

**KRZYSZTOF GRUDZIĘŃ, ZBIGNIEW CHANIECKI
DOMINIK SANKOWSKI**

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

MACIEJ NIEDOSTATKIEWICZ

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechniki Gdańskiej

POMIAR ZJAWISK DYNAMICZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH PODCZAS OPRÓŻNIANIA SIŁOSÓW PRZY ZASTOSOWANIU TOMOGRAFII ECT

Recenzent: **dr inż. Mariusz Rzaśa**

Maszynopis dostarczono: 1. 10. 2010

W artykule przedstawiono zastosowania elektrycznej tomografii pojemnościowej do monitorowania zjawisk dynamicznych zachodzących podczas procesu rozładowywania silosu. Badania doświadczalne przeprowadzono w cylindrycznym silosie o smukłej geometrii. W trakcie opróżniania silosu obserwowano silne efekty dynamiczne. Analiza danych pomiarowych jak również obrazów tomograficznych pozwoliła na pomiar parametrów przepływu grawitacyjnego określających poziom efektów dynamicznych. Przeprowadzono również doświadczenia dla kontrolowanego wypływu materiału sypkiego z silosu z założoną prędkością poruszania się materiału w zbiorniku w celu weryfikacji uzyskanych wyników przepływu swobodnego. Eksperymenty przeprowadzono dla zróżnicowanego zagęszczenia początkowego materiału sypkiego oraz zmiennej szorstkości ścian i średnicy otworu wylotowego. Przedstawiono metody przetwarzania i analizy przetwarzania

danych pomiarowych oraz zrekonstruowanych obrazów tomograficznych, których wynikiem jest informacja diagnostyczna o stanie procesu przepływu grawitacyjnego.

1. WPROWADZENIE

Ciągły rozwój technologii produkcji wymaga uzyskiwania coraz dokładniejszej wiedzy na temat prowadzonych procesów. Standardowe metody opierające się na pomiarze charakterystycznych parametrów procesów przemysłowych okazują się niewystarczające. Dla prawidłowej kontroli procesu konieczne jest posiadanie wiedzy na temat zjawisk zachodzących wewnątrz instalacji przemysłowych. Zainstalowanie standardowych przyrządów pomiarowo – kontrolnych w instalacjach, często wysokociśnieniowych (np. w rurociągu wydobywającym ropę naftową z dna oceanu), wymaga wykonania otworów, czyli inwazji w proces. Taki sposób montażu sondy powoduje osłabienie konstrukcji zbiornika oraz zakłócenie zachodzącego procesu. Pojawiła się zatem potrzeba zastosowania nieinwazyjnych metod, które umożliwiają poznanie oraz monitorowanie zjawisk zachodzących w obszarach zamkniętych, takich jak zbiorniki (ang. vessels), komory mieszalnicze (ang. stirred reactors) i rurociągi (ang. pipelines). Przykładem dynamicznych procesów przemysłowych, których metody kontroli charakteryzują się wysokimi wymaganiami dotyczącymi stosowanych czujników pomiarowych w systemach monitorowania i diagnozowania to przepływy wielofazowe.

Systemy pomiarowe oparte na analizie i przetwarzaniu informacji wizyjnej, w porównaniu do klasycznych narzędzi pomiarowych posiadają dwie główne zalety. Zdecydowanie lepiej uwidaczniają zjawiska fizyko-chemiczne (w czasie i przestrzeni), zachodzące podczas procesu przemysłowego, co pozwala na opracowanie lepszych metod kontroli i diagnozowania procesów przemysłowych. Drugą zaletą to nieinwazyjność pomiaru. W celach badawczych procesów przepływu, stosujących techniki wizualizacji struktur procesu, często używane są systemy oparte o kamery CCD. Dostarczają one szeroko pojętej informacji o procesie przemysłowym. Główną wadą zastosowania kamer CCD jest jednak konieczność użycia przezroczystego zbiornika, w którym odbywa się badany proces przemysłowy. Dodatkowo istnieje potrzeba swobodnego dostępu do procesu przemysłowego. Systemy przemysłowe w odróżnieniu od stanowisk laboratoryjnych często nie spełniają takich wymagań. Często również techniki oparte na obrazach z kamer CCD wymagają użycia cząstek znacznikowych, w celu umożliwienia obserwacji przepływu na podstawie sekwencji obrazów. Skutkuje to pewnego rodzaju inwazją w przebieg procesu przemysłowego. Inną charakterystyczną cechą pomiaru przepływu przy pomocy CCD daje lepszy efekt dla przepływu cieczy niż przepływu materiałów sypkich o gęstym upakowaniu

(może być obciążony choćby błędem związanym z oświetleniem materiału) i ogranicza się jedynie do warstw zewnętrznych.

Wady te spowodowały wytworzenie coraz to doskonalszych narzędzi do pomiaru przepływów wielofazowych. Szukając technik, pozwalających wizualizować przepływ wielofazowy w sposób, który umożliwia „zajrzenie” do środka nieprzezroczystego naczynia, użyto technik obrazowania pacjenta w medycynie - tomografii medycznej. W połowie lat 80-tych nauki medyczne zaczęły również stosować tomografie impedancyjną jako bezpieczną i taną metodę do obrazowania pracy organów wewnętrznych człowieka. Okazało się, że idea medycznych technik tomograficznych zaczerpnięta z medycyny eliminuje większość problemów, z którymi nie mogła sobie poradzić technika optyczna oparta na kamerze CCD [1-3]. Przede wszystkim możliwe stało się monitorowanie i śledzenie systemów nieprzezroczystych oraz otrzymanie ilościowej i jakościowej informacji z niedostępnych dla techniki optycznej miejsc. Zaś tomografię procesową można zdefiniować jako nieinwazyjną technikę wizualizacji procesów przemysłowych zachodzących wewnątrz zamkniętego, często nieprzezroczystego obiektu bez naruszenia jego struktury. Uzyskana dzięki zastosowaniu tomografii procesowej informacja wizyjna, której otrzymanie innymi metodami jest niemożliwe bez naruszenia struktury badanego medium, obrazuje zjawiska fizyczne zachodzące wewnątrz urządzeń i aparatów przemysłowych, półprzemysłowych oraz laboratoryjnych [1-3].

