AUTOMATYKA • 2005 • Tom 9 • Zeszyt 3

Krzysztof Grudzień*, Andrzej Romanowski*

Określenie dynamiki przepływu grawitacyjnego przy wykorzystaniu jednopłaszczyznowego czujnika tomograficznego

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwowany jest ciągły rozwój tomografii procesowej w dziedzinach takich, jak:

- sprzęt pomiarowy (czujniki i urządzenia do akwizycji danych),
- protokoły pomiarowe,
- metody analizy danych.

Wszystkie te dziedziny są ze sobą nierozerwalnie związane tak samo, jak i z naturą badanego procesu. Mają one na celu umożliwienie spojrzenia do wnętrza badanego procesu przemysłowego [6]. Główną zaletą zastosowania tomografii procesowej jest możliwość uzyskania rozkładu materiału wewnątrz przekroju poprzecznego zbiornika, w którym zachodzi badany proces przemysłowy. Na tej podstawie możemy następnie uzyskać obraz 2D lub 3D. Informacja wnoszona przez obrazy tomograficzne na temat stanu badanego procesu może zostać wykorzystana do monitorowania i kontroli, bądź badania rzeczonych procesów. W większości zastosowań pierwszym etapem analizy danych w celu pozyskania informacji o badanym procesie jest właśnie faza wizualizacji badanego obiektu do postaci 2D obrazów tomograficznych. Ta faza przetwarzania danych pomiarowych jest zwana etapem rekonstrukcji obrazów i polega na otrzymaniu rozkładu materiału wewnątrz przekroju poprzecznego zamkniętego obiektu [4], w przypadku tomografii pojemnościowej jest to rozkład stałej dielektrycznej, na podstawie zebranych pomiarów z granic obiektu (pojemności).

Kolejnym etapem pozyskiwania informacji o badanym procesie jest analiza danych tomograficznych, a następnie odpowiednia interpretacja otrzymanych wyników. Przedstawione w artykule wyniki prac dotyczą zastosowania klasycznych metod statystycznych do analizy i pozyskiwania informacji o procesie na przykładzie przepływu grawitacyjnego. Wyniki tu przedstawione dotyczą początkowego stadium prowadzonych badań.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

2. Statystyczne metody analizy obrazów tomograficznych

W przypadku szeroko stosowanych metod statystycznych do analizy obrazów tomograficznych przeważają metody oparte na technice korelacji [5, 6]. Najczęściej stosowane przy obliczaniu prędkości przepływu zarówno pneumatycznego, jak i hydraulicznego, jak również podczas szacowania prędkości kątowej przy mieszaniu substancji płynnych. Metody te opierają się na danych pochodzących z dwóch płaszczyzn czujników. W artykule zostanie zaprezentowana estymacja podstawowych parametrów statystycznych, mianowicie autokorelacji i wariancji do badania przepływu grawitacyjnego w oparciu o jedną płaszczyznę czujnika.

Wartości pikseli w każdym z obrazów tomograficznych mają charakter losowy [7], dlatego też zastosowano metody analizy szeregów czasowych, pozwalających kontrolować i monitorować przepływ, które są oparte na teorii procesów stochastycznych. Szereg czasowy jest zbiorem obserwacji następujących po sobie. Jeżeli zbiór ten jest dyskretny, szereg czasowy nazywamy dyskretnym. Analizując szereg czasowy, rozważamy go jako realizację procesu stochastycznego. Służy ona jako model matematyczny opisujący zjawiska losowe w ich powiązaniu z czasem. Dla układu zmieniającego się losowo w czasie, stan tego układu dla każdej chwili $t = \Delta T \cdot k$ (gdzie ΔT oznacza czas próbkowania, k – kolejne próbkowanie) daje się opisać za pomocą liczby X_k, tak więc ewolucja układu opisana jest za pomocą funkcji $X(t)$.

