

ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII DO POMIARU ZMIAN
OBJĘTOŚCIOWYCH MATERIAŁU SYPKIEGO W PROCESIE
OPRÓŻNIANIA SILOSÓW*

Maciej Niedostatkiewicz¹, Zbigniew Chaniecki², Jacek Tejchman¹

¹Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

²Wydział Elektrotechniki i Elektroniki, Politechnika Łódzka
Aleja Politechniki 11, 90-924 Łódź

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów zmian zagęszczenia materiałów sypkich podczas dynamicznych przepływów silosowych prowadzonych przy zastosowaniu Elektrycznej Tomografii Pojemnościowej. Tomografia umożliwia obserwacje zmian zagęszczenia materiału sypkiego w przekroju poziomym, w szczególności zmian zachodzących w strefie przyściennej. Doświadczenia przeprowadzono stosując 12-elektrodowe czujniki o stosunku długości do średnicy silosu wynoszącym 1. Elektrody pomiarowe były rozmieszczone na 2 wysokościach na zewnątrz silosu wykonanego z pleksi. Model silosu posadowiony był na nieodkształcalnej ramie stalowej. Doświadczenia przeprowadzono z suchym piaskiem, dla różnego zagęszczenia początkowego oraz różnej szorstkości ścian.

Słowa kluczowe: materiały sypkie, efekty dynamiczne, zagęszczenie, tomografia

WSTĘP

Podczas procesów płynięcia w materiale sypkim do momentu osiągnięcia stanu rezydualnego (krytycznego) występują znaczne zmiany wskaźnika porowatości, które zależą od początkowego zagęszczenia materiału, poziomu naprężenia oraz kierunku przyrostu odkształceń. Podczas wypływu z silosu materiał sypki ulega nieustannym zmianom objętościowym; od dylatacji (rozluźnienie) do

*Praca prezentowana i opublikowana w ramach aktywności Centrum Doskonałości AGROPHYSICS (Contract No.: QLAM-2001-00428) 5 Programu Ramowego UE.

kontraktacji (zagęszczenie) i odwrotnie. Jest to spowodowane ciągłymi zmianami kierunku odkształceń stycznych, które powstają w wyniku zwięzienia przepływu przy otworze wylotowym [1]. Znajomość rozkładu zagęszczenia wewnątrz materiału sypkiego jest bardzo istotna przy wyznaczaniu jego naporu na ściany silosu oraz wyjaśnieniu mechanizmu powstawania efektów dynamicznych.

Do wyznaczania rozkładu wskaźnika porowatości wewnątrz materiałów sypkich stosowano dotychczas następujące metody bezinwazyjne: radiograficzną, ultrasonograficzną, stereo-fotogrametryczną, PIV (Particle Image Velocimetry) oraz eksperymentalnie tomograficzną.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników pomiaru rozkładu zmian zagęszczenia w materiale sypkim podczas dynamicznego przepływu silosowego przy zastosowaniu elektrycznej tomografii pojemnościowej (Electric Capacity Tomography) [2-4].

