

ZASTOSOWANIE METODY PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)
DO OPISU PROCESU OPRÓŻNIANIA SILOSU

Maciej Niedostatkiewicz

Katedra Podstaw Budownictwa i Inżynierii Materiałowej,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych zmian zachodzących w materiale sypkim podczas opróżniania silosu. Pomiarów dokonano dla przyściennej warstwy piasku przemieszczającej się w silosie z przepływem masowym oraz kominowym. Doświadczenia przeprowadzono dla zróżnicowanego zagęszczenia początkowego materiału sypkiego oraz zmiennej szorstkości ścian. Zwrócono uwagę na możliwość obserwacji lokalizacji odkształceń powstających w materiale sypkim w czasie opróżniania silosu.

Słowa kluczowe: PIV, silos, korelacja, materiał sypki, zagęszczenie

WSTĘP

Popularną techniką, szczególnie przydatną dla badań nad przepływem materiałów w stanie ciekłym lub przepływu materiałów sypkich prowadzoną z wykorzystaniem kamery CCD jest tzw. metoda *laserowego noża świetlnego* (Barker i Fourney 1976, Adrian 1991). W technice tej pomiar dokonywany jest najczęściej przez oświetlenie strumienia materiału wąskim pasmem światła lasera i rejestrację rozproszonego bądź absorbowanego światła przez aparat czy kamerę cyfrową. Światło lasera jest rozpraszane przez cząstki przepływającego medium, co pozwala na zarejestrowanie obrazów rozkładu natężenia światła rozproszonego przez poruszający się materiał. Technika ta wykorzystywana jest do generowania obrazów, których analiza pozwala obliczyć między innymi pole rozkładu prędkości przepływu. Metoda ta nazywana jest anemometrią obrazową i znana pod techniczną nazwą PIV (Particle Image Velocimetry) (Kadambi i in. 2001, Scarano i Riethmuller 1999).

Anemometria obrazowa jest jednak często utożsamiana z metodą śledzenia ruchu i rozpoznawania poszczególnych cząstek materiału znaną pod nazwą PTV (Particle Tracking Velocimetry). Powszechnie dla techniki tej stosowana jest również nazwa PIV. Odmianą metody PTV (PIV) jest cyfrowa anemometria obrazowa z wykorzystaniem cząstek znacznikowych znana pod nazwą DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) która pozwala na znalezienie wektorów prędkości przepływającego materiału metodą korelację obrazów (Soria 1996, Kowalewski i inni 2001, Suchecki 2001). Analiza, której podlegają otrzymane obrazy umożliwia znalezienie przemieszczeń cząstek między kolejnymi rejestracjami obrazu. W metodach PIV, PTV oraz DPIV stosowane są techniki korelacyjne (Belmont i Jardon 2000) oparte na rozkładzie jasności oraz na śledzeniu wzorca rozkładu cząstek w obrazie podstawowym i kolejnych obrazach.

Metoda PIV stosowana była dotychczas, oprócz wielu innych zastosowań również do identyfikacji lokalizacji odkształceń w materiałach sypkich (DeJong i inni 2006) podczas testów w różnych aparatach geotechnicznych: w aparacie dwuosowego ściskania (Kohse 2002), w modelu z wertykalną mobilną ścianą (Nubel 2002), w aparacie z wyciąganą wertykalną płytą (Słominski 2003, Słominski i inni 2006, 2007) oraz w modelu ze ścianą oporową (Niedostatkiwicz i inni 2010). Metoda PIV znalazła również zastosowanie w analizie przebiegu procesu zarówno grawitacyjnego, jak również kontrolowanego opróżniania silosu (Sielamowicz i inni 2005, Słominski i inni 2006, 2007).

Wyznaczenie pola rozkładu prędkości w bezkohezyjnym materiale sypkim w wypływającym z małego modelu silosu z zastosowaniem metody PIV było przedmiotem prac prowadzonych między innymi przez Buick i inni (2004, 2005) oraz Sielamowicz i inni (2005). Eksperymenty badawcze w dużym modelu silosu zawierającym granulaty polimerowe przeprowadzone zostały z zastosowaniem metody PIV przez Ostendorf i Schwedes (2005).

Niedostatkiwicz i Tejchman (2005), Niedostatkiwicz i inni (2006) oraz Słominski i inni (2006, 2007) zastosowali eksperymentalnie metodę PIV do analizy lokalizacji odkształceń w silosie z przepływem masowym oraz kominowym. Porównali oni wyniki wyznaczonych zmian objętościowych w silosie prostokątnym uzyskane z zastosowaniem metody PIV z wynikami zmian koncentracji otrzymanymi podczas doświadczeń z zastosowaniem metody Rtg (promieniowanie rentgenowskie). Uzyskane w czasie doświadczeń wyniki stanowiły materiał porównawczy do analizy zgodności wyników z otrzymanymi podczas eksperymentów z zastosowaniem bezinwazyjnej metody pomiarowej ECT (Niedostatkiwicz i inni 2009).



Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników zastosowania metody PIV do opisu odkształceń w wypływającym z silosu materiale sypkim. Analizę odkształceń postaciowych oraz objętościowych wypływającego materiału sypkiego przeprowadzono dla przypadku silosu z przepływem masowym oraz kominowym, opróżnianych grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany. Uwzględniono zróżnicowany stopień zagęszczenia początkowego materiału sypkiego, jak również zmienną szorstkość ścian.

