

Pomiar rozkładu koncentracji

Metoda rozróżniania struktur przepływu

Zbigniew Garncarek
Mariusz Rząsa

W przepływie dwufazowym najczęściej fazę ciągłą stanowi płyn, fazą rozproszoną jest substancja o dowolnym stanie skupienia. W przypadku przepływu gaz-ciało stałe (transport pneumatyczny) struktura przepływu [6] może stanowić ważną informację o zagrożeniu związanym z osadzaniem się pyłu w przewodach transportowych [7]. Metoda rozróżniania struktur przepływu może również znaleźć zastosowanie w diagnostyce maszyn, gdzie pojawienie się niektórych struktur jest niekorzystne.

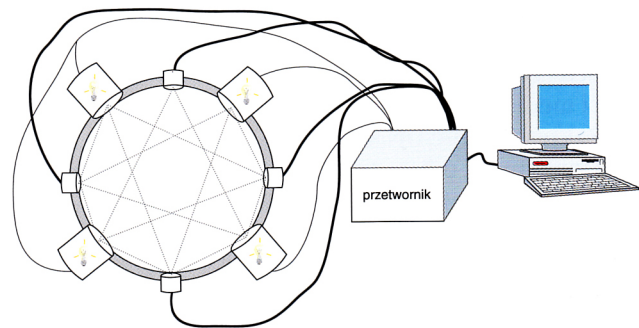
W przypadku pomiaru koncentracji pyłów w przewodach odprowadzających gazy odlotowe, takich jak kominy, występuje niewielka koncentracja pyłu przy dużych prędkościach przepływu gazu, co wymaga zastosowania specyficznych metod pomiarowych. Pomiar koncentracji pyłu w gazach odlotowych niejednokrotnie wiąże się z metodami pomiarowymi umożliwiającymi nie tylko pomiar koncentracji, ale również prowadzenie pomiaru w sposób zautomatyzowany, np. w systemach monitorowania i automatyki. W związku z powyższym zaproponowano bezinwazyjną [1] metodę pomiarową opartą na tomografii optycznej. Umożliwia ona prowadzenie pomiaru przy symetrycznych i asymetrycznych profilach prędkości, jak i pomiaru szybkozmiennych rozkładów koncentracji [5]. W tomografii przepływów dwufazowych zmierza się do jednoznacznego określenia koncentracji na podstawie jak najmniejszej liczby punktów pomiarowych. Dokładność odwzorowania obiektu mierzonego zależy od zastosowanej metody i sposobu prześwietlania przewodu. Inną trudność stanowi wyznaczenie profilu prędkości rozkładu koncentracji w procesach szybkozmiennych [2].

W artykule zaproponowano przystosowanie powstałej w latach 90. metody ilościowego opisu rozkładu koncentracji. Proponowaną metodę adaptowano już do badań zaburzeń jednorodności pola temperatury [8, 9], do oceny jakości cyrkulacji fazy stałej w złożu fluidalnym [10], jak i w innych dziedzinach nauk technicznych. W artykule omówiono przystosowanie jej do rozróżniania struktur przepływu w transporcie pneumatycznym.

Idea metody pomiarowej

Jako metodę pomiarową wybrano prześwietlanie badanego przekroju za pomocą rozproszonej wiązki światła [3]. Docelowo w zależności od przekroju pomiarowego, można zastosować 8 lub 16 źródeł światła, co pozwala na uzyskanie różnej ilości projekcji. Zastosowa-

nie 8 czujników pomiarowych rozlokowanych na obwodzie przekroju pomiarowego umożliwia dokonanie 64 pomiarów, natomiast zastosowanie 16 czujników – 256 pomiarów. Metoda polega na prześwietlaniu rurociągu rozproszoną wiązką światła i dokonywaniu pomiaru natężenia światła docierającego do 8 lub 16 fotodetektorów rozmieszczonych na obwodzie rurociągu (rys. 1). Za pomocą synchronicznego zapalania 8 lub 16 źródeł światła rozlokowanych na obwodzie rurociągu, uzyskuje się 8 lub 16 projekcji, co implikuje 64 lub 256



Rys. 1. Tomograf optyczny

pól rozkładu koncentracji. Promień świetlny natrafiając na pył, ulega częściowemu załamaniu, odbiciu oraz absorpcji, co powoduje zmniejszenie natężenia światła docierającego do detektora. Po detekcji następuje przetworzenie sygnału w przetworniku pomiarowym oraz akwizycja danych w komputerze z kartą pomiarową. Następnie na podstawie zarejestrowanych danych na drodze numerycznej dokonuje się rekonstrukcji rozkładu koncentracji pyłu. Ponieważ w tomografii optycznej nie jest możliwe, aby czujnik był jednocześnie źródłem i detektorem (jak w tomografii ultradźwiękowej czy pojemnościowej), konieczne jest umieszczenie źródła światła pomiędzy czujnikami (szczegóły w [5]).