METODYKA BADAŃ

Pomiary wykonane zostały w cylindrycznym modelu silosu z pleksiglasu (wysokość $h = 2$ m, średnica $d = 0,2$ m, średnica otworu wylotowego $d_o = 0,07$ m), posadowionym na ramie stalowej i opróżnianym grawitacyjnie przez otwór mniejszy od średnicy d . Podczas opróżniania występowały w piasku średnio-ziarnistym (średnia średnica ziarna $d_{50} = 0,8$ mm) bardzo silne efekty dynamiczne pochodzenia rezonansowego (częstotliwość samowzbudnych drgań materiału sypkiego była równa częstotliwości drgań całej konstrukcji silosowej) [1]. Efekty te miały miejsce tylko w górnej części silosu (powyżej $h = 1$ m) podczas przepływu masowego. W momencie powstania przepływu kominowego w dolnej części silosu drgania zostały wytłumione w nieruchomym materiale znajdującym się przy ścianach. W czasie pomiarów tomograficznych silos napełniony był piaskiem w stanie luźnym oraz zagęszczonym [2]. Ściany silosu były gładkie albo bardzo szorstkie (pokryte papierem ściernym). Zmiany zagęszczenia materiału w czasie przepływu uzyskano z analizy zmian stałej dielektrycznej materiału sypkiego metodą tzw. liniowej projekcji wstecznej [3], [4]. Do pomiarów zastosowano 12-elektrodowe czujniki o długości równej średnicy modelu silosu rozmieszczone na wysokości $h = 0,5$ m i $h = 1,5$ m licząc od dna silosu (rys.1). Wyniki pomiarów zmian zagęszczenia piasku podczas przepływu silosowego pokazano na rysunkach 2-9. W czasie doświadczeń rodzaj zmian objętościowych (dylatację lub kontraktację) określano poprzez analizę porównawczą tomogramu w odniesieniu do istniejącej w oprogramowaniu aparatury pomiarowej skali kolorystyki zmian zagęszczenia początkowego. Opracowana skala dokładności pomiaru zmian objętościowych umożliwiła obserwację zmian zagęsz-

czenia do 5% wartości zagęszczenia początkowego Szerokość strefy ścinania wyznaczono poprzez pomiar obrazu tomograficznego w skali rzeczywistej.



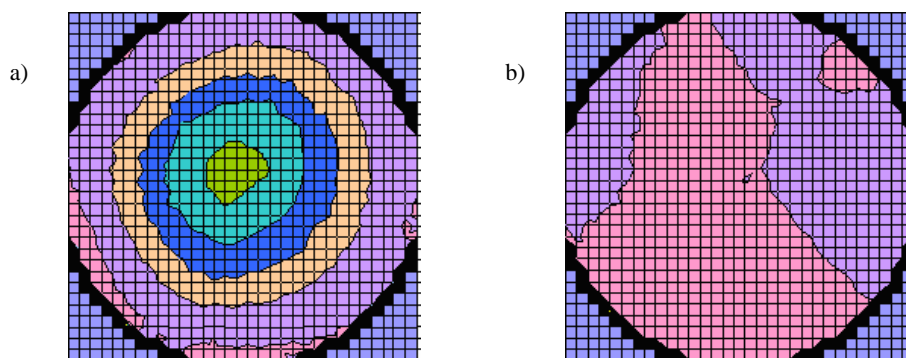
Rys. 1. Stanowisko badawcze: widok silosu ze ścianami gładkimi i elektrodami pomiarowymi
Fig. 1. Silo structure used in the tests: view of silo with smooth walls and measurement sensors

WYNIKI

Ściany gładkie

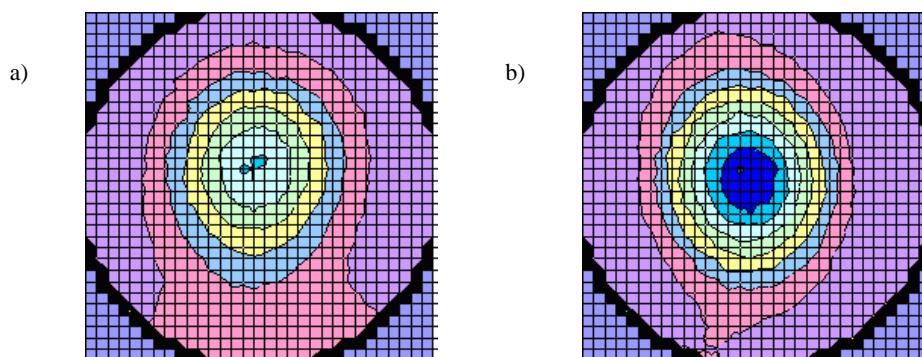
Dla ścian gładkich i piasku wstępnie luźnego w początkowej fazie wypływu (po 1 s wypływu) na wysokości $h = 1,5$ m i $h = 0,5$ m materiał sypki zagęszczał się równomiernie w przekroju poprzecznym. W stanie początkowym ciężar objętościowy materiału sypkiego wynosił $15,6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$. Wzrost zagęszczenia wynosił w przybliżeniu około 15% wartości zagęszczenia początkowego. Po 4,0 s wypływu na wysokości $h = 1,5$ m w środku silosu nastąpił wzrost zagęszczenia materiału o około 35% w stosunku do zagęszczenia początkowego (rys. 2a), natomiast na wysokości $h = 0,5$ m wzrost ten był mniejszy i wynosił około 15% (rys. 2b). Na wysokości $h = 0,5$ m rdzeń przepływu kominowego pojawił się po 7,0 s wypływu, gdy górny poziom piasku znajdował się na wysokości 1,3 m (rys.3a). W czasie przepływu kominowego (po 14,0 s wypływu) na wysokości $h = 0,5$ m materiał w rdzeniu przepływu był rozluźniony o około 20% w porównaniu do zagęszczenia początkowego, natomiast przy

