

WPŁYW GEOMETRII I SZORSTKOŚCI ŚCIAN NA WIELKOŚĆ NAPORU MATERIAŁU SYPKIEGO NA DNO SILOSU

Maciej Niedostatkiewicz

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych obciążenia dna smukłego silosu płaskodennego podczas procesu jego opróżniania. Doświadczenia przeprowadzono dla różnych przypadków będących odzwierciedleniem zróżnicowanych rozwiązań technologicznych (zmiana zagęszczenia początkowego materiału sypkiego) oraz technicznych (podwyższona szorstkość ścian, zmiana proporcji silosu) stosowanych w silosach w skali naturalnej. Podjęto próbę oceny wpływu zwiększania szorstkości ścian na rozkład naporu w smukłym silosie cylindrycznym.

Słowa kluczowe: silos, przepływ kontrolowany, obciążenie dna, zagęszczenie początkowe, smukłość

WSTĘP

Opis rzeczywistego rozkładu naporu materiału sypkiego w silosie jest zagadnieniem złożonym ze względu na jego rozdrobniony charakter. W celu oceny stopnia bezpieczeństwa konstrukcji oraz bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji silosowej (Niedostatkiewicz i Normant 2006) niezbędna jest znajomość rozkładu naporu nie tylko na ściany, lecz również na dno silosu (Theimer 1969). Zagadnienie to jest szczególnie istotnym w przypadku silosów smukłych, podczas opróżniania których powstają silne efekty dynamiczne (Nielsen i Ruckenbrod 1988, Tejchman i Gudehus 1993, Wensrich 2002, Niedostatkiewicz i Tejchman 2003, Wilde i inni 2007, Rucka i in. 2007, Niedostatkiewicz i Tejchman 2008, Niedostatkiewicz 2008). Silosy w skali naturalnej podlegają bardzo często modernizacji, w tym zmianom które można podzielić na dwie grupy: do pierwszej zaliczyć można zmiany związane z technologią eksploatacji, do drugiej zmiany związane z rozwiązaniami technicznymi samej

konstrukcji silosu (płaszcz oraz konstrukcji wsporczej). W opisanych w artykule przeprowadzonych doświadczeniach zmiany procesu technologicznego zasymulowane zostały poprzez zmianę zagęszczenia początkowego materiału sypkiego, natomiast zmiany techniczne uwzględniono poprzez zmianę szorstkości ścian oraz zmianę proporcji silosu (zmniejszenie wysokości w stosunku do stałej średnicy).

W artykule przedstawiono wyniki pomiaru naporu pionowego piasku σ_B na dno silosu płaskodennego. Pomimo wykonanych wcześniej licznych eksperymentów badawczych (Pieper 1969, Kamiński 1986, Munch-Andersen i Nielsen 1990, Horabik 1994) polegających na pomiarze naporu na dno zbiorników zawierających różne materiały sypkie brak jest do chwili obecnej doświadczeń które by w sposób kompleksowy analizowały wpływ parametrów zmiennych (Niedostatkiwicz i Tejchman 2008). Ponadto większości ze zrealizowanych dotychczas doświadczeń nie przeprowadzono dla przypadku smukłego silosu cylindrycznego.