Tego typu rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia uzyskanie rozkładu koncentracji pyłu w przekroju poprzecznym pyłoprzewodu. Przekrój poprzeczny pyłoprzewodu podzielono na szereg pól kwadratowych, a wartość koncentracji w danym polu stanowi średnią koncentrację w tym polu.

Dr inż. Zbigniew Garncarek – Instytut Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Opolskiego, Dr inż. Mariusz Rząsa – Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej

W przypadku zastosowania powyższej metody pomiarowej w systemach zautomatyzowanego pomiaru i regulacji, konieczna staje się analiza obrazu i zidentyfikowanie struktury przepływu. Do oceny wizualnej dla technologa zwykle wystarcza mapa rozkładu koncentracji i na tej podstawie dobranie odpowiednich parametrów procesu, np. strumienia gazu czy ilości pyłu. W przypadku sterownika PLC lub innego urządzenia nadzorującego wygodne jest przedstawienie wyników w postaci liczb lub wektorów charakteryzujących daną strukturę. W artykule podjęto próbę opisanie struktury za pomocą czterowyrazowych ciągów liczbowych wartości miary stopnia niejednorodności rozkładu koncentracji [4], przydatnych w procesach sterowania transportem pneumatycznym.

Idea metody ilościowej charakteryzacji struktur

Przeprowadzono szereg badań nad identyfikacją podstawowych struktur występujących w transporcie pneumatycznym. Zasyulowano pięć typów przepływu i związanych z nimi pięć skrajnie różnych rozkładów koncentracji (rys. 2). Punkty przecięcia linii siatki są węzłami rekonstrukcji obrazu z tomografu wyznaczającego wartość koncentracji lokalnej w badanym przekroju. Linia pogrubioną zaznaczono obszar, który podano analizie i dla celów obliczeniowych na jego podstawie zbudowano rodzinę macierzy koncentracji pyłu. We wszystkich przypadkach średnia koncentracja pyłu w całym przekroju jest taka sama, jedynie zmienia się jej rozkład.

Na rys. 2 przedstawiono pięć rozkładów koncentracji, które kolejno poddawano przekształceniom polegającym na nałożeniu odpowiednio dobranych sieci prostokątów o jednakowym polu i przypisaniu każdemu prostokątowi sieci odpowiadającej mu koncentracji pyłu. Cztery sieci przedstawione na rys. 3 dobrano w taki sposób, aby liczba węzłów siatki pomiarowej z rys. 2 była taka sama w każdym polu tej samej sieci.

Każdemu polu sieci obliczeniowej przypisano liczbę będącą sumą koncentracji pyłu w węzłach pomiarowych należących do tego pola. Otrzymano w ten sposób cztery macierze odpowiednio o 68, 34, 17 i 4 elementach. Dla prostoty obliczeń przyjęto, że wartości w polach sieci są liczbami naturalnymi otrzymanymi z koncentracji w węzłach pomiarowych, w ten sposób, że wartości procentowe przekształcono do wartości liczbowych i pomnożono przez odpowiednio dobraną stałą.

Dla rozkładu z rys. 2 otrzymano rodzinę macierzy przedstawioną na rys. 4.

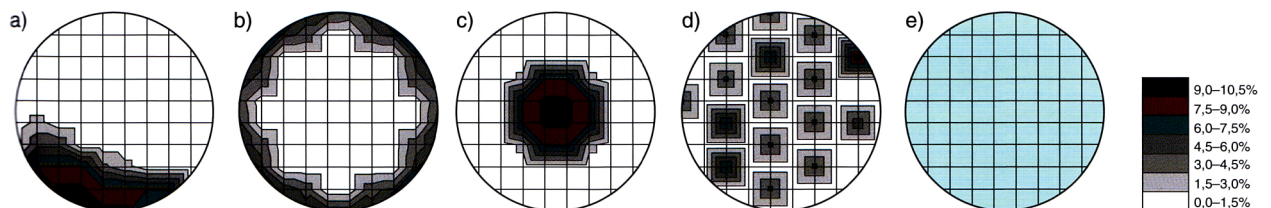
W tej części artykułu podano w zarysie metodę ilościowej oceny stopnia niejednorodności rozkładu koncentracji opartą na rozważaniach probabilistycznych, której podstawy teoretyczne przedstawiono w monografii [4]. W proponowanej metodzie przystosowuje się miarę h stopnia niejednorodności zbioru punktowego do ilościowej charakteryzacji rozkładu koncentracji pyłu w kanale o przekroju kołowym. Miara h wyraża się wzorem:

$$h = \frac{\kappa}{n(\kappa-1)} \sum_{i=1}^{\kappa} (n_i - \frac{n}{\kappa})^2 \quad (1)$$