2.1. Estymacja parametrów statystycznych

Wartość średnią procesu losowego w pewnej chwili t_1 można wyznaczyć za pomocą wzoru

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} x_k(t_1) \tag{1}$$

W analogiczny sposób możemy wyznaczyć korelację (moment łączny zmiennej losowej) między wartościami procesu losowego w dwóch różnych chwilach (zwaną autokorelacją)

$$R_x(t_1, t_1+\tau) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} x_k(t_1) x_k(t_1+\tau) \tag{2}$$

Proces losowy można rozpatrywać również w postaci sumy składowej statycznej i dynamicznej lub fluktuacyjnej. Tę pierwszą składową można opisać przez wartość średnią. Składowa dynamiczna jest opisywana przez wariancję. Jeśli procesy te są ergodyczne możemy zapisać:

$$\mu_x = \mu_x(k) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t)dt \tag{3}$$

$$\sigma_x^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt \tag{4}$$

Parametry te są estymowane przez obserwowanie badanego procesu przez pewien czas. W praktyce mamy skończony szereg czasowy $[v_1, v_2, \ldots, v_N]$ złożony z N obserwacji, jako realizację procesu stochastycznego, z których możemy otrzymać estymatory funkcji korelacji, średniej i innych parametrów określających proces losowy. W przypadku obrazów tomograficznych na każdy proces losowy składa ciąg wartości pikseli w kolejnych chwilach czasowych. Dla zrekonstruowanego obrazu o rozmiarze 32×32, mamy 1024 procesy losowe $N = 1024$, które można analizować poprzez estymowanie odpowiednich parametrów (oczywiście analizie podlegają piksele należące do przekroju poprzecznego obiektu, w przypadku rurociągu jest ich 812).

Estymatory użytych parametrów zostały przedstawiono na poniższych wzorach:

– wartość oczekiwana $\bar{v}$

$$E[v] = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} v_k \tag{5}$$

– funkcja autokorelacji

$$cor(q) = \frac{E[(v_k - \bar{v})(v_{k+q} - \bar{v})]}{\sqrt{E[(v_k - \bar{v})^2]E[(v_{k+q} - \bar{v})^2]}} \tag{6}$$

– wariancja

$$\mathrm{var} = E[(v_k - E[v_k])^2] \tag{7}$$

3. Przepływ grawitacyjny

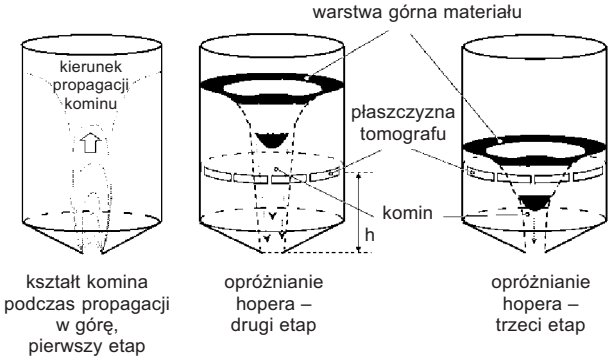
Hopery to nazwa grupy zbiorników (*hopper*) do przechowywania i ochrony materiałów stałych; zwykle są to proszki, granulaty, ziarna i inne. Zbiorniki te wykorzystywane są szeroko w przemyśle chemicznym, budowlanym, spożywczym i przetwórczym oraz we wszelkiego rodzaju mniejszych instalacjach do przechowywania i transportu materiałów stałych. Jedną z odmian hoperów są m.in. silosy. Badanie zachowania materiału w trakcie opróżniania hoperów pozwoli zrozumieć naturę tego procesu i może w efekcie prowadzić do lepszego projektowania i wykorzystywania zbiorników do przechowywania i rozładowywania materiałów stałych. W trakcie rozładowywania zbiorników mogą pojawić się różne reżimy przepływu materiałów stałych; najważniejsze z nich to tzw. przepływ masowy i przepływ kominowy [1, 2, 3]. Przepływ masowy charakteryzuje się tym, że całość materiału znajdująca się w płaszczyźnie poprzecznej zbiornika porusza się w kierunku otworu jednocześnie z taką samą prędkością. Czasami pojawia się sytuacja, kiedy w centrum przekroju poprzecznego hopera materiał porusza się szybciej niż przy ścianach, tworząc tzw. komin, w którego obrębie materiał płynie swobodnie, natomiast materiał zgromadzony przy ścianach może nawet przestać się w ogóle poruszać, tworząc tzw. region stagnacji lub martwą strefę (rys. 1).