METODA PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

W przypadku metody PIV dwie funkcje mają decydujące znaczenie w analizie obrazu: a) funkcja intensywności (jasności) pola obrazu oraz b) funkcja korelacji. Pierwsza z funkcji wyznacza dla każdego punktu wartość skalara która odpowiada intensywności światła w przestrzeni fizycznej. Format *.bmp występujący w skali szarości jest najbardziej odpowiednim formatem do rejestracji danych w celu ich dalszej analizy. W przypadku popularnych zdjęć 8-bitowych skala szarości określona jest wartościami pomiędzy 0 (*pełna czerń*) a 255 (*czysta biel*). Na wykonanym zdjęciu wyznaczany jest obszar zainteresowania (*Area of Interest-AOI*), a następnie określone są podobszary przeszukiwań (*interogation cells*), których wymiar wnosi zazwyczaj od 8×8 pikseli do 64×64 piksele. Jeżeli przemieszczenia zarejestrowane na dwóch następujących po sobie zdjęciach są małe wówczas podobszary przeszukiwań nie zmieniają swoich własności (nie ulegają deformacji, a jedynie przemieszczają się względem siebie). Płaszczyzna deformacji jest wyznaczana poprzez porównanie dwóch wykonanych w systemie poklatkowym zdjęć. W celu określenia lokalnego przemieszczenia pomiędzy zdjęciem nr 1 a zdjęciem nr 2 pole przeszukiwań jest wyznaczane na podstawie zdjęcia nr 2. Właściwa wartość lokalnego wektora przemieszczenia dla każdego podobszaru przeszukiwań jest wyznaczana poprzez zastosowanie funkcji korelacji (Michalowski i Shi 2003) pomiędzy dwoma odcieniami jasności występującymi na zdjęciach cyfrowych:

$$R(\Delta x, \Delta y) = R(s) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) I_2(x + \Delta x, y + \Delta y), \quad (1)$$

gdzie:

R – wartość korelacji (lokalnego wektora przemieszczenia),

x, y – współrzędne na zdjęciu nr 1,

$\Delta x, \Delta y$ – przyrost przemieszczenia pomiędzy zdjęciem nr 1 a zdjęciem nr 2,

I_1, I_2 – intensywność (jasność) podobszarów przeszukiwań na zdjęciach nr 1 i nr 2,

N – liczba współrzędnych dla poszczególnych podobszarów przeszukiwań.



Funkcja korelacji krzyżowej oblicza możliwe przesunięcie podobszaru przeszukiwań poprzez powiązanie (korelacje) wszystkich wartości odcieni szarości ze zdjęcia pierwszego ze wszystkimi odcieniami szarości ze zdjęcia drugiego. Funkcja korelacji krzyżowej jest najbardziej rozpowszechnioną funkcją korelacyjną, możliwe jest jednak stosowanie innych funkcji korelacyjnych (Rechenmacher i Finno 2004).

Pojedynczy wektor przemieszczenia jest obliczany dla pojedynczego podobszaru przeszukiwań – jest to wektor uśrednionych przemieszczeń dla wszystkich cząstek występujących w podobszarze przeszukiwań. Operacja korelacji określona w równaniu (1) może być prowadzona również w dziedzinie częstotliwości z zastosowaniem Szybkiej Transformaty Fouriera (Fast Fourier Transformate-FFT) do każdego z obszarów analizy, zamiast numerycznych operacji realizowanych w dziedzinie czasu (Smith 1997).

Wynik korelacji krzyżowej pomiędzy dwoma zdjęciami jest uzyskiwany w postaci odwróconej macierzy FFT. Procedura jest kontynuowana poprzez zastępowanie jednego obrazu kolejnym obrazem, co w konsekwencji umożliwia uzyskanie obrazu przemieszczenia próbki w czasie. Metoda PIV opiera się na opisie elementów przy użyciu współrzędnych Eulera z zastosowaniem niezależnych współrzędnych $u_t(x, y)$. Czas operacji korelacji z zastosowaniem FFT jest proporcjonalny do wyrażenia $L^2 \times \log_2(L)$ dla zdjęcia o wymiarach $L \times L$ (Smith 1997).

W kolejnym kroku obliczeniowym względne przemieszczenia zamieniane są na przemieszczenia w opisie we współrzędnych Lagrange'a, podające całkowite przemieszczenie układu w odniesieniu do początkowej konfiguracji. Operacja ta wykonywana jest poprzez zastosowanie interpolacji liniowej (Nubel 2002), gdzie deformacja węzła w zdeformowanej siatce jest wyznaczona jako:

$$u(m, n) = \omega_1 u_t(i, j) + \omega_2 u_t(i+1, j) + \omega_3 u_t(i, j+1) + \omega_4 u_t(i+1, j+1), \quad (2)$$

gdzie:

ω_i – liniowe współczynniki zależne od położenia węzłów $u(m, n)$ w siatce,

u_t – aktualne względne przemieszczenia analizowanej siatki.

Wektor odkształcenia $[E] = \{\varepsilon_{11} \varepsilon_{21} \varepsilon_{12} \varepsilon_{22}\}^T$ jest obliczany z zastosowaniem macierzy odkształceń $[B]$ stosowanej w Metodzie Elementów Skończonych

$$[E] = [B][u], \quad (3)$$

gdzie $[u] = (u_1^{(1)} u_2^{(1)} u_1^{(2)} u_2^{(2)} u_1^{(3)} u_2^{(3)} u_1^{(4)} u_2^{(4)})^T$ jest wektorem przemieszczenia.

Stosowany w metodzie PIV 4-węzłowy element skończony opisany jest macierzą:

$$[B] = \begin{bmatrix} N_{,1}^{(1)} & 0 & N_{,1}^{(2)} & 0 & N_{,1}^{(3)} & 0 & N_{,1}^{(4)} & 0 \\ 0 & N_{,2}^{(1)} & 0 & N_{,2}^{(2)} & 0 & N_{,2}^{(3)} & 0 & N_{,2}^{(4)} \\ N_{,2}^{(1)} & N_{,1}^{(1)} & N_{,2}^{(2)} & N_{,1}^{(2)} & N_{,2}^{(3)} & N_{,1}^{(3)} & N_{,2}^{(4)} & N_{,1}^{(4)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie: $N_{,j}^{(i)}$ – częściowa pochodna funkcji kształtu związana z węzłem i w odniesieniu do osi x_j .