ścianach wzrost zagęszczenia był rzędu 15% (rys. 3b). Szerokość rdzenia przepływu kominowego w przybliżeniu była równa szerokości otworu wylotowego $d_o = 0,07$ m.



Rys. 2. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami gładkimi na wysokości: a) $h = 1,5$ m, b) $h = 0,5$ m po 4 s opróżniania (piasek luźny)

Fig. 2. Distribution of bulk solid density in the silo with smooth walls at: a) $h = 1.5$ m, b) $h = 0.5$ m after 4 s of discharge (loose sand)

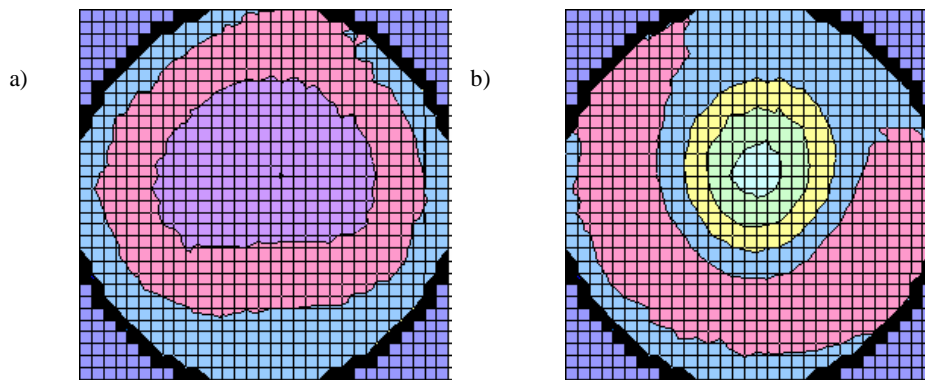


Rys. 3. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami gładkimi na wysokości $h = 0,5$ m po: a) 7 s, b) 14 s opróżniania (piasek luźny)

Fig. 3. Distribution of bulk solid density in the silo with smooth walls at $h = 0.5$ m after: a) 7 s, b) 14 s of discharge (loose sand)

Dla ścian gładkich i materiału w stanie zagęszczonym w początkowej fazie wypływu zachowanie materiału było podobne jak dla piasku luźnego. Po 1 s wypływu na wysokości $h = 1,5$ m i $h = 0,5$ m materiał sypki zagęszczał się równomiernie w przekroju poprzecznym. Wzrost zagęszczenia wyniósł w przybliżeniu około 5%

