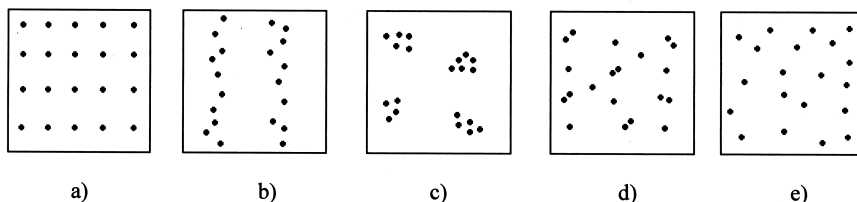
$$DDODP(a) = DDODP(b) = DDODP(c) = DDODP(d) = DDODP(e) =$$

$$= (\sqrt{8}, \sqrt{13}, \sqrt{18}).$$

Jest to przykład ciągu struktur różniących się między sobą kształtem klastrow, a mimo to nierozróżnialnych za pomocą żadnej z trzech badanych charakterystyk ilościowych. Niezauważanie pojawiających się tu zmian w kształtach obiektów fazy rozproszonej skutkuje, w przypadku struktur pęcherzykowych, niedostrzeganiem różnic w kształtach skupisk pęcherzy.

3. Propozycja jakościowej klasyfikacji struktur pęcherzykowych

Na rys. 8. zamieszczono pięć symulowanych struktur pęcherzykowych. Są to struktury o jednakowym kształcie i rozmiarach pęcherzy – ta sama liczba 20 identycznych pęcherzy i każdy z nich zajmuje obszar złożony z 12 pikseli. Mimo widocznych gołym okiem wyraźnych różnic w PCD, pokazane struktury są nierozróżnialne za pomocą VF, IS i DDODP, wymienione bowiem charakterystyki ilościowe nie reagują na zmiany w przestrzennym rozmieszczeniu obiektów fazy rozproszonej.



Rys. 8. Różne struktury pęcherzykowe

Na rys. 8. zamieszczono pięć symulowanych struktur pęcherzykowych. Są to struktury jednakowych kształcie i rozmiarach pęcherzy – ta sama liczba 20 identycznych pęcherzy i każdy z nich zajmuje obszar złożony z 12 pikseli. Mimo widocznych gołym okiem wyraźnych różnic w PCD pokazane struktury są nierozróżnialne za pomocą VF, IS i DDODP, bowiem wymienione charakterystyki ilościowe nie reagują na zmiany w przestrzennym rozmieszczeniu obiektów fazy rozproszonej.

Oceniając wizualnie struktury zamieszczone na rys. 8. dochodzimy do wniosku, że trudno poprzestać jedynie na sklasyfikowaniu ich jako struktur pęcherzykowych. Duże różnice widoczne między poszczególnymi strukturami powodują, że taka klasyfikacja jest tym razem bardzo niedokładna. Koniecznością staje się wprowadzenie dokładniejszej klasyfikacji struktur, tj. takiej, która będzie uwzględniała własności przestrzennego rozmieszczenia pęcherzy i rozróżniała pokazane na rys. 8. struktury. Prowadzone przez autora badania ilościowego opisu PCD skłaniają do zaproponowania klasyfikacji struktur, której wzorce są rozróżnialne miarami nasilenia cech rozkładu proponowanymi przez Autora⁹, tj. miarą cechy rozproszenia, miarą cechy słabej zwartości, miarą cechy zwartości (łańcuchowości), miarą cechy mocnej zwartości (groniastości) i dwoma miarami nasilenia niejednorodności. W innych pracach¹⁰ podjęto pierwsze próby zastosowania miar cech PCD w odniesieniu do przepływu pęcherzykowego otrzymanego w płaskiej komorze. Zaproponowana w tym artykule

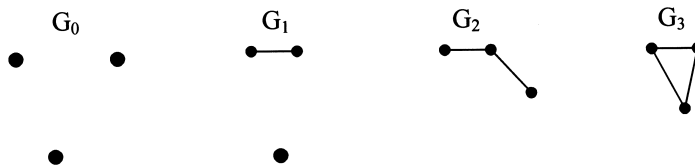
⁹ Z. Garncarek, *Konstrukcje miar cech rozmieszczenia zbiorów punktowych...*