Elektryczna Tomografia Pojemnościowa (Electrical Capacitance Tomography - ECT), stanowiąca narzędzie pomiarowe w przeprowadzonych pomiarach, stosowana jest do pomiaru przepływów materiałów sypkich w instalacji transportu pneumatycznego materiału sypkiego [4-7], grawitacyjnego przepływu w silosach [8-13] czy złoża fluidalne [14-16].

W przeprowadzonych doświadczeniach analizie poddano wpływ parametrów zmiennych (zagęszczenia początkowego oraz szorstkości ścian) na amplitudę zmian koncentracji, jak również na zmianę szerokości lokalizacji odkształceń w strefie przyściennej, które były wizualizowane przy pomocy metod rekonstrukcji obrazu. Dalej, w artykule omówiono mechanizmy powstawania efektów dynamicznych, na podstawie rezultatów uzyskanych w wyniku zastosowania metody ECT do analizy wielkości amplitud pulsacji materiału sypkiego [17-21]. Wstępne wyniki pokazały, że największe impulsy poziome występują w połowie wysokości silosu, w miejscu przejścia przepływu masowego w kominowy. Wykazano również, że wielkości pulsacji materiału sypkiego wpadającego do tworzącego się kanału przepływu są zbliżone do amplitud pulsacji materiału w strefie przyściennej, gdzie występuje dynamiczna interakcja pomiędzy przepływającym materiałem sypkim, a ścianą silosu.

2. ELEKTRYCZNA TOMOGRAFIA POJEMNOŚCIOWA – ECT (ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY)

Dane uzyskane bezpośrednio z tomografu (w przypadku tomografów pojemnościowych wektor wartości proporcjonalnych do pojemności między elektrodowych czujnika C), chociaż w niektórych zastosowaniach użyteczne [2], w pierwszym etapie przetwarzania danych podlegają zazwyczaj procesowi rekonstrukcji w wyniku, której otrzymujemy obraz reprezentujący rozkład pewnej cechy w badanym przekroju. Elektryczna tomografia pojemnościowa (Electrical Capacitance Tomography - ECT) jest techniką wizualizacji rozkładu przestrzennego przenikalności dielektrycznej $\epsilon(x, y)$ mieszaniny dwóch lub więcej materiałów wewnątrz zamkniętego naczynia na podstawie zebranych pomiarów pojemności C. Rozkład przenikalności elektrycznej ϵ powiązany jest bezpośrednio z koncentracją transportowanego materiału ρ . Należy jednak zaznaczyć, że zagadnienie bezpośredniej zależności pomiędzy koncentracją rozumianą jako zagęszczenie materiału, a rozkładem przenikalności dielektrycznej w analizowanym przekroju czujnika pomiarowego nadal pozostaje nie w pełni wyjaśnione i jest aktualnie przedmiotem intensywnych prac, między innymi związanych z określeniem zależności pomiędzy statycznym zagęszczeniem początkowym materiały sypkiego a mierzonymi wartościami pojemności międzyelektrodowych. Prace te umożliwić mają wyznaczenie stałej dielektrycznej dla mieszaniny, jaką jest materiał sypki, z uwzględnieniem wypełnienia przestrzeni pomiędzy ziarnami powietrzem atmosferycznym [22]. Inne prace polegają na równoczesnym zastosowaniu tomografii promieni X oraz ECT do badań przepływu grawitacyjnego materiałów sypkich w silosach prostokątnych w celu określenia m.in. relacji między wartościami pomiarowymi, wartościami pikseli obrazów tomograficznych a rzeczywistą wartością koncentracji materiału w obszarze pomiarowym [23].

Tym samym ocena wielkości zmian koncentracji materiału sypkiego podczas dynamicznych pulsacji w czasie opróżniania silosu na podstawie pomiarów tomograficznych ma charakter analizy jakościowej.

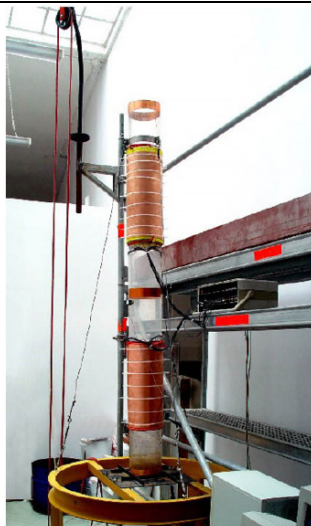
W przypadku technik tomograficznych znaczącą rolę przy interpretacji wyników odgrywa procedura kalibracji czujnika oraz normalizacja danych pomiarowych. Przed przystąpieniem do procesu rekonstrukcji obrazu tomograficznego, wartości pomiarowej są normalizowane, wynikiem czego zostają przeskalowane do przedziału [0, 1]. Wartość 0 oznacza wartości pomiarowe dla czujnika pustego, natomiast wartość 1 oznaczają pełny czujnik – stan początkowy pomiaru badanego procesu przemysłowego. Dalsza analiza i interpretacja danych opiera się na porównywaniu do stanu początkowego. Szczegóły opisu normalizacji danych pomiarowych znaleźć można w [2].