Hopery powinny być tak zaprojektowane, aby dawały się łatwo rozładować i aby materiał nie ulegał degradacji podczas opróżniania. Jednakże w trakcie pracy hoperów pojawia się wiele problemów takich, jak m.in.:

– za mała prędkość opróżniania,
– niekompletne opróżnianie,
– blokowanie przepływu.

3.1. Etapy opróżniania hopera

Rysunek 1 pokazuje uproszczony model formułowania się komina i opróżniania hopera. Rysunek ten przedstawia schematyczny model zbiornika o okrągłym przekroju poprzecznym zakończonym ściętym, odwróconym stożkiem z okrągłym otworem wylotowym. To stożkowe zakończenie jest często stosowane w przemyśle w celu łatwiejszego opróżniania i minimalizacji efektu kominowego. Model podobnego hopera został zaprojektowany do wykonania serii eksperymentów. Jest to zbiornik o przekroju okrągłym z płaskim dnem. Model ten jest dokładnie opisany w następnym podrozdziale.



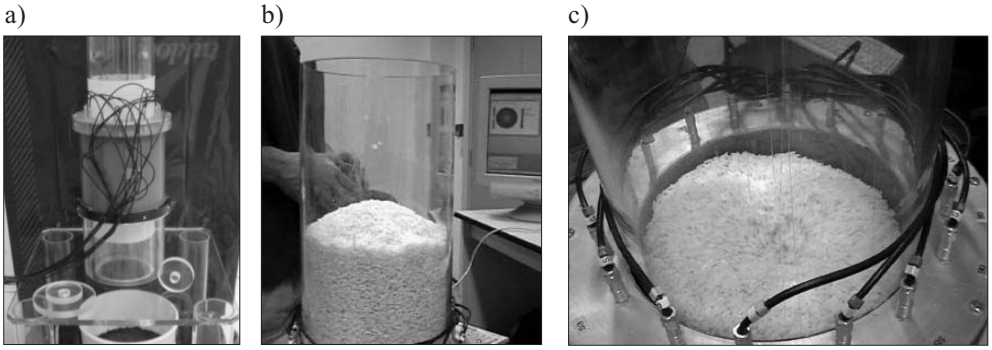
Rys. 1. Etapy opróżniania hopera

Po otwarciu otworu wylotowego hopera pojawia się komin, który propaguje w górę. Materiał opuszcza zbiornik, tworząc wąski lej. Górna warstwa materiału porusza się w dół, charakteryzując się przepływem masowym. Materiał w tej warstwie zachowuje się odmiennie niż w niższych warstwach, różnica w koncentracji materiału w części środkowej oraz przy ścianach hopera na wysokości górnej warstwy nie jest tak znacząca jak w warstwach niższych.