¹⁰ Z. Garncarek, J. Idzik i W. Spisak, *Three circle method in the investigations of shapes of gas bubble clusters in two-phase flow...*, s. 2156–2158; Z. Garncarek, J. Idzik i W. Spisak, *A new method in investigations of bubble cluster shapes in two-phase flow...*

metoda ilościowego opisu struktury pęcherzykowej i rozróżniania struktur pęcherzykowych za pomocą pomiaru nasilenia cechy rozproszenia pęcherzy/fazy gazowej tworzącej pęcherze wykorzystuje jedną spośród wspomnianych wyżej miar, a mianowicie miarę rozproszenia PCD opartą na grafach G_0 (rys. 9). Prezentację metody ograniczono tu do przedstawienia samej idei i skoncentrowano się na eksponowaniu jej zastosowania do ilościowego opisu rozmieszczenia przestrzennego pęcherzy/fazy gazowej tworzącej pęcherze. Metoda obliczania miary rozproszenia przestrzennego pęcherzy/fazy gazowej tworzącej pęcherze polega na:

1. Utworzeniu wszystkich 3-elementowych podzbiorów zbioru pęcherzy zamieszczonych na analizowanym obrazie (w naszym przypadku są to 3-elementowe podzbiory zbioru 20-elementowego albo zbioru 20×12 -elementowego, jeśli uwzględnimy rozmiary pęcherzy).

2. Przyporządkowaniu każdemu z tych 3-elementowych podzbiorów jednego spośród czterech grafów z rys. 9. wg reguły: dwa punkty 3-elementowego podzbioru są połączone krawędzią, jeśli ich odległość na obrazie jest $\leq a$, gdzie a jest ustaloną liczbą dodatnią



Rys. 9. Cztery nieizomorficzne grafy trójwierzchołkowe

3. Zliczeniu dla każdej wartości parametru a oddzielnie liczby $|G_0(a)|$ grafów zero-krawędziowych występujących w tym przyporządkowaniu i obliczeniu ich frekwencji.

4. Obliczeniu za pomocą wzoru

$$\overline{f_0(a)} = \left[S^2 - 3\pi a^2 S + \left(2\pi^2 + \frac{3}{4}\sqrt{3}\pi \right) a^4 \right] S^{-2}$$

frekwencji grafów zero-krawędziowych w rozmieszczeniu losowym 20 albo 240 punktów w obszarze S o polu S tak dużym jak pole analizowanego obrazu (por. pierwszy ze wzorów (2.1.3) w monografii¹¹, w którym zamiast a jest $2r$).

5. Obliczeniu ilorazu frekwencji grafów G_0 przypisanej analizowanemu obrazowi przez frekwencję grafów G_0 w rozkładzie losowym 20/240 punktów w obszarze o polu równym polu analizowanego obrazu.

¹¹ Z. Garncarek, *Konstrukcje miar cech rozmieszczenia zbiorów punktowych...*

Otrzymany w ten sposób iloraz jest miarą stopnia rozproszenia pęcherzy w analizowanym obrazie przy ustalonej wartości parametru a . Obliczenie miary rozproszenia dla kilku wartości parametru a pozwala na dokładniejszą ocenę stopnia rozproszenia pęcherzy. Ze względu na własności miary stopnia rozproszenia, która jest monotoniczna i przyjmuje wartości:

- mniejsze od 1 dla rozkładów mniej rozproszonych niż rozkłady losowe,
- większe od 1 dla rozkładów bardziej rozproszonych niż rozkłady losowe,

możemy rozróżnić struktury pęcherzykowe i dokonać ich podziału na klasy, zaliczając do jednej klasy te z nich, które dla ustalonych wartości parametru a mają miarę stopnia rozproszenia zawartą w określonym przedziale. Wartości miary nasilenia cechy rozproszenia PCD, a dokładniej – fazy gazowej tworzącej pęcherze, obliczono czterokrotnie (dla $a \in \{5, 10, 15, 20\}$, gdzie 100 to długość boku każdego z pięciu kwadratowych obrazów na rys. 8). Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Rys.8 \ a	5	10	15	20	suma 1	suma 2
a	0,887	0,954	1,081	1,127	4,049	2,208
b	0,881	0,888	0,806	0,808	3,383	1,614
c	0,873	0,641	0,547	0,569	2,630	1,116
d	0,864	0,863	0,976	0,979	3,682	1,955
e	0,887	0,954	1,046	1,053	3,940	2,099