3. STANOWISKO BADAWCZE

Efekty dynamiczne są nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym procesowi opróżniania silosu. Według [19-20] przyczyną powstawania silnych efektów dynamicznych w silosach jest rezonans między częstotliwościami samowzbudnych drgań materiału sypkiego, a częstotliwościami drgań własnych konstrukcji silosowej, a efektem rezonansowym towarzyszą efekty akustyczne i drgania konstrukcji wsporczych. Miejsce występowania maksymalnych amplitud pulsacji materiału sypkiego związane jest bezpośrednio z przejściem przepływu masowego w przepływ rdzeniowy i zależy od stosunku średnicy otworu wylotowego do średniej średnicy ziarna d_{50} . Zwiększenie tej wartości, powoduje zmniejszenie wysokości (mierzonej od dna silosu), przy której zanikają dynamiczne pulsacje. Badania przedstawione w [21] wykazały, że efekty dynamiczne powstają w wyniku rezonansu pomiędzy drgającym, przepływającym materiałem sypkim, a konstrukcja silosu, potwierdzając tym samym koncepcję stworzoną przez Tejchmana [20]. Jako źródło drgań materiału sypkiego wskazał jednak występowanie poziomego impulsu dynamicznego powstającego w wyniku zmiany kierunku ścinania w strefie przyściennej w poziomie wierzchu leja wewnętrznego silosu. Ze względu na podobieństwo kształtu silosu i występowanie siły poziomej w opisie mechanizmu powstawania efektów dynamicznych zastosowano teorię dzwonów (pobocznica silosu-powłoka dzwonu, impuls poziomy-serce dzwonu).

Badania modelowe, których wyniki są przedstawione w artykule, zostały przeprowadzone dla cylindrycznego silosu (Rys. 1). Wysokość silosu wynosiła $h=2.0$ m, jego średnica zewnętrzna $d=0.20$ m, grubość ścian silosu wynosiła 0.004 m. Silos posadowiony był na niepodatnej ramie stalowej, opróżnianie odbywało się grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany. W przypadku opróżniania grawitacyjnego doświadczenia przeprowadzono dla otworów wylotowych o średnicy $d_0=0.04, 0.07$ oraz 0.12 m. Otwory były rozmieszczone w osi symetrii dna silosu. W przypadku opróżniania kontrolowanego doświadczenia przeprowadzono dla przypadku obniżania się płaskodennego dna silosu ze stałą prędkością. Eksperymenty przeprowadzono dla prędkości opróżniania $v=0.0001, 0.005, 0.001, 0.005$ oraz 0.08 m/s.

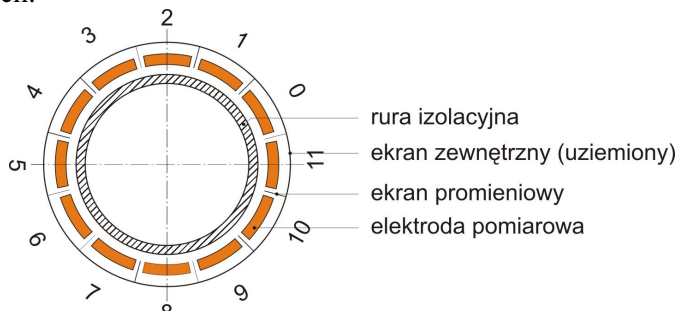
Do eksperymentów użyto piasku średnioziarnistego, o średniej średnicy ziarna $d_{50}=0.8$ mm. Materiał w stanie luźnym ($\gamma=15.04$ kN/m³, $e_0=0.76$) uzyskano poprzez napełnianie przez rurę o średnicy 0.05 m ustawioną bezpośrednio nad materiałem sypkim i podnoszoną sukcesywnie w miarę napełniania silosu.



Rys. 1. Stanowisko badawcze (silos cylindryczny) do badań z zastosowaniem metody ECT

Materiał w stanie zagęszczonym uzyskano stosując napełnianie metodą deszczu rozproszonego (przez sito umieszczone na stałe na górze silosu) ($\gamma=17.05 \text{ kN/m}^3$, $e_o=0.56$). Doświadczenia przeprowadzono dla ścian gładkich oraz bardzo szorstkich. Podwyższenie szorstkości ściany uzyskano poprzez wyklejenie wewnętrznej części silosu papierem ściernym 60 ($r_w \approx d_{50}$).

W badaniach zastosowano dwa czujniki 12-elektrodowe (Rys. 2). Długość elektrod pomiarowych wynosiła 0.20 m i była równa średnicy silosu. Elektrody pomiarowe wykonane zostały techniką płytek drukowanych na płytkach laminatowych.



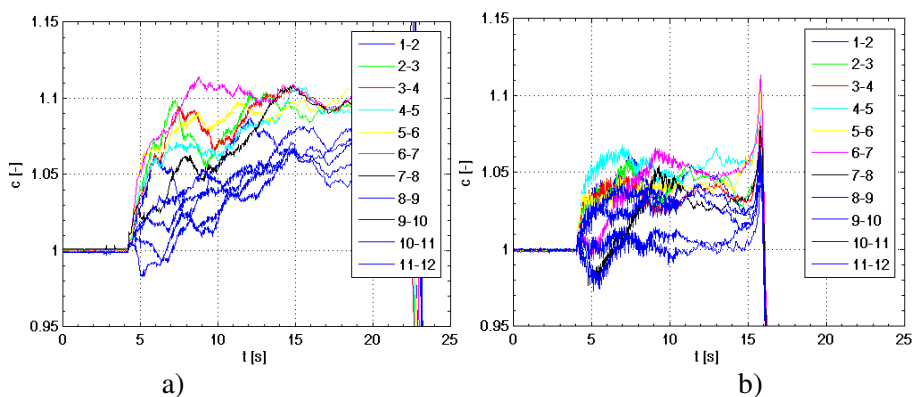
Rys. 2. Schemat czujnika do pomiarów z zastosowaniem metody ECT (Electrical Capacitance Tomography)