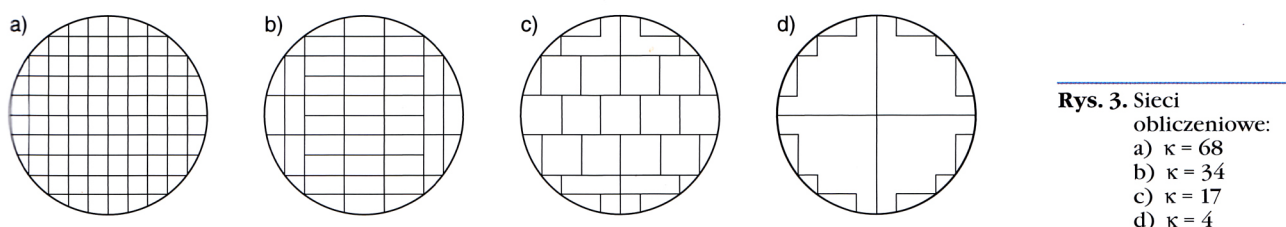
w którym: n_i – elementy macierzy koncentracji (rys. 4) dla $i = 1, \dots, \kappa$; κ – liczba elementów macierzy; $n = n_1 + \dots + n_{\kappa}$

Ze sposobu konstrukcji miary h wynikają jej następujące właściwości:

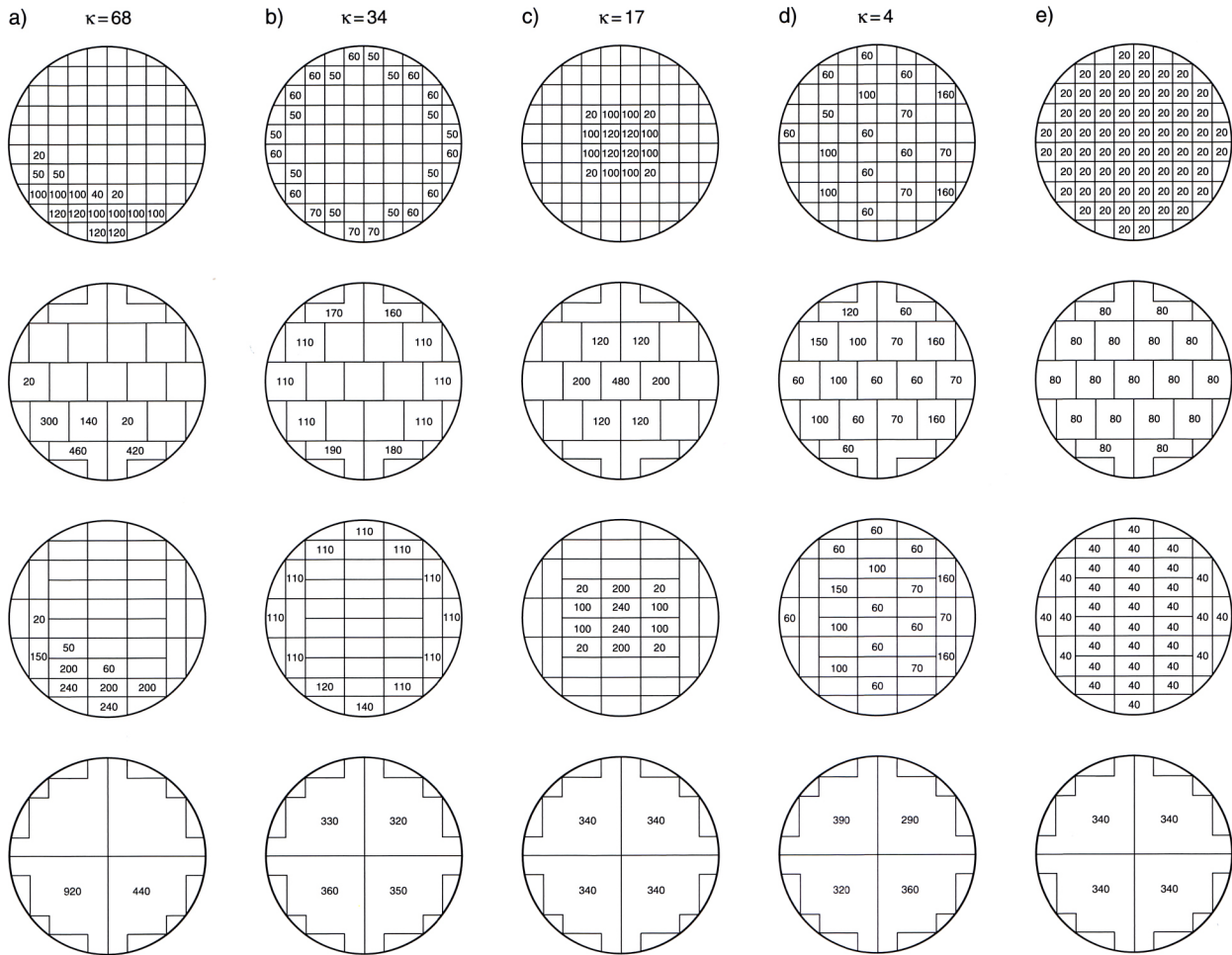
1. $h = 1$ dla rozkładów losowych;
2. $h = 0$ dla rozkładów idealnie jednorodnych;
3. $0 < h < 1$ dla rozkładów niemal jednorodnych (przepływ jednorodny z nieznacznymi zaburzeniami w postaci maksimum lokalnych koncentracji);
4. $h \gg 1$ dla rozkładów wyraźnie niejednorodnych;
5. wartości miary h tworzą ciąg rosnący dla coraz bardziej niejednorodnych rozkładów koncentracji;
6. jeśli macierze rozkładów koncentracji A_1, A_2 pochodzące od dwóch różnych przepływów mają proporcjonalne, odpowiadające sobie elementy o stosunku proporcjonalności „ a ” ($A_1 = aA_2$), to $h(A_1) = ah(A_2)$.