wartości zagęszczenia początkowego. Po 4 s wypływu na wysokości $h=1,5$ m wystąpił mniejszy wzrost zagęszczenia materiału w porównaniu do piasku luźnego (wzrost o 30% wartości zagęszczenia początkowego). Na wysokości $h = 0,5$ m wzrost zagęszczenia był mniejszy i wynosił 10%. Rdzeń przepływu na wysokości $h = 0,5$ m pojawił się później niż dla piasku luźnego, po 11,0 s wypływu, gdy górny poziom materiału sypkiego znajdował się na wysokości 0,9 m (rys. 4a). W czasie przepływu kominowego (po 14 s wypływu) na wysokości $h = 0,5$ m zachowanie materiału w rdzeniu przepływu kominowego było podobne jak piasku luźnego. Piasek był rozluźniony w rdzeniu przepływu o około 10% w porównaniu do zagęszczenia początkowego, natomiast przy ścianach był bardziej zagęszczony o około 10% (rys. 4b). Szerokość rdzenia przepływu kominowego była mniejsza niż dla piasku luźnego o około 20%.



Rys. 4. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami gładkimi na wysokości $h = 0,5$ m po: a) 7 s, b) 14 s opróżniania (piasek zagęszczony)

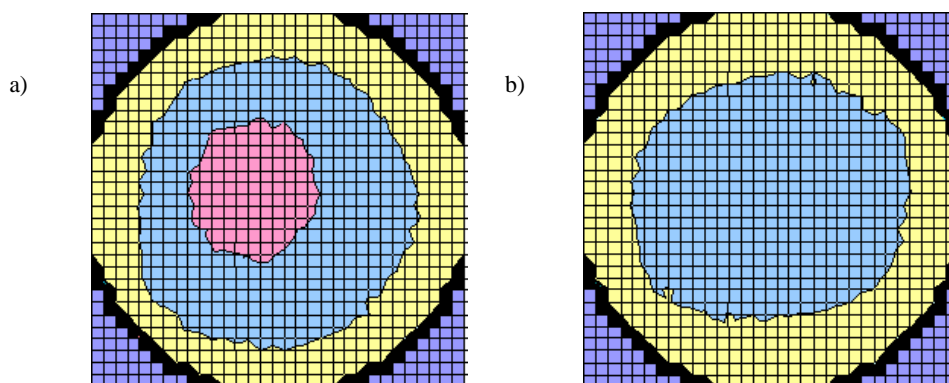
Fig. 4. Distribution of bulk solid density in the silo with smooth walls at $h = 0,5$ m after: a) 7 s, b) 14 s of discharge (dense sand)

Ściany szorstkie

Dla ścian szorstkich i piasku luźnego na początku procesu opróżniania silosu zachowanie materiału w środku silosu było podobne jak dla ścian gładkich. W 1 s wypływu zarówno w poziomie na wysokości $h = 1,5$ m, jak również $h = 0,5$ m wystąpiło zagęszczenie piasku (rys.5). Wzrost zagęszczenia wynosił na wysokości $h=1,5$ m w przybliżeniu około 10%, natomiast na wysokości $h = 0,5$ m około 5% wartości zagęszczenia początkowego. Przy ścianach nie wystąpiły żadne zmiany objętościowe; od chwili rozpoczęcia opróżniania do chwili zakończenia wypływu. Po 4 s wypływu na wysokości $h = 1,5$ m w środku silosu nastąpił wzrost zagęszczenia materiału o około