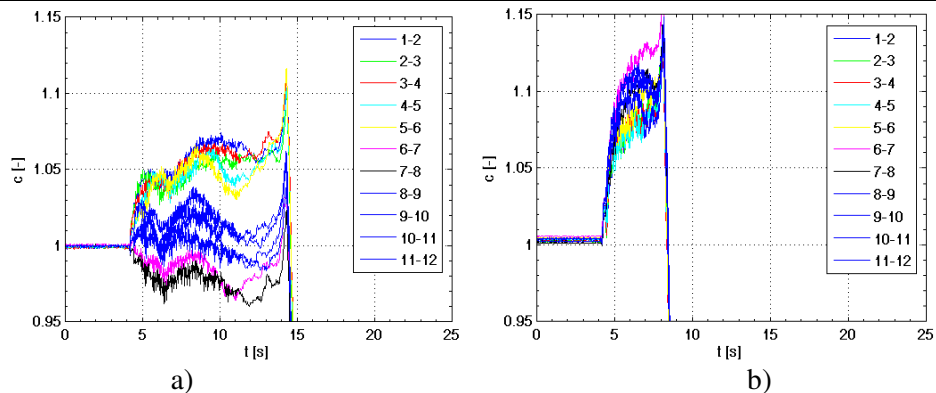
Pomiary wykonane zostały dla czujników usytuowanych na wysokościach 0.30, 0.85, 1.00 oraz 1.50 m powyżej dna silosu. W czasie doświadczeń możliwy

był jednoczesny pomiar dla 2 położań czujników – dwóch wysokości nad otworem wylotowym. Uzyskane wartości przekraczające znormalizowaną wartość 1.0 oznaczały wzrost koncentracji materiału (zjawisko kontraktacji), wartości poniżej 1.0 oznaczały zmniejszenie koncentracji (zjawisko dylatacji). Do rekonstrukcji obrazów tomograficznych w przekrojach poprzecznych silosu zastosowano szybką i prostą metodę LBP (ang. Linear Back Projection).

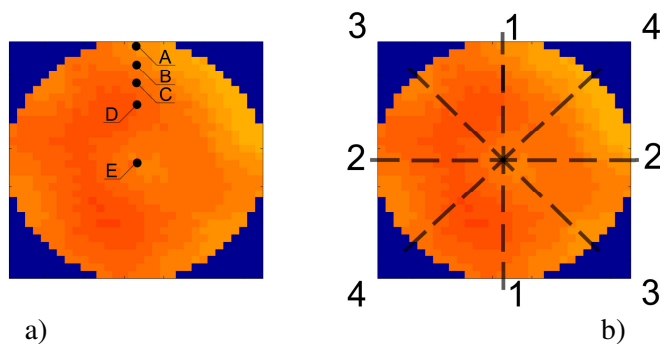
4. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ

W pierwszym etapie badań szczególnie nacisk położono na przeanalizowanie wyników pomiarów bezpośrednich (danych surowych) uzyskanych dla różnych poziomów wysokości silosu. Analizie poddano zmiany koncentracji materiału sypkiego pomierzone pomiędzy wszystkimi przyległymi parami elektrod pomiarowych. Analiza dotyczyła obszaru przyściennego, zjawisk dotyczących interakcji materiału sypkiego i ścian silosu. Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że największe amplitudy zmian koncentracji w strefie przyściennej występowały na wysokości $h=0.85$ m oraz $h=1.0$ m powyżej dna silosu (Rys. 3). Wielkość amplitud pulsacji była w praktyce stała od początku rozpoczęcia opróżniania silosu. Na wysokości $h=0.3$ m ze względu na wytworzenie się kanału przepływu i pojawienie się stref martwych w strefie przyściennej, nie zaobserwowano dynamicznych pulsacji koncentracji materiału sypkiego. Zaobserwowane na wysokości $h=1.50$ m pulsacje materiału sypkiego spowodowane były drganiami swobodnymi materiału sypkiego w poziomie wierzchu silosu. Wysokość ta charakteryzowała się też największym wzrostem koncentracji materiału – zjawisko kontraktacji.





