

POMIARY PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU TYPU: GAZ-CIAŁO STAŁE, PRZY ZASTOSOWANIU ELEKTRYCZNEJ TOMOGRAFII POJEMNOŚCIOWEJ

Volodymyr MOSOROV¹, Dominik SANKOWSKI²

1. Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej
tel.: 42 631 27 50 e-mail: mosorow@kis.p.lodz.pl
2. Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej
tel.: 42 631 27 50 e-mail: dsan@kis.p.lodz.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wady znanej metody korelacji dla oszacowania opóźnienia czasowego. Wykazano, że metoda korelacji dla pomiaru prędkości przepływu w oparciu o obrazy tomograficzne otrzymane za pomocą dwupłaszczyznowego tomografu elektrycznego ma poważne ograniczenia w praktyce, zwłaszcza gdy przepływ przebiega w postaci tzw. korków. Podstawowym problemem jest niestacjonarność mierzonych danych, dlatego wymóg korelacji danych wejściowych nie jest spełniony. Wykazano, że prędkość przepływu może być mierzona wówczas gdy funkcja korelacji wzajemnej obliczona na podstawie danych wejściowych posiada globalne maksimum. Zaproponowano oryginalny algorytm automatycznego określania interwałów czasowych do obliczania prędkości przepływu. Pokazano, że algorytm pozwala obliczyć prędkość przepływu we właściwy sposób. Przedstawiono wyniki obliczeń prędkości przepływu przy użyciu proponowanej koncepcji reżimu dynamicznego przepływu gazu i ciała stałego.

Słowa kluczowe: tomografia elektryczna, prędkość przepływu, interwał czasowy.

1. WPROWADZANIE

Tomografia jest techniką umożliwiającą uzyskanie obrazu przekroju badanego obiektu na podstawie danych z pomiaru określonej wielkości fizycznej (promieniowanie, pojemność, rezystancja, itd.) w wybranych punktach leżących zazwyczaj na obrzeżu badanego obszaru. Uzyskany wektor pomiarowy jest stosowany do rekonstrukcji obrazu przekroju przy pomocy odpowiednich algorytmów. Uzyskany obraz reprezentuje sobą rozkład pewnej cechy badanego obiektu zależnej od zastosowanego rodzaju tomografii. Może to być gęstość materiału, koncentracja, przenikalność elektryczna, konduktywność, itd.

Początkowo tomografia znalazła swoje zastosowanie w medycynie (tomografy rentgenowskie), jednak wkrótce zaczęto ją stosować w przemyśle do pomiaru i monitorowania procesów przemysłowych jako tomografię procesową. Szczególnie rozpowszechniła się tomografia elektryczna, głównie pojemnościowa i rezystancyjna, ze względu na koszty i małą uciążliwość w porównaniu do tomografii gamma. Przykładem zastosowania tomografii procesowej może być monitorowanie i pomiar przepływu masy w transporcie pneumatycznym materiałów sypkich. Układ pomiarowy składa się w takim wypadku najczęściej z dwóch lub więcej czujników pomiarowych umieszczonych

równolegle w niewielkiej odległości od siebie na obwodzie rury transportującej materiał. Uzyskane dane pomiarowe umożliwiają monitorowanie oraz pomiar przepływu masy. Kompletny przegląd zastosowań tomografii procesowej w przemyśle można znaleźć w literaturze [17, 20].

Dane uzyskane bezpośrednio z tomografu (np. wektor zmierzonych pojemności elektrycznych), chociaż w niektórych zastosowaniach użyteczne, podlegają procesowi rekonstrukcji, w wyniku której otrzymany zostaje obraz reprezentujący rozkład pewnej cechy w badanym przekroju. W przypadku tomografii pojemnościowej będzie to rozkład przenikalności elektrycznej, który dla transportu pneumatycznego materiałów sypkich można powiązać bezpośrednio z koncentracją transportowanego materiału. Uzyskany obraz lub sekwencja obrazów mogą zostać odpowiednio przetworzone a następnie poddane analizie w celu uzyskania dodatkowych informacji, przykładowo przepływu masy.

Celem niniejszego artykułu jest opracowanie i implementacja algorytmu przetwarzania i analizy obrazów tomograficznych pozwalających wyznaczyć prędkość przepływu materiałów sypkich. Opracowany algorytm pozwala mierzyć prędkość przepływu z uwzględnieniem reżimu przepływu.