Tabela 1. Wartości miar nasilenia cechy rozproszenia pęcherzy z rys. 8.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że miara rozproszenia dla wartości parametru $a = 5$ praktycznie nie rozróżnia struktur z rys. 8. Jej wartości mieszczą się wówczas w przedziale (0.873, 0.887), a jeśli pominąć strukturę z rys. 8d, to w przedziale (0.873, 0.887). Dla wartości parametru $a = 10$ miara rozproszenia sugeruje podział struktur pęcherzykowych na trzy klasy, tj.:

- struktury z rysunków 8a i e oraz podobne,
- struktury z rysunków 8b i d oraz podobne,
- struktury jak na rysunku 8c i podobne.

Jednakże dla wartości parametru $a > 10$ coraz wyraźniej uwidaczniają się różnice między analizowanymi pięcioma strukturami. Z zamieszczonych w tabeli 1. wartości miary rozproszenia dla $a = 15$ i $a = 20$ wynika uzasadnienie klasyfikacji wyróżniającej pięć typów struktur pęcherzykowych. Przyjmując za kryterium nasilenia cechy rozproszenia w rozkładzie pęcherzy sumę wszystkich czterech wartości miary rozproszenia zamieszczonych w tabeli 1. (suma 1), otrzymujemy wyraźne zróżnicowanie ilościowe analizowanych struktur i ilościowo wyrażone różnice w nasileniu cechy rozproszenia między nimi. Sugestia podziału struktur pęcherzykowych na pięć klas jest jeszcze wyraźniejsza, jeśli ograniczymy się do wartości miary rozproszenia dla parametrów $a = 15$ i $a = 20$ (suma 2).

Rozróżnianie struktur pęcherzykowych i ilościowa ocena wielkości różnic między poszczególnymi strukturami pęcherzykowymi pozwala na dokonanie ich klasyfikacji zaproponowanej we wniosku 4.

Wnioski

1. Ilościowa charakteryzacja struktur za pomocą stosowanych dotąd parametrów jest niewystarczająca. Zdarza się, że strukturom różnych typów odpowiadają takie same lub niewiele różniące się wartości tych parametrów, a strukturom tego samego typu wartości znacznie różniące się.

2. Przyczyną niejednoznaczności w ilościowym opisie struktury za pomocą wartości VF, IS i DDODP jest niedostrzeganie przez te parametry zmian w kształcie obiektów fazy rozproszonej i zmian w przestrzennym rozmieszczeniu tych obiektów.

3. Niejednoznaczności w ilościowym opisie struktury można uniknąć, stosując w tym celu zaproponowane przez Autora¹² miary nasilenia cech PCD.

4. Za pomocą miar nasilenia cech PCD możliwa jest bardzo precyzyjna klasyfikacja jakościowa struktur. Wystarczy w tym celu odpowiednio do struktury dobrać miarę lub kilka miar, określić przedziały zmienności tych miar, albo oprzeć się na relacjach, w jakich znajdują się względem siebie ich wartości. W przypadku struktur pęcherzykowych naturalna wydaje się ich klasyfikacja jakościowa otrzymana za pomocą miary rozproszenia PCD. Ze względu na wartości tej miary wyróżniono pięć następujących typów struktur pęcherzykowych:

- a) struktura pęcherzykowa jednorodna/równomierna (rys. 8a),
- b) struktura pęcherzykowa zwarta/łańcuchowa (rys. 8b),
- c) struktura pęcherzykowa mocno zwarta/groniasta (rys. 8c),
- d) struktura pęcherzykowa słabo zwarta (rys. 8d),
- e) struktura pęcherzykowa rozproszona (rys. 8e).

Wzorce struktur pęcherzykowych proponowanej klasyfikacji zamieszczono na rys. 8., a ilościową ocenę różnic między nimi zawiera tabela 1.

¹² Ibidem.

Proposition of qualitative classification of bubble structures

Abstract

It is shown on real and simulated flow structure examples that quantitative characterization of structure with volume fraction, interphase surface and objects' diameter distribution of dispersed phase may contain considerable ambiguities. The qualitative evaluation method of differing structures, which are not distinguished by previously mentioned quantitative parameters, is proposed and utilized to classify bubble structure. Structure patterns of this classification and quantitative evaluation of the differences between them have been presented.