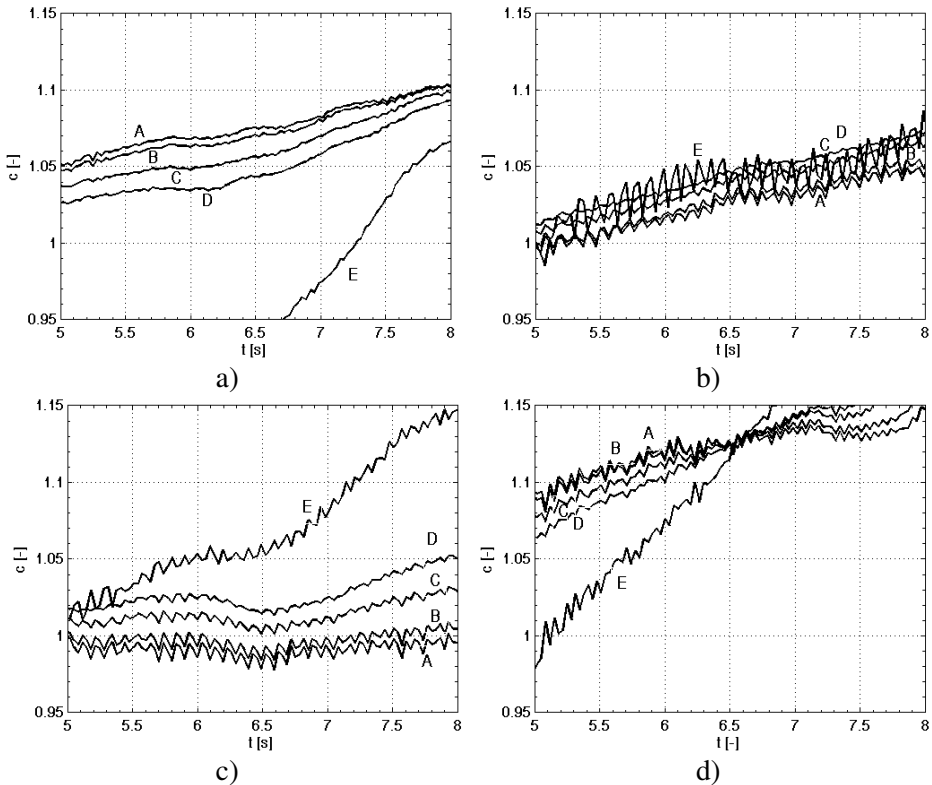
Rys. 3. Wizualizacja 1D zmian koncentracji luźnego piasku średnioziarnistego $d_{50}=0.8$ mm w silosie cylindrycznym, ze ścianami gładkimi, dla profili przyściennych na wysokościach powyżej h dna silosu: a) $h=0.3$ m, b) $h=0.85$ m, c) $h=1.0$ m d) $h=1.5$ m



Rys. 4. Położenie: a) punktów pomiarowych (pikseli) w przekroju poprzecznym silosu: A-(1, 16), B-(3, 16), C-(5, 16), D-(7, 16), E-(16, 16), b) przekrojów pomiarowych w przekroju poprzecznym silosu: 1-przekrój poziomy, 2-przekrój pionowy, 3, 4-przekroje ukośne

W celu wizualizacji zmian koncentracji materiału sypkiego w obszarze całego przekroju poprzecznego silosu na poszczególnych poziomach wysokości, a nie jedynie w strefie przyściennej zastosowano analizę danych zrekonstruowanych – analizę obrazów tomograficznych. Dla obrazu zrekonstruowanego przy pomocy metody LBP przedstawionego w postaci macierzy 32×32 pikseli wybrano punkty charakterystyczne (Rys. 4A): w strefie przyściennej - punkty A oraz B, w odległości 0.25 średnicy silosu od ściany zewnętrznej - punkty C oraz D, w osi symetrii - punkt E.

Do analizy przepływu grawitacyjnego wybrano przedział czasu pomiędzy 5 a 8 sek. pomiaru odpowiadający wstępnej fazie opróżniania silosu - w czasie przepływu zaawansowanego wielkości amplitud pulsacji koncentracji materiału sypkiego miały te same wartości. Podobnie jak miało to miejsce na podstawie pomiarów opartych na danych surowych największe amplitudy pulsacji koncentracji występowały na wysokościach $h=0.85$ oraz $h=1.00$ m (Rys. 5).



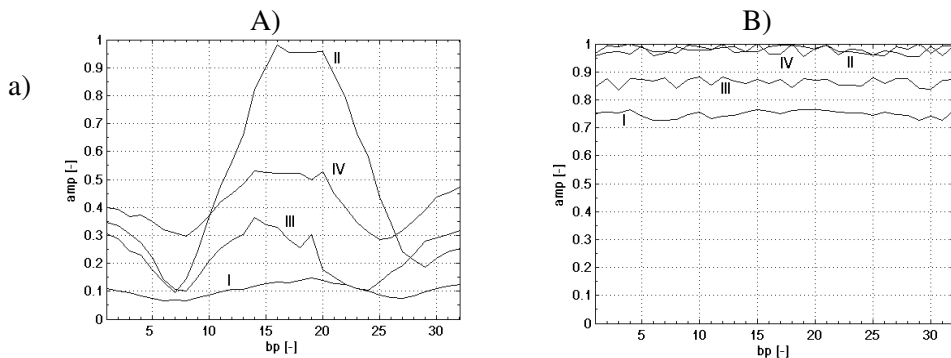
Rys. 5. Wizualizacja 1D zmian koncentracji luźnego piasku średnioziarnistego $d_{50}=0.8$ mm w silosie cylindrycznym, ze ścianami gładkimi, na wysokościach powyżej dna silosu: a) $h=0.3$ m, b) $h=0.85$ m, c) $h=1.0$ m, d) $h=1.5$ m, dla różnych położen punktów pomiarowych (pixeli): A, B, C, D, E