Rys. 2. Rozkłady koncentracji pyłu dla różnych przepływów: a) rozwarstwiony, b) pierścieniowy, c) smugowy, d) rozproszony z lokalnymi maksimum koncentracji, e) równomiernie rozproszony



Rys. 3. Sieci obliczeniowe:
a) $\kappa = 68$
b) $\kappa = 34$
c) $\kappa = 17$
d) $\kappa = 4$



Rys. 4. Rodziny macierzy obliczeniowych dla poszczególnych rozkładów z rys. 2. (macierz a dotyczy rozkładu a z rys. 2 itp.)

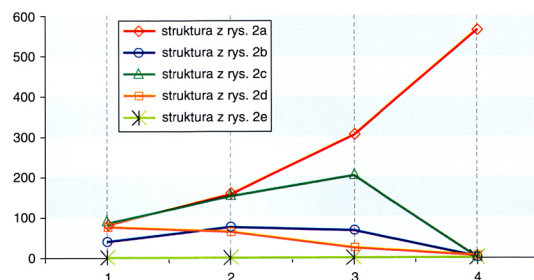
Następstwem ww. właściwości miary h jest generowanie przez nią mocnej skali pomiarów (konstrukcję modelu probabilistycznego i dowód wzoru (1) zamieszczono w monografii [4] na stronach 13–35).

Prezentację aplikacyjnej części metody rozpoczynamy od przyporządkowania rozkładowi koncentracji faz odpowiadającej mu macierzy koncentracji otrzymanej w analizie tomograficznej badanego obszaru. Ze względu na kołowy kształt badanego obszaru, dopuszczamy się tu świadomie pewnej nieściśłości, bowiem rozważane przez nas tablice liczb nie są tablicami prostokątnymi lecz kołowymi, a więc milcząco rozszerzamy pojęcie macierzy na takie tablice liczb.