Odształcenia objętościowe ε_v i odształcenia postaciowe ε_p wyznaczone są jako:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_{ij}^* \varepsilon_{ij}^*}, \quad \varepsilon^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}, \quad (5)$$

gdzie: ε_{ij}^* – tensor odształceń, ε_{kk} – tensor odształceń, δ_{ij} – delta Kroneckera.

STANOWISKO BADAWCZE

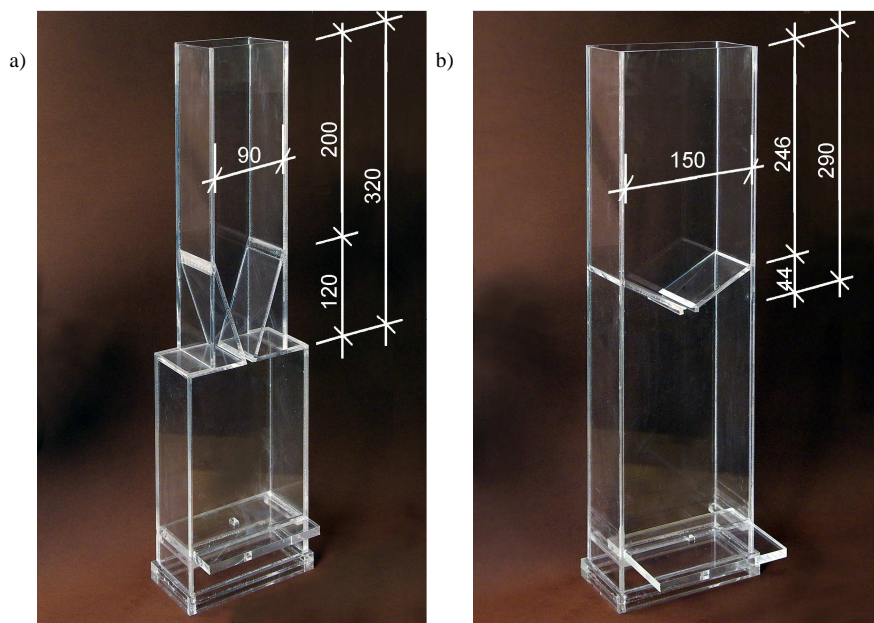
Badania modelowe zostały przeprowadzone dla prostokątnych modeli silosu: z przepływem masowym oraz z przepływem kominowym. Silosy składały się z części równoległej oraz z leja. Zarówno w przypadku silosu z przepływem masowym, jak również kominowym leje były graniastosłupowe. Wysokość silosu z przepływem masowym wynosiła $h = 0,32$ m, szerokość $b = 0,09$ m, natomiast głębokość $d = 0,07$ m. Wymiary silosu z przepływem masowym wynosiły odpowiednio $h = 0,29$ m, $b = 0,15$ m, $d = 0,07$ m. Grubość ścian modelu wynosiła $t = 0,008$ m zarówno dla przypadku silosu z przepływem masowym, jak również z przepływem kominowym.

Opróżnianie silosów odbywało się grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany. W przypadku opróżniania grawitacyjnego silosów wypływ odbywał się przez otwór listowy o szerokości $s = 0,0005$ m wykonany na całej głębokości modeli, prostopadłe do szerszej ściany modeli (rys. 1). W przypadku wypływu kontrolowanego opróżnianie odbywało się poprzez otwór listowy do zbiornika (zasobnika) poniżej silosu który posiadał w dolnej części otwór prostokątny o wymiarach $0,008 \times 0,022$ mm.

Zarówno dla wypływu grawitacyjnego, jak również dla wypływu kontrolowanego doświadczenia przeprowadzono dla przypadku materiału sypkiego w stanie luźnym oraz zagęszczonym. Doświadczenia przeprowadzono z piaskiem średnioziarnistym ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm. Materiał w stanie luźnym ($\gamma = 14,15$ kN·m⁻³, $e_o = 0,87$) uzyskano poprzez napełnianie przez rurę



ustawioną bezpośrednio nad materiałem sypkim i podnoszoną sukcesywnie w miarę napełniania modelu. Materiał w stanie zagęszczonym uzyskano stosując napełnianie metodą *deszczu rozproszonego* (przez sito umieszczone na stałe na górze silosu) ($\gamma = 7,0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $e_o = 0,56$).



Rys. 1. Model silosu do badań przepływu: a) masowego, b) kominowego
Fig. 1. Silo model with: a) mass flow, b) funnel flow

Doświadczenia przeprowadzono dla ścian gładkich oraz bardzo szorstkich. Podwyższenie szorstkości ściany uzyskano poprzez wyklejenie wewnętrznej części silosu papierem ściernym 60 ($r_w \approx d_{50}$). Podwyższenie ścian wykonano zarówno wzdłuż ścian części równoległej silosu, jak również wzdłuż ścian w leju. Doświadczenia ze ścianami szorstkimi wykonano zarówno dla przypadku przepływu masowego, jak również kominowego.

Każdy z eksperymentów badawczych powtarzany był 2 razy, niezależnie od sposobu zagęszczenia początkowego materiału sypkiego jak również niezależnie od stopnia szorstkości ściany oraz rodzaju wypływu. Wszystkie eksperymenty badawcze przeprowadzone zostały w klimatyzowanym pomieszczeniu laboratoryjnym o stałej temperaturze powietrza 18-20°C i wilgotności względnej nie przekraczającej 65%.