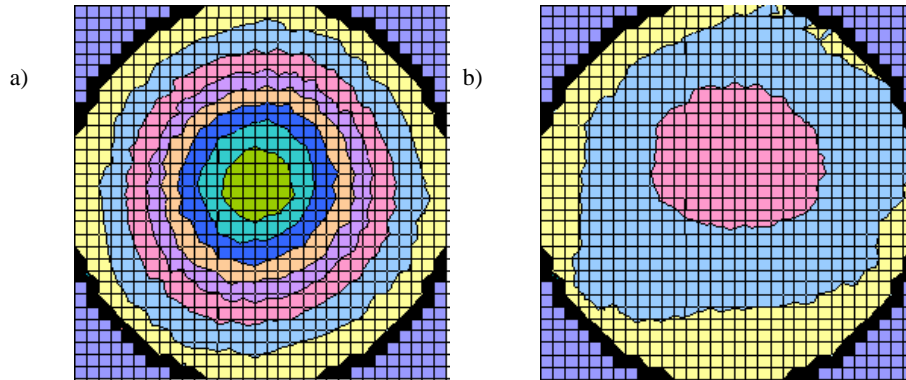
35% w stosunku do zagęszczenia początkowego (rys. 6a), natomiast na wysokości $h = 0,5$ m wzrost ten był mniejszy i wynosił około 10% (rys. 6b). Po 7,0 s wypływu na wysokości $h = 0,5$ m materiał w rdzeniu przepływu kominowego był bardziej zagęszczony o 10% w porównaniu do zagęszczenia początkowego (rys. 7a), natomiast po 14,0 s wypływu był bardziej zagęszczony o 15% w porównaniu do zagęszczenia początkowego (rys. 7b). Szerokość strefy ścinania w materiale przy ścianie wynosiła 20 mm ($25 \times d_{50}$) i była jednakowa na całej wysokości silosu.

Dla ścian szorstkich i piasku zagęszczonego po rozpoczęciu opróżniania silosu, zarówno na wysokości $h = 1,5$ m, jak i $h = 0,5$ m, materiał przy ścianach rozluźnił się o około 5% w porównaniu do stanu wyjściowego (rys. 8). Po 4 s wypływu na wysokości $h = 1,5$ m w środku silosu nastąpił wzrost zagęszczenia materiału o około 20% w stosunku do zagęszczenia początkowego, natomiast na wysokości $h = 0,5$ m wzrost wynosił około 15%. Po 7 s wypływu na wysokości $h = 0,5$ m materiał w rdzeniu przepływu kominowego był bardziej zagęszczony o 10% w porównaniu do zagęszczenia początkowego (rys. 9a). Szerokość rdzenia przepływu kominowego w końcowej fazie opróżniania była podobna jak dla piasku luźnego. Po 14 s wypływu w rdzeniu przepływu kominowego wystąpił wzrost zagęszczenia piasku o około 20%, natomiast przy ścianach rozluźnienie piasku było nadal mniejsze o około 5% w porównaniu do stanu początkowego (rys. 9b). Szerokość strefy ścinania przy ścianie była mniejsza niż w piasku luźnym i wynosiła około 15 mm ($19 \times d_{50}$).



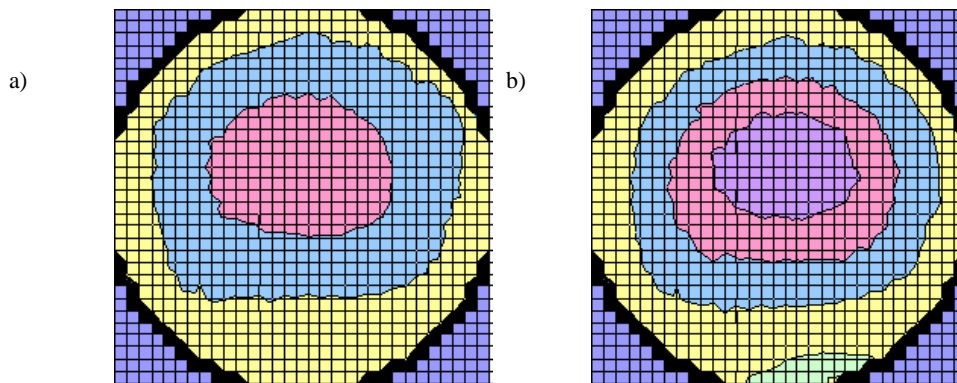
Rys. 5. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami szorstkimi na wysokości: a) $h = 1,5$ m, b) $h = 0,5$ m po 1 s opróżniania (piasek luźny)

Fig. 5. Distribution of bulk solid density in the silo with rough walls at: a) $h = 1.5$ m, b) $h = 0.5$ m after 1 s of discharge (loose sand)