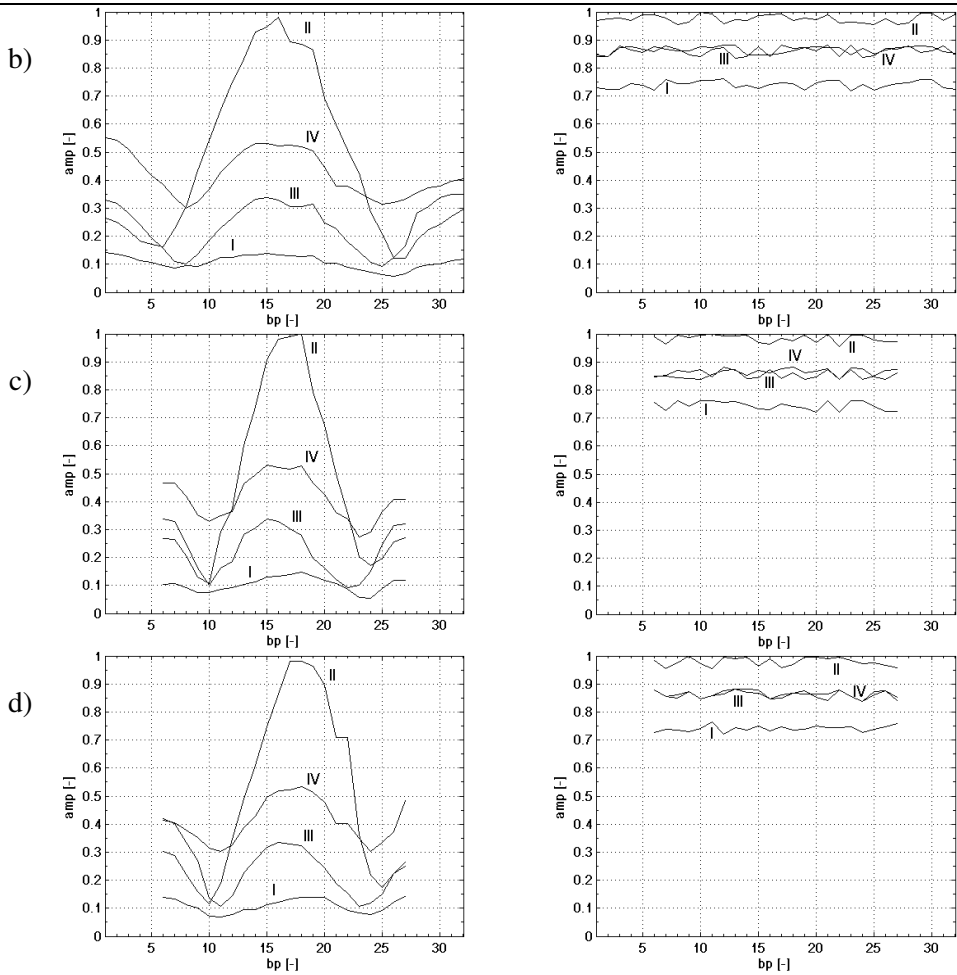
Zastosowanie w analizie danych zrekonstruowanych umożliwiło jednak stwierdzenie, że na tych poziomach zdecydowanie największe pulsacje występują osi symetrii silosu (punkt E) w miejscu styku, pomiędzy wytwarzającym się kanałem przepływu, a tworzącymi się przyściennymi strefami martwymi (punkt D). Uzyskane wyniki sugerowały, że w miejscu przejścia przepływu masowego w przepływ kominowy (na wysokości $h=0.85-1.0$ m) następuje dynamiczny impuls, prawdopodobnie spowodowany zmianą kierunku ruchu w materiale

sypkim. Wielkości amplitud w strefie przyściennej (punkt A oraz punkt B) spowodowane były dynamiczną interakcją pomiędzy przepływającym, drgającym materiałem sypkim, a ścianą silosu.

W celu oceny zmian koncentracji materiału sypkiego podczas opróżniania silosu nie tylko w poszczególnych punktach, lecz również wzdłuż przekrojów poprzecznych (pokazanych na Rys. 4b) wykonano profile przedstawiające trendy pulsacji materiału sypkiego. Profile wykonano na wszystkich poziomach pomiarowych, poprzez zastosowanie aproksymacji wielomianem 5-tego stopnia wartości pulsacji w poszczególnych punktach pomiarowych w przedziale czasu od 5 do 8 s pomiaru (Rys. 6). Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że największe amplitudy zmian koncentracji odpowiadające dynamicznym pulsacjom występują w poziomie $h=0.85$ m w środku symetrii silosu. Sytuacja ta miała miejsce niezależnie od kierunku analizowanego profilu, co potwierdza, że przepływ silosowy jest symetryczny, bądź zbliżony do symetrycznego (Rys. 6A). W strefie przyściennej również występowały dynamiczne pulsacje, natomiast na granicy strefy ścinania amplitudy pulsacji miały tendencje do zanikania. Zależności pomiędzy wielkością amplitud a położeniem punktów pomiarowych w przekroju poprzecznym były niezależne od zagęszczenia początkowego materiału sypkiego-podobne zachowanie miało miejsce również w przypadku piasku zagęszczonego.

Wzrost szorstkości ściany nie wpłynął na zmianę zależności w zakresie lokalizacji występowania pulsacji o największej amplitudzie. Uzyskane wyniki potwierdziły występowanie dynamicznych pulsacji również w czasie wypływu materiału sypkiego z silosu ze ścianami bardzo szorstkimi, jednak wielkość tych amplitud była zdecydowanie mniejsza niż w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi (Rys. 6B).