Do wykonania zdjęć podczas doświadczeń zastosowano przemysłową kamerę fotograficzną o rozdzielczości 1280×960 pixeli. Zdjęcia były zapisywane w formacie *.bmp. Obszar analizy (AOI) został wyznaczony doświadczalnie, na podstawie wstępnych wyników badań. Wielkość AOI była zróżnicowana dla doświadczeń w modelu silosu z przepływem masowym i wynosiła $\approx 0,09 \times 0,2 \text{ m}^2$. Dla przypadku modelu z przepływem kominowym wielkość AOI wynosiła $\approx 0,15 \times 0,2 \text{ m}^2$. Obszary przeszukiwań (interrogation cell) na podstawie wstępnie przeprowadzonych analiz zostały określone jako obszary o wymiarach 64×64 piksele przy założeniu przesunięcia środka obszaru przeszukiwań pomiędzy jednym a drugim zdjęciem o 12 pikseli. W przypadku doświadczeń z kamerą fotograficzną zdjęcia wykonywane były w sposób kontynuacyjny (ciągła projekcja kamery przemysłowej) z częstotliwością 40 klatek na sekundę ($\Delta t = 0,025 \text{ s}$). W czasie doświadczeń zarówno kamera fotograficzna, jak również aparat fotograficzny ustawione były w odległości $s = 0,5 \text{ m}$ od stanowiska badawczego. W celu wyeliminowania efektu cienia modele oświetlane były 300W lampami żarowymi ustawionymi w odległości 1,2 m pod kątem 45° . W czasie doświadczeń nie stosowano w żadnym z aparatów rejestrujących filtrów polaryzujących. Ze względu na dużą rozdzielczość uzyskanych zdjęć (1280×960) nie stwierdzono występowania tzw. *efektu kompresji wstecznej*.

WYNIKI BADAŃ

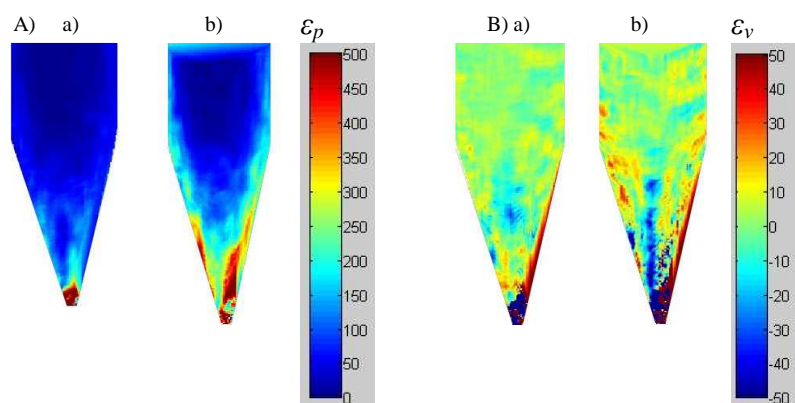
Wartości odkształceń, jednakowe dla wszystkich analizowanych przypadków wyznaczone w skali kolorów dołączone zostały do wykresów. Wzrost koncentracji materiału sypkiego (kontraktancja) oznaczony został znakiem (+), natomiast zmniejszenie koncentracji materiału sypkiego (dylatancja) oznaczona została znakiem (-). Skala liczbowa została dołączona do skali kolorów.

Przepływ masowy

W czasie przepływu masowego piasku luźnego w silosie ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano pojawienia się lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania wzdłuż ścian w części równoległej silosu. Nie stwierdzono również występowania łukowatych lokalizacji w leju. Zarówno w fazie początkowej, jak również podczas przepływu zaawansowanego na podstawie odkształceń postaciowych ε_p widoczne były deformacje materiału sypkiego w leju (rys. 2A). Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono występowanie na ścianach leja w czasie przepływu zaawansowanego lokalnej kontraktancji



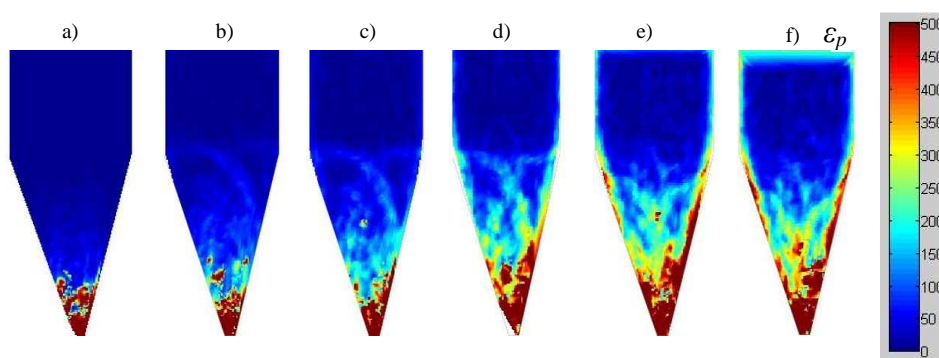
materiału, w środku lejka wytworzył się kanał przepływu w którym występowała wyraźna dylatacja piasku (rys. 2B).