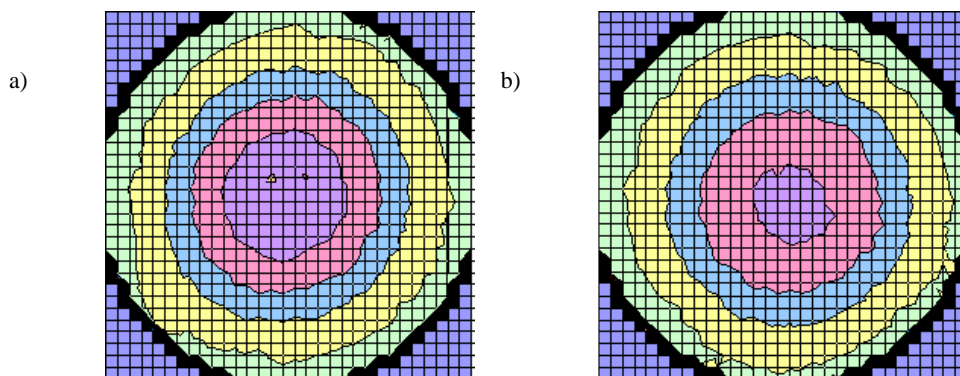
Rys. 6. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami szorstkimi na wysokości: a) $h = 1,5$ m, b) $h = 0,5$ m po 4 s opróżniania (piasek luźny)

Fig. 6. Distribution of bulk solid density in the silo with rough walls at: a) $h = 1.5$ m, b) $h = 0.5$ m after 4 s of discharge (loose sand)



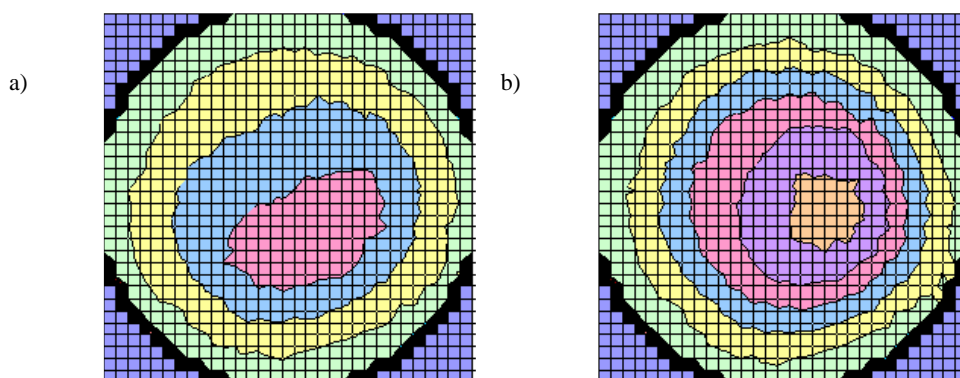
Rys. 7. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami szorstkimi na wysokości $h = 0,5$ m po: a) 7 s, b) 14 s opróżniania (piasek luźny)

Fig. 7. Distribution of bulk solid density in the silo with rough walls at $h = 0.5$ m after: a) 7 s, b) 14 s of discharge (loose sand)



Rys. 8. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami szorstkimi na wysokości: a) $h = 1,5$ m, b) $h = 0,5$ m po 1 s opróżniania (piasek zagęszczony)

Fig. 8. Distribution of bulk solid density in the silo with rough walls at: a) $h = 1.5$ m, b) $h = 0.5$ m after 1 s of discharge (dense sand)



Rys. 9. Rozkład zagęszczenia materiału sypkiego w silosie ze ścianami szorstkimi na wysokości $h = 0,5$ m po: a) 7 s, b) 14 s opróżniania (piasek zagęszczony)

Fig. 9. Distribution of bulk solid density in the silo with rough walls at $h = 0,5$ m after: a) 7 s, b) 14 s of discharge (dense sand)

WNIOSKI

1. Zastosowanie tomografii pojemnościowej do badań modelowych pozwala na określenie zmian zagęszczenia materiału sypkiego w czasie wypływu z silosu. Zaletą tej metody jest stosunkowo niski koszt badań, łatwość stosowania i aplikacji oraz co najważniejsze, bezinwazyjny charakter pomiaru zmian zagęszczenia. Aktualnie prowadzone są prace nad zastosowaniem tej metody pomiarowej do analizy przepływów w silosach w skali naturalnej.