3.2. Opis eksperymentu

W przeprowadzonym eksperymentach użyty został hoper w kształcie walca o wysokości 700 mm i szerokości 150 mm, zakończony płaskim dnem. Zrezygnowano ze stożkowego zakończenia zbiornika, aby ułatwić powstawanie efektu kominowego w celu jego lepszego zbadania. Średnica otworu wylotowego wynosiła 30 mm i 50 mm. Materiałami, które

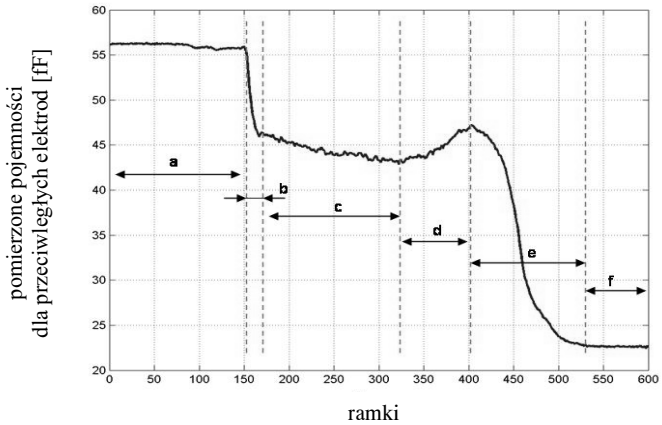
posłużyły do badań były podłużne ziarna ryżu o dłuższym wymiarze około 5–6 mm i średnicy przekroju około 3 mm oraz granulat poliamidowy w postaci nieregularnych brył zbliżonych kształtem do kul o rozmiarach średnicy około 3–4 mm. Czujnik pojemnościowy posiadał 8 elektrod o długości l = 30 mm. Rysunek 2 prezentuje stanowisko laboratoryjne.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: a) model hopera z podłączonym czujnikiem pojemnościowym; b) walcowa część hopera wypełniona ryżem; c) warstwa górna materiału podczas opróżniania hopera

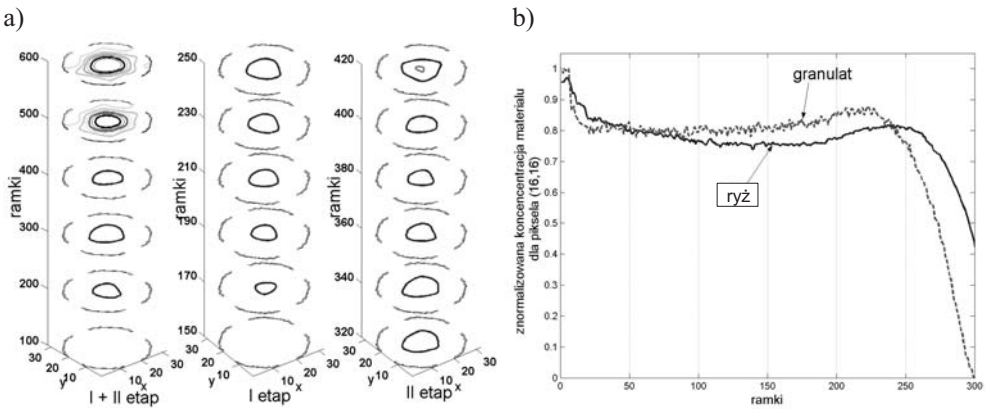
3.3. Wizualizacja zjawisk fizycznych podczas opróżniania hopera

Obserwując wykres zmian pojemności pomiędzy elektrodami leżącymi naprzeciwko siebie podczas opróżniania hopera, można zauważyć charakterystyczne przedziały czasowe (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyka opróżniania hopera na podstawie zmian pomierzonych pojemności: a – brak zmian mierzonych pojemności; b – propagacja komina na poziomie płaszczyzny czujnika; c – stabilizacja komina (wzrost szerokości komina na wysokości płaszczyzny elektrod); d – warstwa górna płynącego materiału pojawia się na wysokości płaszczyzny czujnika; e – opuszczenie wysokości płaszczyzny czujnika przez opadający materiał; f – obszar pozostałości materiału (*stangant zone*)