Rys. 2. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (A) oraz objętościowych ε_v (B) w luźnym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 5 s (wyptyw grawitacyjny)

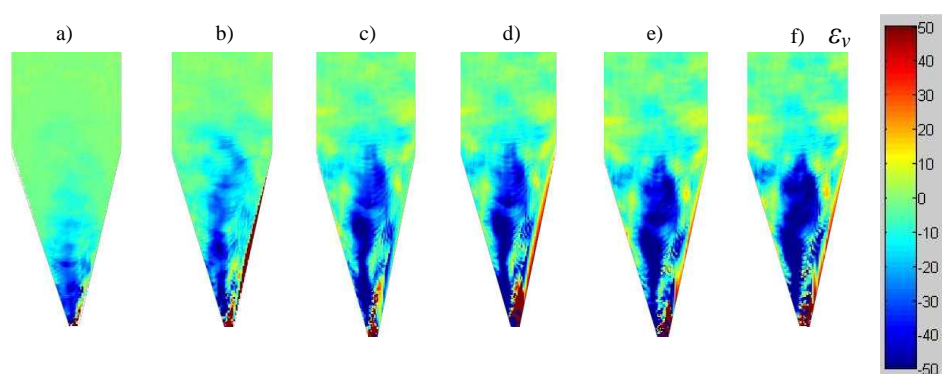
Fig. 2. Evolution of the deviatoric strain ε_p (A) and volumetric strain ε_v (B) in loose sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 1 s, b) 5 s (gravitational emptying)

Zwiększenie zagęszczenia początkowego materiału sypkiego wpłynęło na zmianę mechanizmu przepływu. Od początku opróżniania silosu na podstawie odkształceń postaciowych ε_p zaobserwowano powstające bezpośrednio nad lejem symetryczne linie lokalizacji, które propagowały ku górze, krzyżując i przenikając się wzajemnie (rys. 3). Lokalizacje docierały do ścian lejka i odbijały się od nich. Lokalizacje zanikały w przepływającym materiale sypkim w chwili dotarcia do miejsca przejścia części równoległej silosu w lej. Wyznaczona szerokość lokalizacji odkształceń wzdłuż ścian równoległych silosu w czasie zaawansowanego przepływu materiału sypkiego wynosiła $t_p = 8$ mm ($10 \times d_{50}$). Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono, że dylatacja w kanale przepływu była większa niż w przypadku doświadczeń z piaskiem luźnym (rys. 4). Nie zaobserwowano występowania na ścianach lejka w czasie przepływu zaawansowanego lokalnej kontraktacji materiału, zagęszczony materiał ulegał jedynie dylatacji. Wzdłuż ścian w części równoległej silosu widoczna była naprzemienna dylatacja i kontraktacja materiału sypkiego z wyraźną przewagą dylatacji.



Rys. 3. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (wyływ grawitacyjny)

Fig. 3. Evolution of the deviatoric strain ε_p in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (gravitational emptying)

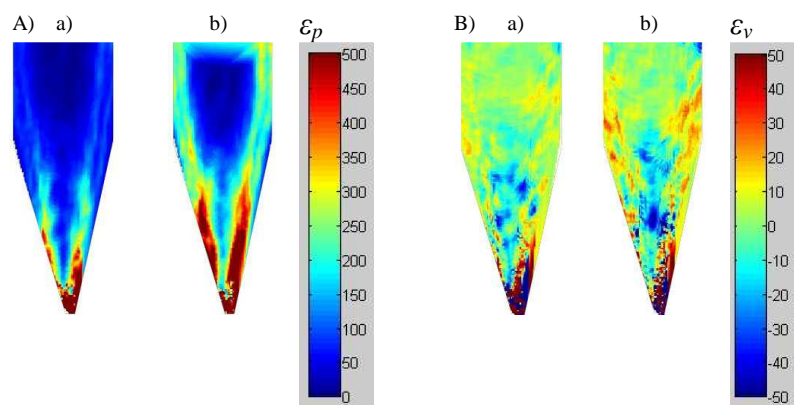


Rys. 4. Zmiana odkształceń objętościowych ε_v w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (wyływ grawitacyjny)

Fig. 4. Evolution of the volumetric strain ε_v in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (gravitational emptying)

W czasie przepływu masowego piasku luźnego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi materiał w leju ulegał intensywnej dylatacji bezpośrednio od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu. Podobnie jak w przypadku doświadczeń ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano powstawania łukowatych lokalizacji propagujących z leja w kierunku części silosu ze ścianami równoległymi. Na podstawie odkształceń postaciowych ε_p widoczne były wyraźne lokalizacje

odkształceń w postaci stref ścinania zarówno wzdłuż ścian w części równoległej silosu, jak również w leju (rys. 5A). Szerokość lokalizacji wzdłuż ścian części równoległej silosu wynosiła $t_p = 18 \text{ mm}$ ($22 \times d_{50}$) i była w praktyce stała w czasie przepływu zaawansowanego. Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono występowanie na ścianach leja w czasie przepływu zaawansowanego kontraktancji materiału, podobnie jak miało to miejsce dla przypadku ścian gładkich, natomiast wzdłuż ścian w części równoległej silosu widoczna była strefa ścinania w postaci pasma z naprzemienną kontraktancją i dylatacją (rys. 5B). W leju oraz w dolnej partii części równoległej silosu widoczny był kanał przepływu z wyraźną dylatacją materiału.

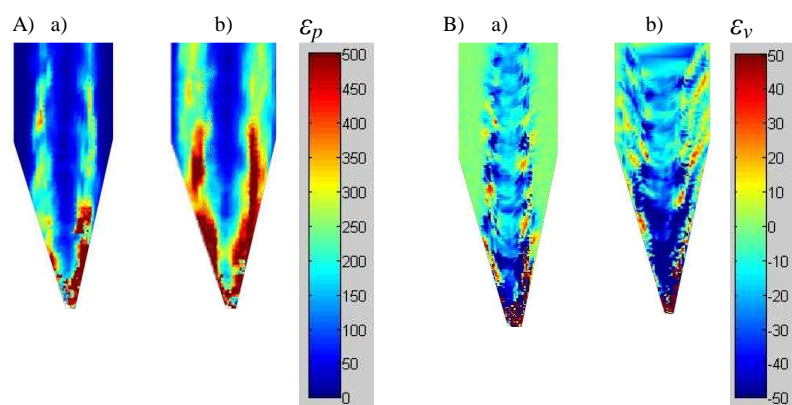


Rys. 5. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (A) oraz objętościowych ε_v (B) w luźnym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8 \text{ mm}$ w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 5 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 5. Evolution of the deviatoric strain ε_p (A) and volumetric strain ε_v (B) in loose sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8 \text{ mm}$ in a silo with very rough walls and mass flow at: a) 1 s, b) 5 s (gravitational emptying)