Wyniki obliczeń

Każdej z pięciu rozważanych struktur z rys. 2 przyporządkowano czterowyrazowy ciąg wartości miary h odpowiadających kolejnym macierzom koncentracji z rys. 4. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5. Ciągi te różnią się między sobą właściwościami analitycznymi. Ciąg odpowiadający strukturze z rys. 2 jest ciągiem stałym o wartościach 0. Przy niewielkich zaburzeniach nierównomierności wyrazy tego ciągu mogą być większe od zera, ale będą bardzo bliskie zera i znacząco mniejsze od 1. Ciąg odpowiadający strukturze z rys. 2a jest ciągiem ściśle rosnącym i jego najmniejszy wyraz (h_1) przy-

muje wartość dużo większą od jedynki. Ciąg odpowiadający strukturze z rys. 2d jest ciągiem ściśle malejącym. Nie ma żadnych problemów z rozróżnianiem tych struktur za pomocą czterowyrazowego ciągu wartości h . Nieco subtelniejszej analizy wymaga rozróżnienie struktur z rys. 2b i 2c. W obu przypadkach pierwsze wyrazy cią-



Rys. 5. Wyniki obliczeń miary h dla struktur z rys. 2 odpowiadające kolejnym macierzom koncentracji wg rys. 4

gów są dużo większe od jedynki, jednakże ciąg odpowiadający strukturze z rys. 2c ma trójwyrazowy podciąg rosnący, który stanowią wyrazy h_1, h_2, h_3 , zaś ciąg odpowiadający strukturze z rys. 2b zawiera trójwyrazowy podciąg malejący, który stanowią wyrazy h_2, h_3, h_4 . W ten sposób za pomocą właściwości czterowyrazowego ciągu wartości h rozróżniono struktury zamieszczone na rys. 2.

Podsumowanie

W artykule wykazano przydatność metody probabilistycznego rozpoznawania struktur w pomiarach rozkładu koncentracji pyłu na bazie tomografu optycznego. Ciąg wartości miary h wykazuje podatność na zmiany struktury i analiza właściwości tego ciągu pozwala na jednoznaczne rozpoznanie struktury na bazie czterowyrazowych ciągów liczbowych. Zagadnienie to może być przydatne w układach sterowania procesem, gdzie zachodzi potrzeba utrzymania przepływu w zakresie określonych struktur. Metoda ta może również znaleźć zastosowanie w diagnostyce maszyn, gdzie pojawienie się niektórych struktur jest niekorzystne.

Bibliografia

1. Chaouki J., Larachi F., Dudukovic M. P.: Non-Invasive Monitoring of Multiphase Flows, Elsevier Science B. V. Amsterdam 1997.
2. Koszewski J., Sawicki B., Zarębski W.: Fotometryczny monitor stężenia pyłów w gazach odlotowych; PAK 2/1991.
3. Tjugum S. A., Johansen G. A.: Multiphase Flow Regime Identification by Multibeam Gamma-Ray Densitometry; 2nd World Congress on Industrial Process Tomography. Hannover 29–31 August 2001.
4. Garncarek Z.: Konstrukcje miar cech rozmieszczenia zbiorów punktowych z przykładami zastosowań w naukach przyrodniczych i technicznych, Zeszyty Naukowe WSP Opole, Studia i Monografie nr 203, 1993.
5. Rząsa M. R.: The Optical Tomograph for Tests of Dust Concentration Distribution; 2nd International Symposium on Process Tomography in Poland 2002. Wrocław 11–12th September 2002.
6. Piątkiewicz Z.: Transport pneumatyczny, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
7. Hoaldehy D., Gołąbek J.: Osadanie się pyłu węglowego w rurociągach poziomych instalacji paleniskowej. Materiały VII Konferencji Kotłowej „Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów”, 1994.
8. Garncarek Z., Idzik J.: Degree of heterogeneity of thermal field – a method of evaluation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 11, 1992, s. 2769–2775.
9. Garncarek Z., Grzeszczyk W., Szymczak J.: Quantitative analysis of non-homogeneity of thermal fields from thermal images of the building plasters, Applied Mechanics and Engineering.
10. Garncarek Z., Przybylski L., Botterill J., Bridgwater J., Broadbent Ch.: A measure of the degree of inhomogeneity in a distribution and its application in characterising the particle circulation in a fluidized bed, Powder Technology 80, 1994, s. 221–225. ■

Streszczenia artykułów naukowych

Pomiar rozkładu koncentracji – metoda rozróżniania struktur przepływu, Zbigniew Garncarek, Mariusz Rząsa – s. 34

Zaproponowano metodę rozróżniania struktur przepływu za pomocą ciągów wartości miary stopnia niejednorodności rozkładu koncentracji. Metodę zilustrowano na przykładach symulowanych macierzy koncentracji, podobnych do otrzymywanych z pomiarów tomografem optycznym. Omówiono proces przetwarzania macierzy koncentracji i wyznaczania ciągów wartości miary stopnia niejednorodności, zilustrowano graficznie otrzymane wyniki i sformułowano algorytm rozróżniania struktur na podstawie właściwości otrzymanych ciągów.