Możliwość detekcji różnicy upakowania materiału w powstającym kominie oraz w strefie przyległej do ściany hopera pozwoliła sądzić, że bardziej szczegółowe badania będą miały miejsce, gdy zostaną przeanalizowane zrekonstruowane obrazy tomograficzne. Na rysunku 4 zostały przedstawione etapy opróżniania hopera w postaci sekwencji zrekonstruowanych obrazów tomograficznych (rys. 4a), zmiany przenikalności dielektrycznej odpowiadającej koncentracji materiału dla piksela o współrzędnych (16, 16), (rys. 4b). Jak widać możliwa jest detekcja niewielkich zmian koncentracji materiału (szacunkowo rzędu kilku, kilkunastu procent) w czasie opróżniania hopera w centrum oraz przy ścianach hopera [3]. Można zaobserwować na rysunku 4a charakterystyczne dwa etapy opróżniania hopera, etap komina (I etap) oraz etap końcowy opróżniania (II etap). Rysunek 4b prezentuje charakterystyki zmian koncentracji dla dwóch materiałów ryżu i granulatu.

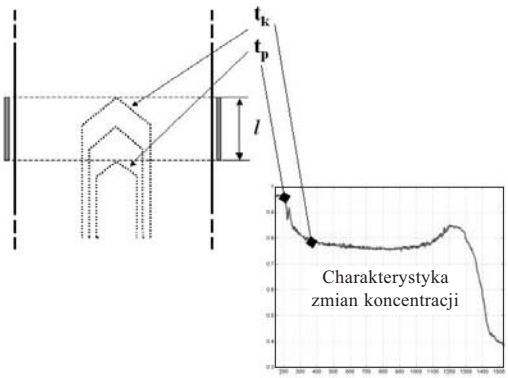


Rys. 4. Zrekonstruowane dane pomiarowe: a) sekwencja obrazów tomograficznych otrzymanych podczas opróżniania hopera dla czujnika położonego na wysokości 30 mm od otworu wylotowego o średnicy 30 mm; b) zmiany koncentracji materiału dla piksela o współrzędnych (16, 16), linia kropkowana dotyczy granulatu, linia ciągła – ryżu

4. Estymacja parametrów statystycznych dla potrzeb badania przepływu grawitacyjnego

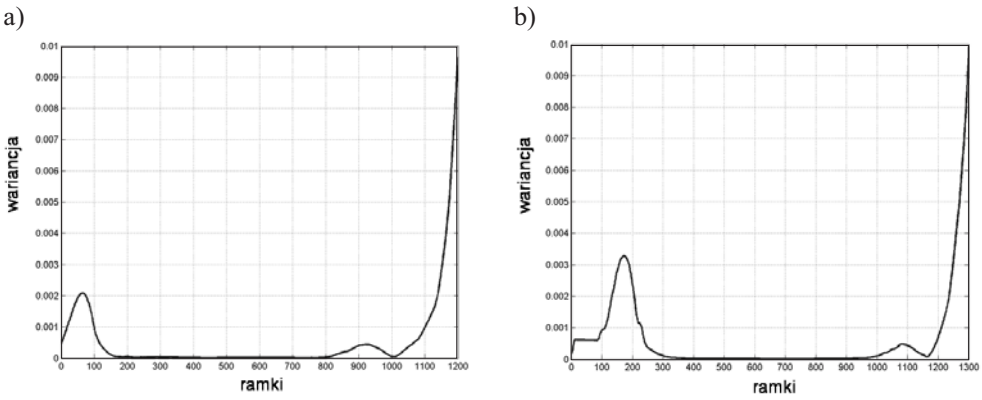
4.1. Wyznaczenie prędkości propagacji komina

Odcinek *b* na rysunku 3 (obszar analizowany przy wyznaczaniu prędkości propagacji komina) prezentuje propagację komina w górę na poziomie płaszczyzny czujnika. Zaproponowana metoda oszacowywania prędkości rozchodzenia się komina opiera się na interpretacji zmian koncentracji w pikselu należącym do obszaru komina. Poszukujemy przesunięcia czasowego pomiędzy chwilą pojawienia się komina na wysokości dolnej krawędzi płaszczyzny elektrod t_p a zajęciem przez komin całej długości l elektrod dla czasu t_k. Rozważania te zostały zobrazowane na rysunku 5.