2. TEORETYCZNE ROZWAŻANIA

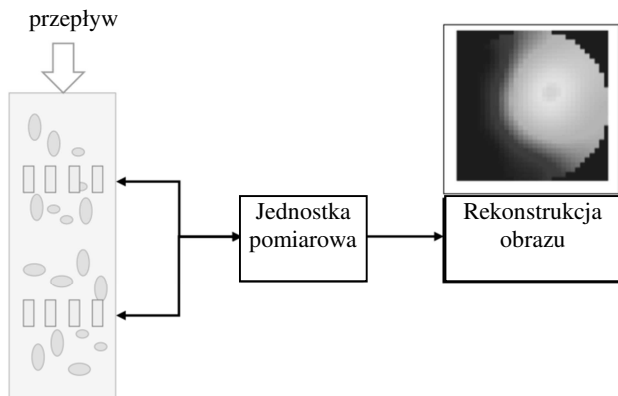
W systemie elektrycznej tomografii pojemnościowej (patrz rys. 1) dane są zbierane przy użyciu elektrodowego czujnika n_e , umieszczonego na obwodzie rurociągu, w którym zachodzi badany proces [19]. Otrzymane:

$$\frac{n_e(n_e - 1)}{2}$$

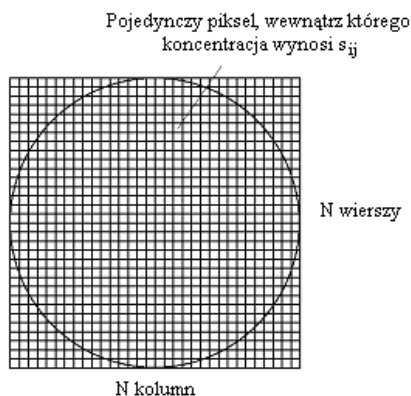
niezależnych pomiarów pojemności podlegają procesowi rekonstrukcji, w wyniku której otrzymujemy obraz reprezentujący rozkład przenikalności elektrycznej [3, 17, 20]. W przypadku transportu materiałów sypkich rozkład przenikalności elektrycznej można powiązać bezpośrednio z koncentracją transportowanego materiału. Uzyskany obraz lub sekwencja obrazów mogą zostać odpowiednio przetworzone oraz poddane późniejszej analizie w celu uzyskania dodatkowych informacji o monitorowanym procesie [7, 8, 9, 12].

Aby uzyskać pomiar przepływu masy na podstawie zrekonstruowanych obrazów muszą zostać zastosowane co najmniej dwie płaszczyzny pomiarowe umieszczone równolegle w niewielkiej odległości od siebie (patrz rysunek 1), [1, 4, 5, 10, 11].

Z każdego czujnika, na podstawie zebranych obrazów, otrzymywana jest sekwencja zrekonstruowanych obrazów tomograficznych. W przypadku danych na których pracowali p autorzy były to sekwencje obrazów o rozdzielczości 32x32 pikseli.



Rys. 1. Układ dwupłaszczyznowego tomografu do pomiaru prędkości przepływu



Rys. 2. Podział przekroju poprzecznego rury na mniejsze elementy – piksele

Pojedynczy zrekonstruowany obraz tomograficzny można zapisać w postaci macierzy przedstawiony na rysunku 2, przyjmującej wartości znormalizowane z przedziału [0,1]. Zero oznacza brak materiału w obszarze piksela, natomiast wartość 1 przypisywana jest sytuacji kiedy pełen obszar piksela jest okupowany przez materiał sypki - odpowiada maksymalna koncentracja granulatu. Proces normalizacji danych przeprowadza się podczas kalibracji systemu [2]. Kalibracja wykonana dla pustej rury oraz rury wypełnionej materiałem sypkim (cząstki plastikowe o średnicy 3 mm)

Matematycznym modelem opisującym dane pomiarowe uzyskane z tomografu są: $x_{i,j}(nT)$ i $y_{i,j}(nT)$, $i=0, \dots, I-1$, $j=0, \dots, J-1$ przedstawiające zmiany rozkładu materiału w przekroju dla (i, j) piksela n -go $I \times J$ obrazu tomograficznego uzyskanego z prędkością obrazowania T otrzymane dla płaszczyzn X i Y dwupłaszczyznowego tomografu odpowiednio [13-16].