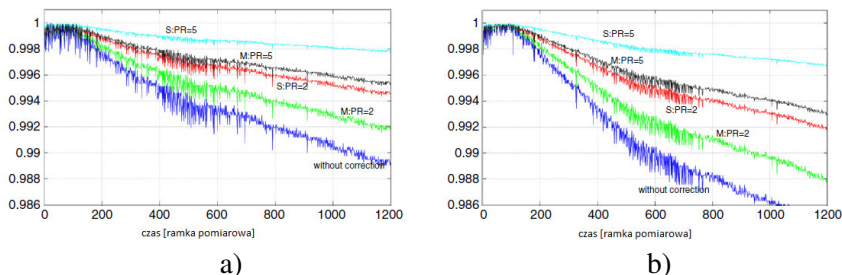




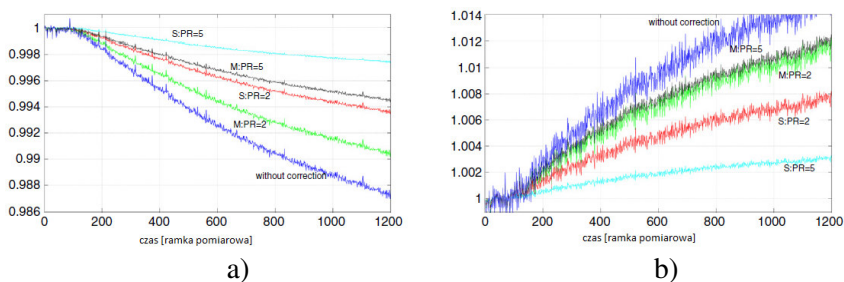
Rys. 6. Wizualizacja 1D znormalizowanych zmian koncentracji luźnego piasku średnioziarnistego $d_{50}=0.8$ mm w silosie cylindrycznym, ze ścianami: A) gładkimi, B) bardzo szorstkimi na wysokościach powyżej dna silosu: $h=0.3$ m (I), $h=0.85$ m (II), $h=1.0$ m (III), $h=1.5$ m (IV), dla różnych przekrojów poprzecznych: a) 1-1, b) 2-2, c) 3-3, d) 4-4, bp oznacza numer piksela w danym przekroju

Otrzymane wyniki pomiarowe oscylacji materiału pojawiających w trakcie opróżniania silosów, zarówno zrekonstruowane obrazy tomograficzne jak również danych pomiarowych, cechują nie wielkie zmiany sygnału. W celu weryfikacji zmian sygnałów pomiarowych, przeprowadzono dodatkowe serie pomiarów dotyczącą grawitacyjnego przepływu kontrolowanego, w którym całe dno silosu przesunęło się z zadaną prędkością. Otrzymane pomiary zostały

zinterpretowane przez autorów jako najmniejsze zmiany sygnału, które możliwe są do rozpoznania jako efekt oscylacji materiału. Poniżej ustalonego poziomu zmiana sygnału była interpretowana jako szum pomiarowy. Na Rys. 8. zostały pokazane przykładowe pomiary dla przepływu kontrolowanego z prędkością obniżania dna silosu 0.1mm/s. Zmian w wartości pomiarowych dla tego przypadku wynosiły $[0.4,1.5] \times 10^{-3}$, a dla obrazów zrekonstruowanych $[0.3-2.2] \times 10^{-3}$. Dodatkowo przeprowadzono procedurę korekcji danych pomiarowych w celu sprawdzenia wpływu metod przetwarzania danych pomiarowych na wilekosc zmian amplitudy sygnałów pomiarowych [24].



Rys. 8. Zmiany wartości pomiarowych (danych surowych) dla elektrod przyległych dla przepływu kontrolowanego piasku gęstego z prędkością opadania dna silosu 0.1 mm/s: a) czujnik na wysokości $h=1.0\text{m}$, b) czujnik na wysokości $h=1.5\text{m}$, S - oznacza szeregową korekcję danych pomiarowych, M - oznacza korekcję Maxwella danych pomiarowych



Rys. 9. Zmiany wartości pikseli dla wysokości czujnika $h=1.5\text{m}$ dla przepływu kontrolowanego piasku gęstego z prędkością opadania dna silosu 0.1 mm/s: a) położenie piksela przy ścianie silosu (1,16), b) położenie piksela w centrum silosu (16,16), S - oznacza szeregowa korekcje danych pomiarowych, M - oznacza korekcję Maxwella danych pomiarowych

5. WNIOSKI

Zastosowanie bezinwazyjnej techniki pomiarowej, jaką jest Elektryczna Tomografia Pojemnościowa – ECT, pozwoliło na jednoznaczne stwierdzenie występowania miejsca przejścia przepływu masowego w kominowy na wysokości $h=0.85$ m, odpowiadającej 0.43 wysokości silosu.

Przeprowadzona z zastosowaniem techniki pomiarowej ECT analiza rozkładu wielkości amplitud dynamicznych pulsacji pokazała, że największe oscylacje występują w miejscu przejścia przepływu masowego w przepływ kominowy. Tomograficzna rekonstrukcja rozkładu koncentracji materiału sypkiego w przekroju poprzecznym silosu umożliwiła stwierdzenie, że największe pulsacje występują w obszarze kanału przepływu. W strefie przyściennej wielkość amplitud dynamicznych pulsacji jest mniejsza.

Mechanizm powstawania silnych efektów dynamicznych (efektów dźwiękowych) podczas opróżniania silosu powodowany jest dynamiczną interakcją pomiędzy przepływającym materiałem sypkim a konstrukcją silosu, która powstaje w wyniku zmiany kierunku ścinania w materiale sypkim w chwili przejścia przepływu masowego kominowy. Prowadzone są aktualnie badania nad zastosowaniem, dokładniejszej, aczkolwiek wolniejszej techniki pomiarowej, tomografii promieni X. Wstępne badania dowodzą możliwości wizualizowania zachowania się cząstek materiału sypkiego w silosie w obszarze przyściennym. Kolejne prace autorów artykułu będą dotyczyły porównania pomiarów przy zastosowaniu tomografii ECT oraz promieni X.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują za wsparcie badań poprzez projekt naukowo-badawczy pt. „Uzyskanie doskonałości w badaniach naukowych i przemysłowych zastosowaniach bezinwazyjnych systemów diagnostycznych” nr 167/6, PR UE/2007/7. Projekt finansowany jest przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP i wspomaga realizację projektu DENIDIA.