W czasie przepływu masowego piasku zagęszczonego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi bezpośrednio od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu wytworzył się kanał przepływu. Na podstawie odkształceń postaciowych ε_p nie zaobserwowano powstających nad lejem symetrycznych, przenikających się linii lokalizacji, jak miało to miejsce w przypadku doświadczeń z piaskiem zagęszczonym i ścianami gładkimi (rys. 6A). Wyznaczona szerokość lokalizacji odkształceń wzdłuż ścian równoległych silosu w czasie zaawansowanego przepływu materiału sypkiego wynosiła $t_p = 14 \text{ mm}$ ($17 \times d_{50}$). Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono, że dylatacja w kanale przepływu była większa niż w przypadku doświadczeń z piaskiem luźnym (rys. 6B). Na ścianach leja nie występowała kontraktacja materiału, zagęszczony materiał

ulegał jedynie intensywnej dylatacji. Wzdłuż ścian w części równoległej silosu widoczna była bardzo wyraźna strefa ścinania charakteryzująca się naprzemienną dylatacją i kontrakcją materiału sypkiego z wyraźną przewagą dylatacji.



Rys. 6. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (A) oraz objętościowych ε_v (B) w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 5 s (wyptyw grawitacyjny)

Fig. 6. Evolution of the deviatoric strain ε_p (A) and volumetric strain ε_v (B) in compacted sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with very rough walls and mass flow at: a) 1 s, b) 5 s (gravitational emptying)

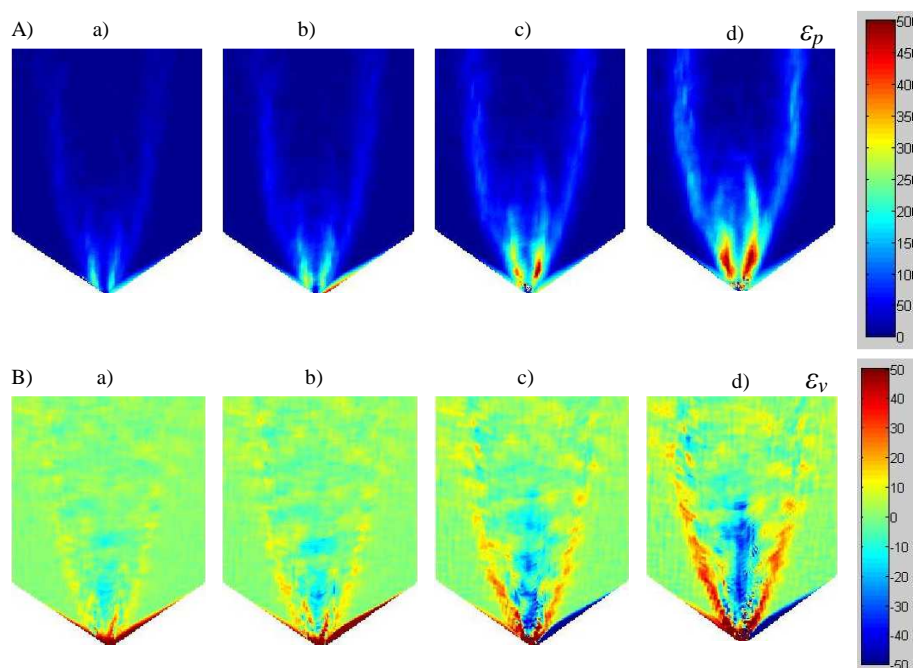
Zmiana prędkości wyptywu poprzez wprowadzenie wyptywu kontrolowanego nie wpłynęła na zmianę kształtu i szerokości lokalizacji odkształceń: zarówno wzdłuż ścian części równoległej silosu, jak również w leju dla przypadku ścian gładkich i bardzo szorstkich.

Przeptyw kominowy

Dla przepływu kominowego doświadczenia przeprowadzone zostały dla przypadku materiału sypkiego w stanie luźnym i zagęszczonym. Niezależnie od zagęszczenia początkowego doświadczenia przeprowadzone zostały dla ścian gładkich oraz bardzo szorstkich. Podobnie jak w przypadku doświadczeń z przepływem masowym podwyższenie szorstkości ścian wykonano zarówno w części równoległej silosu, jak również w leju. Badania wykonano dla wyptywu grawitacyjnego.

W czasie przepływu kominowego piasku luźnego w silosie ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano pojawienia się lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania wzdłuż ścian w części równoległej silosu ze względu nie przemieszczanie się spoczywającego przy ścianach materiału sypkiego i tworzenie się tzw. *stref martwych*. Szerokość kanału w czasie przepływu zaawansowanego wyznaczona na pod-

stawie odkształceń postaciowych ε_p wynosiła ≈ 108 mm ($135 \times d_{50}$) (rys. 7A). Największe zmiany postaciowe występowały bezpośrednio nad otworem wylotowym oraz wzdłuż styku kanału przepływu oraz *stref martwych*. Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono występowanie kontraktancji rozlewnego w kanale przepływu piasku wzdłuż styku kanału przepływu oraz nieruchomych *stref martwych* (rys. 7B). W końcowej fazie opróżniania kąt pochylenia kanału przepływu wnosił $\approx 58^\circ$.