Rys. 5. Proponowana metoda estymowania prędkości propagacji komina przy użyciu jednopłaszczyznowego tomografu pojemnościowego

Do oszacowania przesunięcia czasowego $\Delta t_{kp} = t_k - t_p$ została zaproponowana metoda oparta na sekwencyjnym estymowaniu wariancji szeregu czasowego zdefiniowanego na wartościach wybranego piksela obrazu tomograficznego. Na rysunku 6 zostały przedstawione przykładowe wykresy zmian estymowanej wariancji w czasie. Przesunięcie czasowe zostało określone jak różnica czasu pomiędzy pierwszym maksimum a minimum wariancji.



Rys. 6. Wykres funkcji wariancji dla hopera: a) o średnicy otworu wylotowego d = 30 mm i wysokości płaszczyzny czujnika h = 30 mm; b) o średnicy otworu wylotowego d = 30 mm i wysokości płaszczyzny czujnika h = 50 mm

Z przedstawionych wykresów możemy wnioskować, że prędkość rozchodzenia się komina jest różna na różnych wysokościach. W tabeli 1 zostały zebrane obliczone prędkości rozchodzenia się komina na różnych wysokościach, przy różnych otworach wylotowych (30 mm i 50 mm) oraz dla dwóch użytych materiałów (ryż, granulat).

Tabela 1
Oszacowane prędkości propagacji komina dla poszczególnych wysokości czujnika

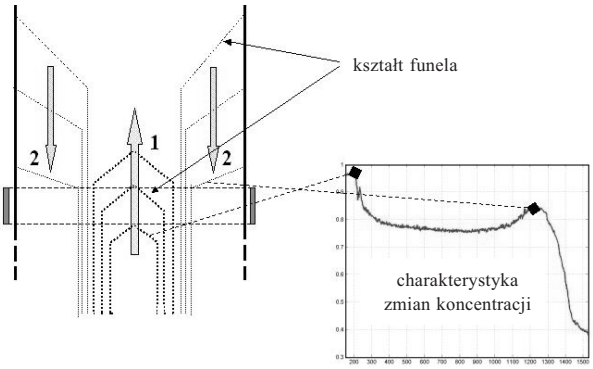
h [mm]	t_{30r} [s]	v_{30r} [m/s]	t_{50r} [s]	v_{50r} [m/s]	h [mm]	t_{50p} [ms]	v_{50p} [m/s]
15	0,62	0,048	0,4	0,075	**15**	0,22	0,136
30	0,8	0,037	0,6	0,05	**30**	0,26	0,115
45	1,08	0,028	0,78	0,038	**35**	0,28	0,107
200	4,3	0,007					

h – wysokość położenia dolnej krawędzi płaszczyzny czujnika nad otworem wylotowym hopera, *t* – czas przejścia czoła komina przez płaszczyznę elektrod, *v* – prędkość propagacji komina, r – ryż, p – granulat

Analiza powyższych wartości pozwala zauważyć pewną zależność pomiędzy wysokością położenia czujnika *h* a prędkością rozchodzenia się komina *v* i co jest oczywiste – wpływem na prędkość *v* rozmiaru otworu wylotowego. Wraz ze wzrostem wysokości położenia czujnika maleje prędkość rozchodzenia się komina. Ruch komina odbywa się w dwóch kierunkach w górę oraz na boki. Wzrost szerokości komina powoduje, że ilość materiału zdolnego opuścić hoper zwiększa się, spowalniając równocześnie ruch materiału z wyższych partii. Inną prawidłowość, którą można zaobserwować to: prędkość rozchodzenia się komina jest zależna od rodzaju materiału znajdującego się w hoperze. Dla granulatu prędkości te są większe niż dla ryżu, co jest spowodowane odmiennymi właściwościami materiału.