Wówczas korelacja wzajemna $R_{i,j}(kT)$ dwóch sekwencji czasowych $\{x_{i,j}(nT)\}$ oraz $\{y_{i,j}(nT)\}$, $n=N, \dots, N+M$ zawiera M obserwacji może być wyznaczona jako:

$$R_{i,j}(kT) = \frac{1}{M} \sum_{n=N}^{N+M} x_{i,j}(nT) y_{i,j}((n-k)T), k \in N \dots (1)$$

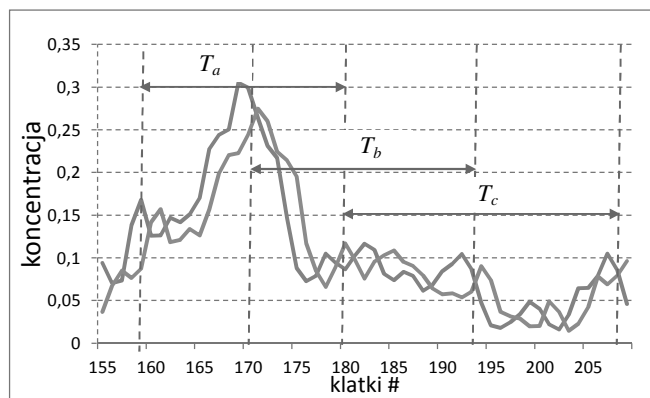
Poszukiwany czas przejścia materiału jest równy wartości argumentu τ , który odpowiada maksimum funkcji korelacji wzajemnej. Czas ten może być zarówno dodatni jak i ujemny, w zależności od zwrotu wektora prędkości transportowanego materiału.

Opisane powyżej obliczenia wykonuje się kolejno dla wszystkich par odpowiadających sobie pikseli. W ten sposób - analizując informacje uzyskane z dwóch czujników (płaszczyzn) pomiarowych, umieszczonych blisko siebie, wyznacza się profil prędkości transportowanych obiektów w rurociągu.

$$\overline{V}_{i,j} = d/\tau_0 (2)$$

gdzie d jest odległością pomiędzy płaszczyznami tomografu.

Na rysunku 3 przedstawiono przykład typowych zmian koncentracji w wybranym pikselu obrazów tomograficznych. Zmiany mierzone przez tomograf ECT w transporcie pneumatycznym w pionowej rurze podczas propagacji korka tzw. *plug'u*. Jednym z możliwych sposobów oszacowania opóźnienia jest określenie globalnego piku funkcji korelacji wzajemna (patrz równanie 1). Jest oczywiste, że wyznaczenie piku może być nieprawnym dla przypadku zaszumionych sygnałów wejściowych. Problem można rozwiązać przez poprawę parametrów jednostki pomiarowej. Jednakże w artykule ten problem został pominięty. Innym podstawowym problemem jest to, czy takie globalne maksimum dla obliczonej funkcji korelacji istnieje. W praktyce mogą pojawić się dwa przypadki: funkcja korelacji może nie mieć wyraźnego piku przykładowo funkcja korelacji wzajemnej zwiększa lub zmniejsza się, a po drugie funkcja korelacji może mieć wiele lokalnych maksimum.



Rys. 3. Zmiany wartości w wybranym pikselu (15,15) obrazu tomograficznego, $T_{a/b/c}$ - interwały czasowe

Do wyznaczania odpowiedniego okna czasowego niezbędne są wzorce sygnałów dla których wykres korelacji wzajemnej posiada ewidentny pik. W przypadku propagacji przepływów w postaci tzw. korków na przykład przepływów

typu transportu pneumatycznego, sygnały reprezentujące zmiany koncentracji mają kształty zbliżone do serii impulsów występujących nieregularnie. Każdy taki „impuls” odpowiada jednej czasowi występowania korka w płaszczyźnie sensora tomograficznego. Ponieważ czas propagacji korków nie jest stały, wybór okna czasowego ze stałą długością M nie jest możliwy. Dodatkowo korki występują nieregularnie dla tego powstaje problem automatycznego wyznaczania czasu pojawienia się korka i jego zakończenia. Stąd algorytm wyznaczania prędkości na podstawie wzoru (1) powinien automatycznie wykrywać momenty występowania korków N_b i N_e , gdzie N_b/N_e – numer klatki pojawienie/zakończenie korka.

Zastosowanie zwykłego progowania do wyznaczania czasowych momentów nie jest możliwe ze względu na ten fakt iż istnieje spore prawdopodobieństwo występowania propagacji materiału w krótkich interwałach czasowych. Jednakże odpowiadające im sygnały zmian wartości pikseli w zrekonstruowanych obrazach nie będą nadawać się do wyznaczania prędkości materiału metodą korelacyjną ze względu na ich krótkotrwałość. Taki przypadek można określić jako impulsowy szum w terminach pojęć obróbki sygnałów. Jest też oczywiste że funkcja korelacji wzajemnej nie może być obliczana dla N_b and N_e we wzorze (1). Należy dodatkowo dodać interwały czasowe przed i po celu uformowania wzorca sygnału mającego kształt impulsu.

Dla automatycznego określenia momentów czasowych nadających się do obliczania funkcji korelacji wzajemnej zaproponowano następujący algorytm:

1. Wybór doświadczalny wartości progowej s_0 ,
2. Wybór doświadczalny przedziału ufności $M_0 \cdot T$, gdzie M_0 to arbitralnie ustawiona liczba ramek
3. Sygnał $x_{i,j}(nT) / y_{i,j}(nT)$ jest poniżej wartości progowej,
4. Jeżeli wartość sygnału $x_{i,j}(nT) / y_{i,j}(nT)$ przekracza wartość progową s_0 przedziału ufności $[N_p \cdot T, N_p \cdot T + M_0 \cdot T]$ moment $N_p \cdot T - M_0 \cdot T$ jest wybierany jako początek wzorca sygnału,
5. Jeżeli wartość sygnału $x_{i,j}(nT)/y_{i,j}(nT)$ jest poniżej wartości progowej s_0 przedziału ufności $[N_e \cdot T, N_e \cdot T + M_0 \cdot T]$ moment $N_e \cdot T + M_0 \cdot T$ jest wybierany jako koniec wzorca sygnału,
6. Funkcja korelacji wzajemnej jest obliczana wg wzoru:

$$R_{i,j}(kT) = \frac{1}{N_e - N_p + 2M_0} \sum_{n=N_p-M_0}^{N_e+M_0} x_{i,j}(nT)y_{i,j}((n-k)T), \quad (3)$$

7. Podsumowując, prędkość przepływu w (i, j) piksela jest obliczana wg wzoru 2, z uwzględnieniem interwału $[N_e \cdot T, N_e \cdot T + M_0 \cdot T]$:

$$\overline{V_{i,j}|[N_e T, N_e T + M_0 T]} = d/\tau_0. \quad (4)$$

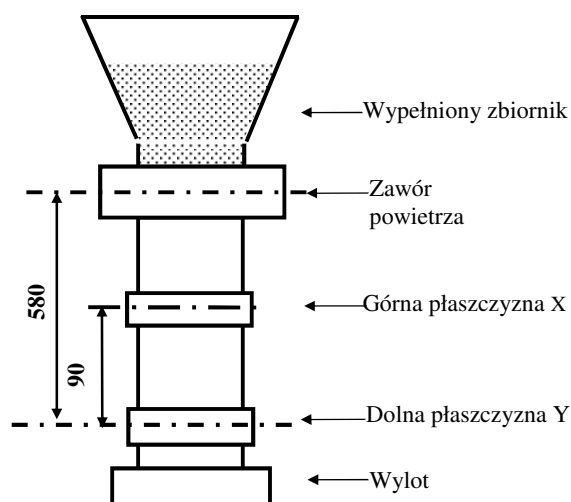
8. Powrót do kroku 3 przy czym $n=N_e$ tzn. zaczynamy analizę sygnałów począwszy od momentu interwału kiedy sygnał jest poniżej wartości progowej $x_{i,j}(N_e T) / y_{i,j}(N_e T)$.

Należy podkreślić, że takie podejście oznacza że prędkość jest wyznaczana dla wybranych wzorców sygnałów i odpowiada ona prędkości przepływu w określonym interwale czasowym. Do obliczania następnej wartości prędkości trzeba znaleźć kolejne odpowiednie wzorce sygnałów. Rysunek 4 przedstawia przykład zmian

koncentracji w określonym pikselu dla przepływu typu gaz/ciało stałe w transporcie pneumatycznym (sekcja pionowa). Jak możemy zauważyć możliwy jest pomiar prędkości dla dwóch wzorców sygnałów jedynie. Poza tymi interwałami prędkość nie może być wyznaczona ze względu na niski poziom sygnałów oscylujących w granicach poziomu szumu.

3. WERYFIKACJA METODY

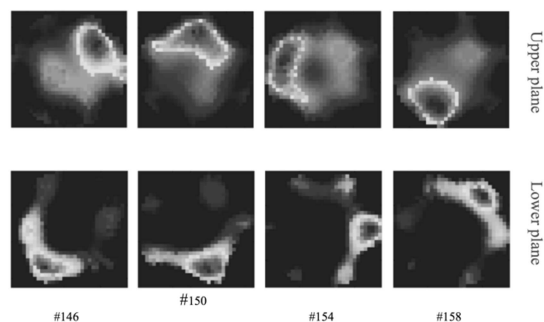
Opracowana metoda została zweryfikowana eksperymentalnie na stanowisku doświadczalnym znajdującym się w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej [3]. Czujnik ECT był zbudowany na rurze z wykonanej z plexi o średnicy wewnętrznej 150 mm (rys. 4). Tak przygotowany czujnik został podłączony do systemu pomiarowego ECT, opartego na technice ładowania/rozładowania przy pomiarze pojemności elektrycznej. System ECT umożliwiał pomiar z prędkością 11 ramek na sekundę [6]. Rekonstrukcja obrazu została wykonana przy pomocy iteracyjnego algorytmu IBP (ang. *iterative back-projection*), [19].



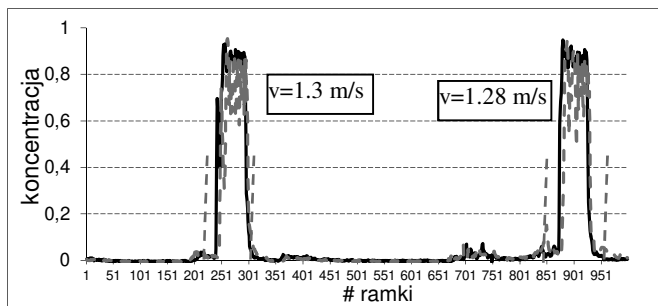
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

Weryfikacja ta została przeprowadzona na podstawie analizy sekwencji obrazów tomograficznych zrekonstruowanych z danych pomiarowych z systemu przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich. Transport materiału związany był z dwoma zjawiskami: materiał opadał w dół pod wpływem siły grawitacji.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe obrazy zrekonstruowane dla danych pobranych podczas pomiaru modelowanego przepływu wirowego.



Rys. 5. Przykłady zrekonstruowanych obrazów tomograficznych



Rys. 6. Przykłady okien czasowych do obliczenia prędkości przepływu w oparciu o proponowane podejście (wybrany próg $s_0 = 0,1$)

Na rysunku 6. pokazano przykłady określania okien czasowych do wyznaczania prędkości przepływu za pomocą zaproponowanego rozwiązania.

4. PODSUMOWANIE

Wielofazowe badanie przepływu i pomiary prędkości wymagają połączenia wielu technologii, czujników i algorytmów, aby zapewnić niezawodne i skuteczne rozwiązania. Znane metody pomiaru czasu przejścia nie uwzględniają wyboru przedziałów czasowych. Artykuł przedstawia sposób obliczania prędkości za pomocą techniki korelacji wzajemnej. W przeciwieństwie do klasycznych metod, proponowana metoda uwzględnia dodatkowe kryterium, tj. obecność wzorców przepływu w objętości czujnika. Wyniki otrzymano dla eksperymentów z przepływem grawitacyjnym; jednak proponowana metoda może być również stosowana do innych przepływów o różnych modalnościach tomograficznych.

5. PODZIĘKOWANIE

Prace zostały sfinansowane z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego: projekt PLATOM POIR.04.01.02-00-0089 / 17-00.