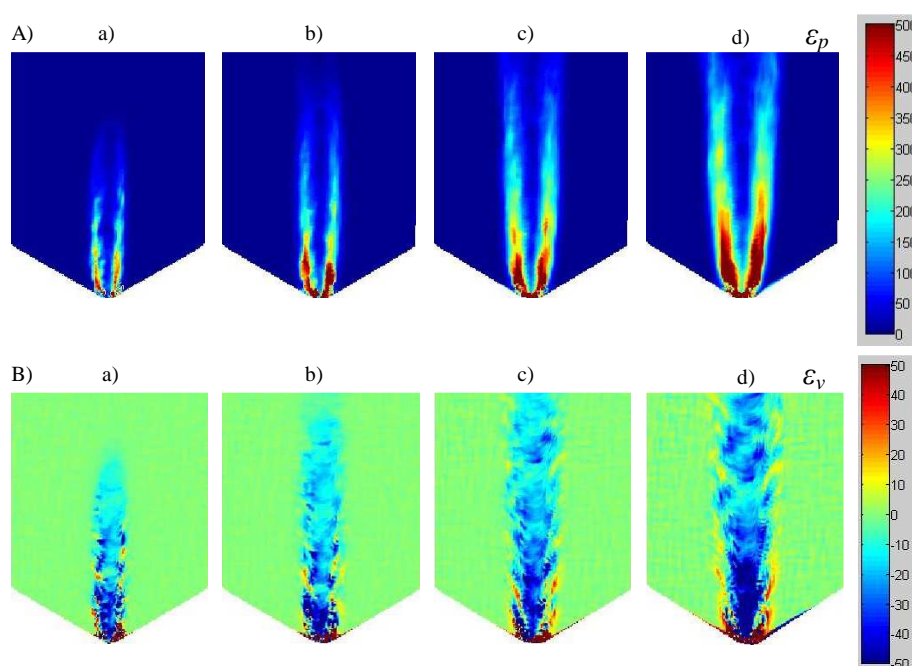


Rys. 7. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (A) oraz objętościowych ε_v (B) w luźnym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem kominowym: a) 2 s, b) 3 s, c) 5 s, d) 7 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 7. Evolution of the deviatoric strain ε_p (A) and volumetric strain ε_v (B) in loose sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with smooth walls and funnel flow at: a) 2 s, b) 3 s, c) 5 s, d) 7 s (gravitational emptying)

Zwiększenie zagęszczenia początkowego materiału sypkiego wpłynęło w sposób istotny na zmniejszenie szerokości kanału przepływu. Szerokość kanału w czasie przepływu zaawansowanego wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p wynosiła ≈ 80 mm ($100 \times d_{50}$) (rys. 8A). Największe zmiany postaciowe występowały bezpośrednio nad otworem wylotowym, a zakres ich występowania był wyższy niż w przypadku doświadczeń z piaskiem w stanie luźnym. Na podstawie wizualizacji odkształceń objętościowych ε_v stwierdzono

występowanie mniejszej kontraktancji rozluźnionego w kanale przepływu piasku wzdłuż styku kanału przepływu oraz nieruchomych *stref martwych* (rys. 8B). Przyczyną tej sytuacji był fakt większego zagęszczenia początkowego piasku i ograniczona możliwość wzrostu kontraktancji. W końcowej fazie opróżniania kąt pochylenia kanału przepływu wnosił $\approx 82^\circ$.



Rys. 8. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (A) oraz objętościowych ε_v (B) w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem kominowym: a) 2 s, b) 3 s, c) 5 s, d) 7 s (wyptyw grawitacyjny)

Fig. 8. Evolution of the deviatoric strain ε_p (A) and volumetric strain ε_v (B) in compacted sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with smooth walls and funnel flow at: a) 2 s, b) 3 s, c) 5 s, d) 7 s (gravitational emptying)

W czasie przepływu kominowego piasku luźnego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi materiał sypki zachowywał się podobnie jak w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi. Zakres, kształt oraz wielkość lokalizacji wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p , jak również rozwój lokalizacji wyznaczony na podstawie odkształceń objętościowych ε_v były bardzo zbliżone do obserwowanych w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi. Wzdłuż kanału przepływu widoczna była kontraktancja materiału sypkiego. Podwyż-

szenie szorstkości ścian nie wpłynęło na zmianę szerokości kanału przepływu oraz pochylenia kanału przepływu.

W czasie przepływu kominowego piasku zagęszczonego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi zachowanie materiału sypkiego było zbliżone do opisanego w przypadku doświadczeń ze ścianami gładkimi. Wzrost szorstkości ścian nie spowodował zmiany szerokości kanału przepływu, w czasie przepływu zaawansowanego wystąpił jednak brak symetrii przepływu. Zakres oraz wielkość lokalizacji wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p oraz odkształceń objętościowych ε_v były bardzo zbliżone do obserwowanych w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi. Widoczny wzdłuż kanału przepływu niesymetryczny wzrost kontraktancji materiału sypkiego spowodowany był zakrzywieniem kanału przepływu – wzrost kontraktancji miał miejsce od strony wewnętrznej zakrzywionego kanału przepływu.

W czasie przepływu kominowego piasku zagęszczonego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi zachowanie materiału sypkiego było zbliżone do opisanego w przypadku doświadczeń ze ścianami gładkimi. Wzrost szorstkości ścian nie spowodował zmiany szerokości kanału przepływu, w czasie przepływu zaawansowanego wystąpił jednak brak symetrii przepływu. Zakres oraz wielkość lokalizacji wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p oraz odkształceń objętościowych ε_v były bardzo zbliżone do obserwowanych w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi. Widoczny wzdłuż kanału przepływu niesymetryczny wzrost kontraktancji materiału sypkiego spowodowany był zakrzywieniem kanału przepływu – wzrost kontraktancji miał miejsce od strony wewnętrznej zakrzywionego kanału przepływu.

WNIOSKI

1. W początkowej fazie opróżniania silosu dystrybucja odkształceń postaciowych ε_p oraz odkształceń objętościowych ε_v jest jednakowa, niezależnie od stopnia zagęszczenia początkowego materiału.