2. Wpływ szorstkości ścian i początkowego zagęszczenia materiału sypkiego jest znaczący na zmiany zagęszczenia podczas wypływu silosowego.
3. Rdzeń przepływu kominowego nad otworem wylotowym tworzy się stopniowo podczas procesu opróżniania silosu.
4. W czasie przepływu masowego w górnej części silosu materiał zagęszcza się w środku silosu niezależnie od szorstkości i początkowego wskaźnika porowatości.
5. W rdzeniu przepływu kominowego przy ścianach szorstkich materiał zagęszcza się, a dla ścian gładkich rozluźnia. Zwiększenie zagęszczenia początkowego materiału sypkiego powoduje zarówno zmniejszenie jego rozluźnienia (ściany gładkie), jak również wzrost zagęszczenia (ściany szorstkie) w rdzeniu przepływu kominowego.
6. Szerokość strefy ścinania w piasku przy ścianach szorstkich jest znacznie większa niż przy ścianach gładkich. W przypadku ścian szorstkich strefa ścinania jest szersza dla piasku luźnego niż zagęszczonego. Dla piasku zagęszczonego materiał rozluźnia się w strefie ścinania, a dla piasku luźnego materiał nie zmienia swojej objętości.

PIŚMIENNICTWO

1. **Niedostatkiwicz M.:** Efekty dynamiczne w silosach. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003.
2. **Niedostatkiwicz M., Chaniecki Z., Tejchman J.:** Zastosowanie tomografii do pomiaru zmian zagęszczenia materiałów sypkich w silosach. International Workshop „Simulations in civil engineering” organised by Centre for Urban Construction and Rehabilitation CURE, Gdańsk, 137-140, 2004.
3. **Chaniecki Z.:** Analiza danych i optymalizacja czasu ich przetwarzania w systemie pojemnościowej tomografii procesowej. X Konferencja “Sieci i Systemy Informatyczne”, Łódź, t.2, 631-642, 2002.
4. **Chaniecki Z., Dyakowski T., Sankowski D.:** Zastosowanie tomografii procesowej w diagnostyce procesów. Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka, Kraków, t.7, z. 3, 565-575, 2003.

Pomiary tomograficzne przeprowadzone zostały we współpracy z Politechniką Łódzką (prof. D. Sankowski i prof. T. Dyakowski) oraz Politechniką Warszawską (dr R. Szabatin i dr W. Smolik).

APPLICATION OF ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY
FOR MEASUREMENT OF CHANGES OF BULK SOLID DENSITY
IN THE PROCESS OF SILO DISCHARGE

Maciej Niedostatkiwicz¹, Zbigniew Chaniecki², Jacek Tejchman¹

¹Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

²Faculty of Electrotechnic i Electronic, Technical University of Łódź
Aleja Politechniki 11, 90-924 Łódź

Abstract. The objective of this paper is to present results of measurements of granular materials density changes during dynamic silo discharge using Electrical Capacitance Tomography. Tomography allows to observe the behaviour of bulk solid density in horizontal cross-section during silo discharge, especially in the zone near the silo wall. The tests were carried out using 12-electrode sensors with a factor of length to silo diameter equal to 1. The sensors were located outside of the cylindrical silo model made of perspex at 2 different levels. The silo model was supported by a non-deformable steel frame. During the experiments, dry sand was used with various initial densities. The influence of the outlet diameter and wall roughness on the results was also investigated.

Key words: bulk solids, dynamic effects, bulk density, tomography