6. BIBLIOGRAFIA

- Ameran, H.L.M., Mohamad, E.J., Rahim, R.A., Rashid, W.N.A., Mohamad, M.M., Hashim, H., Zakaria, Z., Shaib, M.F. and Marwah, O.M.F. Velocity measurement simulative study of twin plane ECT using advanced cross correlation technique, 2015, 10(19).
- Baker, R.C. Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications, 2000, Cambridge: Cambridge University Press.
- Banasiak, R., Wajman, R., Jaworski, T., Fiderek, P., Fidos, H., Nowakowski, J. and Sankowski, D. Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification', International Journal of Multiphase Flow, 58, 2014, 1–14.
- Beck, M.S. and Płaskowski, A. Cross correlation Flowmeters, their design and application. 1987, Available at: https://books.google.ie/books/about/Cross_Correlation_Flowmeters_Their_Desig.html
- Bolton, G.T., H.
- Cooper, C.W. and Stitt, E.H. Flow distribution and velocity in a radial flow fixed bed reactor using electrical resistance tomography', 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada, , 2003, 813–820.
- Brzeski, P., Mirkowski, J., Olszewski, T., Płaskowski, A., Smolik, W. and Szabatin, R. Multichannel capacitance tomograph for dynamic process imaging - Optoelectronics review , 2003, 11(3).
- Corlett, A.E. (2001) Determination of Flow Patterns and Void Fraction of Multiphase Flows Using Electrical Capacitance Tomography. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, 2001, Hannover, Germany, 636–643.
- Dyakowski, T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement', Measurement Science and Technology, 7(3), 1996, 343–353.
- Dyakowski, T. and Williams, R.A. Measurement of particle velocity distribution in a vertical channel', Powder Technology, 77(2), 1993, 135–142.
- Falcone, G., Hewitt, G.F., Alimonti, C. and .., C. Multiphase flow metering, volume 54: Principles and applications (developments in petroleum. 2009, Oxford: Elsevier Science.
- Falcone, G., Hewitt, G.F., Alimonti, C. and Harrison, B. Multiphase flow metering: Current trends and future developments', Journal of Petroleum Technology, 2002, 54(4).
- Jaworski, A.J. and Dyakowski, T. Tomographic Measurements of Solids Mass Flow in Pneumatic Conveying. What Do We Need to Know About the Flow Physics?, 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, Germany, 2001, 353–361.
- Mosorov, V. A method of transit time measurement using twin-plane electrical tomography, Measurement Science and Technology, 17(4), 2006, 753–760.
- Mosorov, V., Sankowski, D., Mazurkiewicz and Dyakowski, T. The best-correlated pixels method for solid mass flow measurements using electrical capacitance tomography, Measurement Science and Technology, 2002, 13(12), 1810–1814.
- Sankowski D., Mosorov V., Grudzień K., Mass flow measurements based on a virtual channel concept, 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'05), 2005, 274 - 279.
- Saoud, A., Mosorov, V. and Grudzień, K. Swirl flow analysis based on electrical capacitance tomography, Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection, 6(2), 2016, 19–23.
- Scott, D.M. and McCann, H. (eds.) Process imaging for automatic control. United States: 2005, CRC Press
- Yang, W. Design of electrical capacitance tomography sensors', Measurement Science and Technology, 21(4), 2010, 042001.
- Yang, X., Zhang, Y., Zhou, D. and Yang, R. An improved iterative back projection algorithm based on ringing artifacts suppression, Neurocomputing, 162, 2015, 171–179.
- Wang Mi. Industrial Tomography: Systems and Applications. Elsevier, 2015, 744 s.

FLOW TRACING VELOCITY MEASUREMENT IN PLUG FLOWS USING TWIN PLANE ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY

The article presents the disadvantages of the known correlation method for estimating time delay. It has been shown that the correlation method for measuring the flow velocity based on tomographic images obtained with a two-plane electrical tomography has serious limitations in practice, especially when the flow is in the plug regime case. The basic problem is the non-stationarity of the measured data, therefore the requirement to correlate the input data is not met. It has been shown that the flow rate can be measured when the data is suitable. An approach for determining the time intervals for calculating the flow velocity was proposed. It has been shown that the approach allows calculating the flow rate in the right way. The results of flow velocity calculations using the proposed concept of a dynamic gas and solid flow regime are presented. Although the proposed concept was verified for tomographic data only, the authors assume that it can be applied for measurement systems based on other modalities, for example, gamma-ray measurement and other systems which employed a cross-correlation function.

Keywords: electric tomography, flow velocity, time interval.