4.2. Wyznaczenie parametru dynamiki opróżniania hopera

Funkcja autokorelacji może natomiast posłużyć jako pomoc przy wyznaczaniu dynamiki zmian wewnątrz hopera podczas opróżniania. Zaproponowana metoda pozwala znaleźć opóźnienie czasowe pomiędzy chwilą, gdy komin pojawia się na wysokości płaszczyzny elektrody, a momentem, kiedy materiał pojawia się na wysokości górnej krawędzi elektrod (rys. 7).



Rys. 7. Proponowana metoda estymowania dynamiki propagacji komina przy użyciu tomografu pojemnościowego i jej interpretacja fizyczna (obszar b+c+d z rys. 3)
1 – komin, 2 – materiał

Dla tej idei pomiaru dynamiki badanego procesu przemysłowego nie zostały jeszcze przeprowadzone szczegółowe badania. Dla obydwu metod badania dynamiki kluczowym okazuje się dobór odpowiedniej długości okna czasowego dla kolejnych estymacji parametrów.

5. Wnioski

Przedstawione wyniki otrzymane przy zastosowaniu analizy statystycznej danych pochodzących z jednej płaszczyzny czujnika pokazują, jak ważne jest zrozumienie badanego procesu przemysłowego. Wiedza, jaką dysponujemy o badanym procesie, przed analizą danych powinna być wykorzystana w etapie pozyskiwania informacji, a następnie użyta przy interpretacji wyników. W przypadku zaproponowanych klasycznych metod analizy danych, odpowiednia interpretacja zmian koncentracji materiału podczas opróżniania hopera umożliwia oszacowanie dynamiki zjawiska. Opisane metody statystyczne nie są niczym nowym, natomiast użycie ich do badania przepływu grawitacyjnego przy wykorzystaniu jednopłaszczyznowego czujnika ECT stanowi nowość. Przedstawione wyniki są początkiem prac i potrzebna jest ich kontynuacja. Zaproponowane metody są oparte na zrekonstruowanych obrazach tomograficznych, które są, jak wiadomo, obarczone błędem. Możliwe, a nawet wskazane jest użycie do analizy danych pobranych bezpośrednio z elektrod czujnika.

Literatura

[1] Bates L.: *Problems In Particulate Flow, Part A – Flow Regimes*. by Ajax Equipment Ltd. Mule Street, Bolton Bl2 2ar, United Kingdom, 1999 Educ. Reso. For Part. Techn. 992q-Bates, http://www.erpt.org/992q/Bate-00.Htm (accessing date: May 2004)

[2] Grudzien K., Romanowski A., Aykroyd R.G., Williams R.A., West R.M., Meng S.: *Application of the Bayesian Approach to Powder Flow Investigation*. 3rd Intrenational Symposium on Process Tomography, Lodz, Poland, 2004, 72–76

[3] Grudzień K., Romanowski A.: *Wizualizacja przepływu materiałów stałych w hoperach*. Półrocznik AGH Automatyka, t. 8, z. 3, 2004, 401–408

[4] Lionheart W.R.B.: *Review: Developments in EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments*. Physiol. Meas., 25, 2004, 125–142

[5] Mosorov V., Sankowski D., Mazurkiewicz Ł., Dyakowski T.: *The application of electrical capacitance tomography for solids mass flow measurements*. Measurement Science and Technology, 12, 2002, 1810–1814

[6] Plaskowski A., Beck MS., Thorn R., Dyakowski T.: *Imaging Industrial Flows*. Institute of Physics Publishing Ltd, 1995, 214

[7] Sankowski D., Mosorow W., Grudzień K.: *Analiza szeregów czasowych obrazów tomograficznych*. XI Konferencja Sieci i Systemy Informatyczne, Łódź, 2003, 421–428