Autorzy artykułu Krzysztof Grudzień i Zbigniew Chaniecki są stypendystami projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń - zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej - zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

LITERATURA

- [1] **Plaskowski A., Beck M.S, Thorn R., Dyakowski T.:** Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography, Taylor & Francis, 1995, p. 232.
- [2] **Williams RA., Beck MS.:** Process Tomography: Principles, Techniques and Applications, Butterworth-Heinemann, 1995, p. 384.
- [3] **Scott D.M., McCann H.:** Process imaging for automatic control. Taylor and Francis, 2005, p. 439.
- [4] **Jaworski A., Dyakowski T.:** Application of electrical capacitance tomography for measurement of gas-solids flow characteristics in a pneumatic conveying system. Measurement Science and Technology. 12, 2001, pp. 1109-1119.
- [5] **Ostrowski K.L., Luke S.P., Bennett M.A., Williams R.A.:** Real Time Visualisation and Analysis of Dense Phase Powder Conveying. Powder Technol., 102, 1999, pp. 1-13.
- [6] **Yang W.Q., Liu S.:** Role of tomography in gas/solids flow measurement. Flow Meas. and Instrum., 11, 2000, pp. 237-244.
- [7] **Grudzień K., Romanowski A., Aykroyd R.G., Williams R.A.:** Advanced Statistical Analysis as a Novel Tool to Pneumatic Conveying Monitoring and Control Strategy Development. Part. Part. Syst. Charact., 23, 2006, pp. 289-296.
- [8] **Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiewicz M., Sankowski D.:** Bulk Solids Flow Analysis in Silos by Electrical Capacitance Tomography. Proceedings of 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, 2005, pp. 1024-1029.
- [9] **Chaniecki Z., Dyakowski T., Niedostatkiewicz M., Sankowski D.:** Application of electrical capacitance tomography for bulk solids flow analysis in silos. Particle & Particle Systems Characterization. 23, 3-4, 2006, pp. 306-312.
- [10] **Grudzień K., Romanowski A., Williams R.A., Sankowski D.:** Methods for analysis of hopper flow behaviour using electrical capacitance tomography. Proceedings of 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan. 2005, pp. 892-897.
- [11] **Niedostatkiewicz M., Tejchman J., Chaniecki Z.:** Zastosowanie Tomografii do pomiaru zmian objętościowych materiału sypkiego w procesie opróżniania silosów. Acta Agrophysica, Lublin. 4(3), 2004, pp. 777-786.
- [12] **Niedostatkiewicz M., Tejchman J., Chaniecki Z., Grudzień K.:** Determination of bulk solid concentration changes during granular flow in a silo with ECT sensors. Chemical Engineering Science. 64, 2008, pp. 20-30.
- [13] **Grudzien K., Romanowski A., Chaniecki Z., Niedostatkiewicz M., Sankowski D.:** Description of the silo flow and bulk solid pulsation

- detection using ECT. *Flow Measurements and Instrumentation*, Vol. 21, 2010, p. 198-206.
- [14] **Kuhn FT., Schouten JC., Mudde RF., van den Bleek CM., Scarlett B.:** Analysis of chaos in fluidization using electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.*, 7, 1996, pp. 361–368.
- [15] **Liu S., Yang W. Q., Wang H., Yan G., Pan Z.:** Flow pattern identification of fluidized beds using ECT. *Journal of Thermal Science*, 10, 2000, 176-181.
- [16] **Wang HG. and Yang WQ.:** Measurement of fluidised bed dryer by different frequency and different normalisation methods with electrical capacitance tomography. *Powder Technology*, 199, 2009, pp. 60-69.
- [17] **Niedostatkiewicz M., Tejchman J.:** Measurements of changes of the bulk solid density during granular flow in silos. *Powder Handling & Processing*. 17, 2, 2005, pp. 76-83.
- [18] **Niedostatkiewicz M., Tejchman J.:** Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow. *Powder Handling & Processing*. 15, 1, 2003, pp. 36-42.
- [19] **Wilde K., Rucka M., Tejchman J.:** Silo music-mechanism of dynamic flow and structure interaction. *Powder Technology*. 186, 2008, pp. 113-129.
- [20] **Tejchman, J.:** Technical concept to prevent the silo honking. *Powder Technology*. 106, 1999, pp. 7-22.
- [21] **Wilde K., Tejchman J., Rucka M., Niedostatkiewicz M.:** Experimental and theoretical investigations of silo music. *Powder Technology*, 198, 2009, pp. 14-24.
- [22] **Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Chaniecki Z., Romanowski A., Sankowski D.:** Wyznaczenie gęstości upakowania materiału w silosie na podstawie danych pomiarowych elektrycznej tomografii pojemnościowej (ECT). *Zeszyty Naukowe AGH, Półrocznik Automatyka*, Kraków, 13 (3), 2010, pp. 1285-1295.
- [23] **Grudzien K., Niedostatkiewicz M., Adrien J., Maire E.:** Quantitatively description of the bulk solid concentration changes based on X-ray continuous radiation, *Materiały konferencyjne 6th World Congress on Industrial Process Tomography*, Beijing, China, 2010. CD-ROM Proceedings.
- [24] **Grudzien K., Romanowski A., Chaniecki Z., Niedostatkiewicz M., Sankowski D.:** Description of the silo flow and bulk solid pulsation detection using ECT, *Flow Measurements and Instrumentation*, 21, 2010, p. 198-206.

APPLICATION OF THE ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY TO THE MEASUREMENT OF THE DYNAMIC EFFECTS OF THE BULK SOLID FLOW DURING SILO EMPTYING

Summary

The paper presents the results of experiments performed with the cylindrical silo-during tests strong dynamics effects called “silo music” occurred. Experiments were performed for gravitational and controlled silo emptying, for different initial densities, different wall roughness and outlet diameter. On the basis of results gained with application of the Electrical Capacitance Tomography measurement technique new conception of the origin of the strong dynamic effects was proposed.

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej