

Maciej MASIUKIEWICZ, Roman ULBRICH

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

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wybrane parametry stereologiczne w identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz

Wstęp

Specjaliści zajmujący się przepływami wielofazowymi uważają, że struktura przepływu decyduje w stopniu największym o zjawiskach transportu pędu, ciepła i masy; np. w reaktorach jądrowych, ich intensywne chłodzenie odbywa się często przy przepływie mieszaniny: para wodna-woda, para metalu-metal. Osiągane są wtedy nawet o kilka rzędów wyższe, niż w tradycyjnych wymiennikach, wartości współczynników wnikania ciepła [Gay i Statile, 1980]. Także wiele procesów przemysłowych prowadzonych jest w układach wielofazowych z uwagi na korzystny iloczyn współczynników wnikania masy i/lub ciepła oraz powierzchni kontaktu [Cichy i in., 1969; Cichy i Russell, 1969]. Struktura dwufazowej mieszaniny np. gazowo-cieczowej, stanowi zatem podstawowy parametr jaki powinien być określony w pierwszej kolejności i właśnie ten fakt jest motorem napędzającym rozwój intensywnych badań prowadzonych w tym zakresie.

Natomiast na podstawie przeglądu problematyki z zakresu badań nad oceną struktur przepływu dwufazowego można wnioskować, że do dzisiaj brak jest jednoznacznych metod umożliwiających całościowo zrealizowanie tego celu. Obszerne badania eksperymentalne, które są prowadzone od kilkudziesięciu lat w laboratoriach na całym świecie, doprowadziły do powstania wielu wyrafinowanych metod badawczych. Głównie jednak sprawdzają się one w określonych stałych warunkach lub wymagają wnioskowania wykwalifikowanego w tej materii obserwatora. Taki stan rzeczy nie jest zadowalający w przypadku rozwiązań wymaganych w warunkach przemysłowych. Co prawda ostatnie lata to bardzo dynamiczny rozwój różnych technik wizualizacyjnych oraz metod tomografii komputerowej. Jednak te ostatnie w postaci pełnych systemów monitorujących są kosztowne i stąd ich zastosowanie jest w dalszym ciągu ograniczone i nie zawsze możliwe z uwagi na specyfikę prowadzenia samego procesu.

Poszukując praktycznego sposobu ilościowego opisu struktury przepływu płynu dwufazowego metody stereologiczne wydają się dobrym narzędziem do rozwiązania tego problemu. Oferują one szereg zależności wiążących parametry przestrzennej struktury z parametrami otrzymanymi na bazie płaskiego obrazu co może stanowić punkt wyjścia do stworzenia systemu wizyjnego opartego na tych metodach.

Adaptacja metod stereologicznych do identyfikacji struktury mieszaniny dwufazowej

Do prawidłowego zastosowania metod stereologicznych np. w przypadku monitorowania procesu w aparacie realizującym przepływ dwufazowy, konieczne jest uzyskanie reprezentatywnego obrazu, czyli wykonanego w odpowiedni sposób i w odpowiednim jego miejscu. Cel ten można osiągnąć znając przybliżone kształty obiektów fazy rozproszonej. Bardzo pomocna jest tu ogólna klasyfikacja struktur przepływu dla różnych konfiguracji urządzeń. Informacje te umożliwiają dobór odpowiedniego miejsca pozyskiwania obrazu, który w przypadku kanału pionowego możemy otrzymać z płaszczyzny poprzecznej lub osiowej.

Praca ukazuje sposób wyznaczenia parametrów stereologicznych dla badanego przepływu mieszaniny gaz-ciecz w kanałach pionowych. Z uwagi na dynamikę procesu rejestrację obrazów uzyskano przy pomocy kamery do zdjęć szybkich. Do akwizycji danych wykorzystano technikę jasnego pola. Oznacza to, że w odróżnieniu od przekrojów, otrzymane obrazy stanowią rzuty struktur. Kolejnym krokiem jest wydobycie i uwypuklenie interesujących nas obiektów i ich cech poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki graficznej. Do tak przetworzonych dwuwymiarowych obrazów dobrano właściwą analizę stereologiczną

opartą na metodzie liniowej oraz siecznych przypadkowych i siecznych skierowanych. Na podstawie zebranych danych zaprezentowano sposoby określania:

– udziału objętościowego,

$$V_V = \frac{A_A \bar{l}}{t} \quad (1)$$

– powierzchni międzyfazowej,

$$S_V = \frac{4A_A'}{t} \quad (2)$$

– liczby obiektów jednej z faz w mieszaninie

$$N_V = \frac{N_A'}{t} \quad (3)$$

– średniej długości cięciwy rzutu obiektu

$$\bar{l} = \frac{L_L'}{N_L} \quad (4)$$

– średniej odległości swobodnej obiektu z rzutu

$$\lambda = \frac{t - A_A \bar{l}}{N_L \bar{l}} \quad (5)$$

gdzie:

A_A' – całkowite pole płaskich rzutów fazy β na jednostkowej powierzchni obrazu, [m^2_β/m^2]

L_L' – całkowita długość cięciw fazy β przypadająca na jednostkową długość siecznej naniesionej na obraz rzutu, [m_β/m]

\bar{l} – średnia długość cięciw z obrazu przekroju, [m]

\bar{l}' – średnia długość cięciw z rzutu obrazu, [m]

N_A' – liczba przekrojów obiektów na jednostkowej powierzchni rzutu, [szt./ m^2]

N_L' – liczba cięciw obiektów na jednostkowej długości siecznej naniesionej na obraz rzutu, [szt./m]

N_V – liczba cząstek w jednostce objętości, [szt./ m^3]

S_V – międzyfazowa powierzchnia względna, [m^2_β/m^3]

t – grubość warstwy analizowanej struktury, [m]

V_V – całkowita objętość obiektów fazy β przypadająca na jednostkową objętość mieszaniny, [m^3_β/m^3]

λ – średnia odległość swobodna, [m]

Z uwagi na zastosowany tor wizyjny, geometrię kanału oraz fizyczne cechy obu składników fazowych do wyznaczenia powyższych formuł posłużono się wyrażeniami określanymi z obrazu rzutów, które zostały wprowadzone z zasad całkowitego rzutu na płaszczyźnie i w przestrzeni.

Interpretacja otrzymanych wyników

Na przetworzonych cyfrowo obrazach, dokonano zliczeń poprzez losowe rzucanie siecznych na obraz i odczytywaniu długości jak i liczności cięciw. Z uwagi na istniejący układ powierzchni obiektów tworzących strukturę mieszaniny dwufazowej przeprowadzono skanowanie obrazu siecznymi w dwóch kierunkach, wzdłuż osi przepływu oraz prostopadle do niej.

Otrzymane statystyczne szeregi długości cięciw, siecznych oraz ich wzajemnej orientacji względem kierunku przepływu mieszaniny dwufazowej, posłużyły do obliczenia pięciu wybranych parametrów stereologicznych (Tab. 1).

Parametry te wyznaczone dla każdego obrazu sekwencji filmowej oddzielnie, stanowią podstawę do oceny ilościowej struktury w określonej chwili czasu. Trzeba być jednak doświadczonym badaczem by prawidłowo zinterpretować i przypisać otrzymany zestaw pięciu parametrów do danego typu struktury omawianego przepływu.

Tab. 1. Przykład obliczonych parametrów stereologicznych dla przepływu pęcherzykowego i korkowego przy stałej prędkości pozornej $w_{Lo} = 0,011$ m/s

	Jednostka	Przepływ pęcherzykowy $w_{Go} = 0,006$ m/s	Przepływ korkowy $w_{Go} = 0,178$ m/s
\bar{l}	mm/szt	3,0	9,6
N_V	szt/dm ³	0,2	1,7
S_V	mm ² /mm ³	0,0	0,4
V_V	%	1,1	53,6
λ	mm/szt	266,5	4,9

Natomiast analiza ciągu klatek umożliwia wnioskowanie o zmienności przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej w czasie. W przypadku pewnych struktur analiza taka może również ujawnić cyklicznie występujące ekstrema pewnych wartości, które są dla nich charakterystyczne. Zalicza się do nich strukturę korkową, pewne przepływy pianowe czy np. strukturę rzutową. Ma to szczególne znaczenie, gdy dysponuje się polem pomiarowym o niewielkich rozmiarach, na którym obraz struktury nie jest w pełni rozwinięty.

Wykrywanie zmian typu struktury, a więc i charakteru przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej w aparacie, można przeprowadzić na podstawie obserwacji zależności między parametrami stereologicznymi porównywanych struktur lub określając wielkość zmian tych parametrów względem siebie [Masiukiewicz i Ulbich, 2007]. Trendy zmian wielkości parametrów stereologicznych zaobserwowane w badaniach zostały ujęte w tab. 2.

Tab. 2. Zaobserwowane trendy zmian wielkości parametrów stereologicznych

\bar{l}	↓			—			↑		
N_V	—	↑	↓	—	↑	↓	—	~	↓
S_V	↓	↑	↓	—	↑	↓	↑	↑	↓
V_V	↓	~	↓	—	↑	↓	↑	↑	~
λ	↑	~	↑	—	↓	↑	↓	↓	~

Natomiast omawiając zależności między wyznaczonymi parametrami stereologicznymi w zakresie struktur: pęcherzykowej, pęcherzykowo-korkowej, korkowej, pianowej, warstewkowej, zauważono, że struktura korkowa jest strukturą graniczną, do której występuje wzrost względnej liczby obiektów N_V oraz względnej powierzchni międzyfazowej S_V . Powyżej natomiast następuje spadek tych parametrów. Względny udział objętościowy fazy gazowej V_V wykazuje stałą tendencję wzrostową, a średnia odległość swobodna λ tendencję spadkową dla całego zakresu badanych struktur. Analiza wielkości średniej cięciwy \bar{l} w odniesieniu do pozostałych parametrów stereologicznych umożliwia wykazanie obecności drobnych obiektów towarzyszących.

Do zaprezentowania przydatności opracowanej metody oceny jakościowej najlepiej posłużyć się przykładem. Rozważając urządzenie, w którym w wyniku zaburzeń przepływu nastąpiła zmiana obserwowanej struktury pęcherzykowej na korkową (Rys. 1), wyznaczono parametry stereologiczne dla obu struktur (Tab. 1).

Oceny można dokonać analizując zachowanie się parametrów stereologicznych względem ustalonej struktury, w tym przypadku pęcherzykowej (Tab. 1) oraz określając wielkość zmian tych parametrów względem siebie (Tab. 3).

Tab. 3. Zaobserwowane zmiany parametrów stereologicznych przy przejściu ze struktury pęcherzykowej na strukturę korkową.

\bar{l}	↑ 0,31 (69,0%)	Dopasowanie profilu zmian dla analizowanego przykładu do ogólnej charakterystyki zaobserwowanych trendów (Tab. 2)	↑
N_V	↑ 0,13 (87,4%)		~ (↑)
S_V	↑ 0,09 (91,4%)		↑
V_V	↑ 0,02 (97,9%)		↑
λ	↓ 54,37 (98,2%)		↓

Oznacza to, że znając dokładne parametry hydrodynamiczne występujące dla prawidłowego przepływu płynu dwufazowego w aparacie można wnioskować, jak się one zmieniły w wyniku zaburzeń, jakimi są np. nagły wzrost temperatury lub ciśnienia, analizując obraz struktury przepływu.