2. Wzrost braku symetrii występuje w piasku zagęszczonym w czasie zaawansowanego przepływu niezależnie od szorstkości ścian, zarówno dla przepływu masowego, jak również dla przepływu kominowego.

2. W przypadku przepływu masowego szerokość lokalizacji odkształceń w postaci przyściennej strefy ścinania wzrasta wraz ze wzrostem szorstkości ścian i zmniejszeniem zagęszczenia początkowego materiału sypkiego.

3. W przypadku przepływu kominowego szerokość kanału przepływu maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia początkowego materiału sypkiego.



4. Za celowe uznaje się kontynuację badań i rozszerzenie programu o doświadczenia z materiałami sypkimi pochodzenia organicznego, jak również z materiałami sypkimi kohezyjnymi.

PIŚMIENNICTWO

- Adrian R.J., 1991. Particle imaging technique for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, 23, 261-304.
- Barker D.B., Fourney M.E., 1976. Displacement Measurements in the Interior of 3-d Bodies Using Scattered light Speckle Pattern. *Journal of Experimental Mechanics*, 16, (6), 209-214.
- Belmont M.R., Jardon S.P.V., 2000. Generalised cross-correlation function for engineering applications. Application to experimental data. *Experiments in Fluids* 29, 461-467.
- Buick J.M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z., Ooi J.Y, Pankaj D.M, Cambell D.M, Greated C.A., 2005. Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 131, 3, 299-307.
- Buick J.M., Pankai Y, Ooi J.Y, Chavez-Sagarnaga J., Pearce A., Houghton G., 2004. Motion of granular particles on the wall of a model silo and the associated wall vibrations. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, 2751-2760.
- DeJong J.T., White D.J., Randolph M.F., 2006. Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry. *Soils and Foundations*, 46, 1, 15-28.
- Kadambi J.R., Martin W.T., Amirthaganesh S., Wernet M.P., 2001. Particle sizing using Particle Imaging Velocimetry for two-phase flows. *Powder Technology*, 100, 251-259.
- Kohse W.C., 2002. Experimentell Untersuchung von Scherfugenmustern in Granulaten, Diplomarbeit, Institute for Soil and Rock Mechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, 1-42.
- Kowalewski T.A., Cybulski A., Rebow M., 1998. Particle image velocimetry and thermometry in freezing water. *Proceedings of 8th International Symposium On Flow Visualization*, 24.1.-24.8.
- Michalowski R.L., Shi L., 2003. Strain localization and periodic fluctuations in granular flow processes from hoppers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 6, 439-449.
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2007. Investigations of porosity changes during granular silo flow using Electrical Capacitance Tomography (ECT) and Particle Image Velocimetry (PIV). *Particle & Particle Systems Characterization*, 24, 4-5, 304-312.
- Niedostatkiewicz M., Leśniewska D., Tejchman J., 2010. Experimental analysis of shear zone patterns in sand during earth pressure problems using Particle Image Velocimetry. Strain, (in print).
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2005. Application of a Particle Image Velocimetry technique for deformation measurements of bulk solids during silo flow. *Powder Handling & Processing*, 17, 4, 216-220.
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., Grudzień K., Chaniecki Z., 2009. Application of ECT to solid concentration measurements during granular flow in a rectangular model silo. *Chemical Engineering Research and Design*, (<http://doi.org/10.1016dx./j.cherd.2010.01.034>).
- Nübel K., 2002. Experimental and numerical investigation of shear localisation in granular materials. *Publication Series of the Institute of Soil and Rock Mechanics, University Karlsruhe, Karlsruhe*, 62.
- Ostendorf M., Schwedes J., 2005. Application of Particle Image Velocimetry for velocity measurements during silo discharge. *Powder Technology*, 158, 69-75.



- Rechenmacher A.L., Finno R.J., 2004. Digital image correlation to evaluate shear banding in dilative sands. *Geotechnical Testing Journal*, 27, 1, 13-22.
- Scarano F., Riethmuller M.L., 1999. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. *Experiments in Fluids*, 26, 6, 513-523.
- Sielamowicz I., Kowalewski T., Błoński S., 2005. Application of digital particle image velocimetry in registrations of central and eccentric granular material flows. *Proceedings of International Conference Powder and Grains 2005*, 903-908.
- Slominski C., 2003. Experimental investigation of shear localization using a PIV method. Internal Report of the Institute for Rock- and Soil Mechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe.
- Slominski C., Niedostatkiwicz M., Tejchman J., 2006. Deformation measurements in granular bodies using a Particle Image Velocimetry technique. *Archives of Hydro-and Environmental Engineering*, 53, 1, 71-94.
- Slominski C., Niedostatkiwicz M., Tejchman J., 2007. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. *Powder Technology*, 173, 1, 1-18.
- Smith I., 1972. Stress and strain in a sand adjacent to a model wall. PhD Thesis. University of Cambridge, Cambridge.
- Soria J., 1996. An Investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross-correlation Particle Image Velocimetry technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5, 221-233.

APPLICATION OF THE PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY) METHOD TO DESCRIBE SILO EMPTYING PROCESS

Maciej Niedostatkiwicz

Department of Fundamental of Building and Material Engineering,
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

Abstract. The paper presents the results of experiments concerned with the deformations of a bulk solid during the silo emptying process. Measurements with application of the PIV (Particle Image Velocimetry) technique were performed, both in the case of a silo with mass flow and one with funnel flow. Tests were performed for different initial conditions: density and wall roughness. During the experiments only the part of the bulk solid near the silo wall was taken into account; internal displacement of the bulk solid did not influence the experiments results. Localizations along the silo walls and created at the width of the silo at the flowing material were detected and described. The thickness of the localisations in the form of shear zones was discussed.

Key words: PIV, silos, correlation, bulk solid, initial density