Możliwości aplikacyjne

Wiele procesów przemysłowych prowadzonych jest w układach wielofazowych z uwagi na korzystny iloczyn współczynników wnikania masy i/lub ciepła oraz powierzchni kontaktu. Obecnie w przemyśle energetycznym dynamicznie rozwijają się przedsiębiorstwa produkujące wymienniki ciepła wraz z oprzyrządowaniem, zwłaszcza w mini- i mikroskali. Dotyczy to w głównej mierze kompaktowych wymienników ciepła, mikro- i mini pomp oraz układów do precyzyjnego dozowania substancji chemicznych [Wengel, 2011].

Z kolei nowoczesne linie produkcyjne są oparte na systemach wizyjnych, które wykonują różne zadania: od określania pozycji i różnych cech detali, narzędzi czy kompletnych produktów, po sterowanie pracą maszyn i zapewnienie odpowiedniej jakości produktu czy prowadzenia procesu produkcyjnego. Łączą one w sobie czujniki wizyjne, kamery oraz urządzenia do przetwarzania i analizy danych obrazowych [Piątek, 2013].

W tym świetle zaprezentowana metoda stanowi propozycję elementu lub całego systemu wizyjnego, kontrolującego i sterującego pracą aparatów, w których realizowany jest przepływ mieszaniny wielofazowej. Jako model urządzenia wykorzystano w badaniach pionowe kanały prostokątne szczelinowe oraz minikanaly, przez które przepływała mieszanina gazowo-cieczowa. Nie ma jednak żadnych ograniczeń, by zastosować ją do układu o innej geometrii i orientacji elementu monitorowanego.

Wnioski

Parametry stereologiczne pozyskane z płaskiego obrazu stanowią bogate źródło informacji. Dają one możliwość identyfikacji struktury przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej, a dogłębna ich analiza pozwala na określenie takich wartości badanego przepływu jak np. prędkości fazy gazowej lub ciekłej.

Opracowana metodyka, wsparta cyfrową analizą obrazu, umożliwia zwiększenie kontroli nad urządzeniami pracującymi w oparciu o przepływy dwufazowe gaz-ciecz poprzez ciągłe monitorowanie tworzących się w nich struktur przepływu.

Analizie opartej na prezentowanej metodzie można poddać obrazy struktur pozyskane dowolną techniką wizualizacyjną. Warunkiem powodzenia obliczeń jest możliwość rozróżnienia obu faz oraz dokładna znajomość miejsca pozyskania obrazu. Z tego powodu zalicza się ją do metod nieinwazyjnych, w których pomiar nie powoduje zakłóceń przepływu.

Prezentowaną metodę można rozbudować o kolejne parametry, a nawet tworzyć własne w oparciu o zasady opracowane na potrzeby stereologii. Zwiększa to jej użyteczność i czyni ją łatwo adaptowalną na potrzeby innych zadań identyfikacyjnych.

LITERATURA

- Cichy P.T., Ultman J.S., Russell T.W.F., 1969. Reactor model development. *Ind. Eng. Chem.*, **61**, nr 8, 6-14. DOI: 10.1021/ie50716a004
- Cichy P.T., Russell T.W.F., 1969. Reactor model parameters. *Ind. Eng. Chem.*, **61**, nr 8, 15-26. DOI: 10.1021/ie50716a005
- Gay R.P., Statile D., 1980. *A flow regime dependent model of two phase flow* [in:] Proc. of ANS/ASME/NRC International topical meeting on nuclear reactor thermal hydraulic. Saratoga Springs, New York, Oct. 5-8, USA
- Masiukiewicz M., Ulbich R., 2007. *Metody stereologiczne w identyfikacji struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz*. Studia i Monografie; z. 199, Wyd. Pol. Opolskiej, Opole
- Piątek Z., 2013. Raport: Systemy wizyjne i termowizja. *APA - Automatyka Podzespoły Aplikacje*, **76**, 34-71
- Wengel M., 2011. *Wpływ średnicy minikanalu na hydrodynamikę przepływu gaz-ciecz*. Rozprawa doktorska. Politechnika Opolska, Opole

Praca została wykonana w ramach grantu nr 4790/B/T02/2010/3 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.