W przepływach materiałów sypkich możemy wyróżnić dwa podstawowe przypadki: przepływ szybki oraz przepływ wolny, bądź bardzo wolny określany jako quasi-statyczny. Podczas przepływów szybkich materiał sypki zachowuje się jak gaz. Przyrosty odkształceń oraz siły bezwładności są bardzo duże, a ziarna przepływającego materiału sypkiego tracą kontakt ze sobą. Naprężenia wewnętrzne powstają zarówno w wyniku działania sił tarcia i sił normalnych między ziarnami, ale także jako następstwo kolizji między ziarnami. Straty energii są więc duże, ponieważ kolizje mają charakter plastyczny. Podczas przepływów bardzo wolnych określanych jako quasi-statyczne materiał sypki zachowuje się jak materiał ciągły. Przyrosty odkształceń są stosunkowo małe, ziarna materiału sypkiego pozostają w stałym kontakcie ze sobą, a naprężenia wewnętrzne powstają w wyniku działania sił tarcia i sił normalnych pomiędzy ziarnami. W ten sposób straty energii wskutek tarcia między ziarnami są małe w porównaniu do strat podczas przepływów szybkich. Osobną grupę przepływów stanowią przepływy pośrednie (przejściowe) podczas których materiał zachowuje się jak gęsty płyn. Dla tego rodzaju przepływów czynnikiem determinującym zachowanie materiału jest jego lepkość. Podczas opróżniania silosu w przepływającym materiale sypkim występują zazwyczaj wszystkie trzy typy przepływu: przy wylocie z silosu materiał jest w obszarze przepływu szybkiego, natomiast powyżej w obszarze przepływu wolnego, bądź bardzo wolnego. Taka sytuacja ma miejsce zazwyczaj podczas przepływów grawitacyjnych, w przypadku przepływów kontrolowanych obszar przepływu szybkiego jest zdecydowanie mniejszy niż w przypadku przepływów grawitacyjnych.

Celem artykułu jest wykazanie wpływu parametrów zmiennych takich jak prędkość opróżniania, zagęszczenie początkowe, szorstkość ścian oraz smukłość silosu na rozkład naporu materiału sypkiego na płaskodenne dno silosu podczas przepływu kontrolowanego. Szczególny nacisk położono na wpływ szorstkości ścian i smukłości zbiornika na obciążenie dna. Warunki prowadzenia eksperymentów były zbliżone



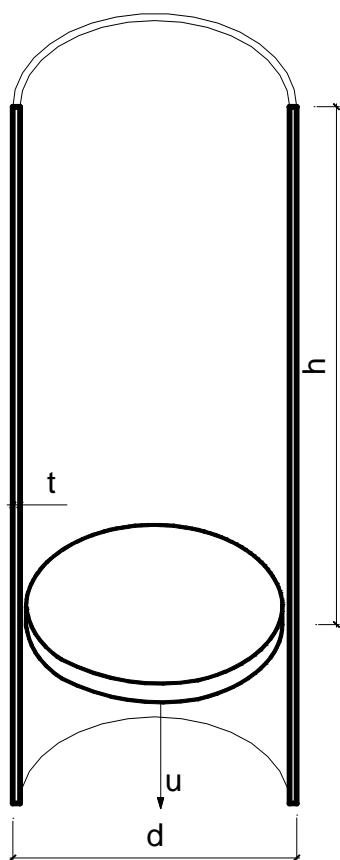
do sposobu opróżniania silosów w skali naturalnej w których wypływ materiału sypkiego jest kontrolowany poprzez służbę obrotową. Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku piasku bezkohezyjnego w smukłym silosie którego proporcje są zbliżone do zbiorników spotykanych w przemyśle chemicznym oraz agrofizyce. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych zastosowane zostaną do kalibracji stałych materiałowych wykorzystywanych w obliczeniach numerycznych dla przepływów wolnych, traktujących materiał sypki jako continuum. Ponadto znajomość rozkładu naporu pionowego na dno silosu jest zagadnieniem kluczowym dla wyjaśnienia mechanizmu powstawania silnych efektów dynamicznych występujących podczas opróżniania silosów smukłych.

STANOWISKO BADAWCZE

Pomiary wykonane zostały w cylindrycznym modelu silosu z pleksiglasu (średnica $d = 0,2$ m, grubość ściany $t = 0,005$ m) posadowionym na ramie stalowej. Wysokość modelu była zmienna $h = 2,0, 1,0$ oraz $0,5$ m. Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku wypływu kontrolowanego-płaskodenne dno silosu o średnicy równej średnicy wewnętrznej silosu przemieszczało się pionowo w dół z prędkościami: $v = 0,05$ oraz $0,5$ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ określonymi jako prędkości bardzo wolne (quasi-statyczne) (zakres przemieszczenia dna: $u = 50$ mm) oraz $v = 5,0$ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ określoną jako prędkość mała (zakres przemieszczenia: $u = 200$ mm). Dla przypadku wcześniej przeprowadzonych doświadczeń z wypływem kontrolowanym minimalna prędkość opróżniania silosu ze ścianami gładkimi wynosiła $v = 0,005$ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast prędkość maksymalna wynosiła $v = 10,0$ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. W przypadku doświadczeń z przepływem grawitacyjnym prędkość opróżniania silosu była 10-krotnie większa i wynosiła ≈ 100 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (dla przypadku średnicy otworu wylotowego $d_0 = 0,07$ m) (Niedostatkiwicz i Tejchman 2003, 2008, Niedostatkiwicz 2008).

Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku ścian gładkich, szorstkich oraz bardzo szorstkich. Jako materiał sypki zastosowano piasek średnioziarnisty (tzw. piasek „Rybaki”, ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 1,0$ mm i współczynnikiem uziarnienia $U = 5,1$). Ponadto do doświadczeń użyto piasku drobnoziarnistego (tzw. piasek „Sobieszewo”, ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,3$ mm i współczynnikiem uziarnienia $U = 5,4$) oraz granulatu polimerowego o ziarnach cylindrycznych ($d = 0,003$ m, $h = 0,005$ m). Zwiększenie szorstkości ściany uzyskano poprzez wyklejenie wewnętrznej poboczniczy silosu papierem ściernym: „40”- dla przypadku ścian szorstkich ($r_w \approx 1/2 \times d_{50}$) oraz „16”- dla przypadku ścian bardzo szorstkich ($r_w \approx d_{50}$). Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku materiału sypkiego w stanie luźnym (napełnianie przez lej umieszczony nad górną częścią silosu) i zagęszczonym (napełnianie przez sito o oczkach 4×4 mm umieszczone na wysokości $0,20$ m nad silosem).

Dla przypadku ścian gładkich zagęszczenie początkowe w stanie luźnym wynosiło $\gamma = 15,04 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ (początkowy wskaźnik porowatości $e_o = 0,74$), natomiast w stanie zagęszczonym $\gamma = 16,20 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, ($e_o = 0,61$). Dla przypadku podwyższonej szorstkości ścian zagęszczenia początkowe wnoszą odpowiednio: $\gamma = 14,97 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ($e_o = 0,75$) i $\gamma = 16,07 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ($e_o = 0,63$) (ściany szorstkie) oraz $\gamma = 14,88 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ($e_o = 0,76$) i $\gamma = 15,97 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ($e_o = 0,64$) (ściany bardzo szorstkie).



Rys. 1. Schemat przepływu kontrolowanego materiału sypkiego w silosie
Fig. 1. Controlled flow of bulk solid in silo (schematically)

W czasie doświadczeń wyznaczono wartość naporu pionowego na dno silosu σ_B zarówno w czasie napełniania, jak również w czasie opróżniania silosu. Napór pomierzono przy pomocy siłomierza mechanicznego (belki tensometrycznej) zamontowanej poniżej przemieszczającego się pionowo dna silosu. Częstotliwość próbkowania sygnału pomiarowego wynosiła 500 pomiarów/s (Niedostatkiwicz 2008).

Wyznaczona w ramach każdego z eksperymentów wartość naporu pionowego na dno silosu σ_B identyfikowana była jako 1 mezurand (Siedow 1969, Praca zbiorowa 2003). Niepewność mezurandu obliczono metodą A, tj. za pomocą analizy statystycznej serii wyników (Praca zbiorowa 2003). Wynik pomiaru podano w postaci przedziału, w którym z określonym prawdopodobieństwem (poziomym ufności) znajdowała się prawdziwa wartość mierzona. Promień tego przedziału oznaczono jako niepewność pomiaru. Przyjęto, że najbliższym przybliżeniem mezurandu jest wartość średnia z serii, a niepewność obliczana jest jako iloczyn tzw. współczynnika rozszerzenia k_a (zależnego od poziomu ufności) i niepewności standardowej, obliczanej jako pierwiastek z wariancji serii pomiarów. Współczynnik rozszerzenia k_a wynika z rozkładu zmiennej losowej.

Ze względu na czas trwania oraz ilość eksperymentów, wykonano serię 4 pomiarów dla każdego typoszeregu badań. Założono brak występowania tzw. błędów systematycznych, uznając wyniki surowe za wyniki poprawione. Jednocześnie przyję-

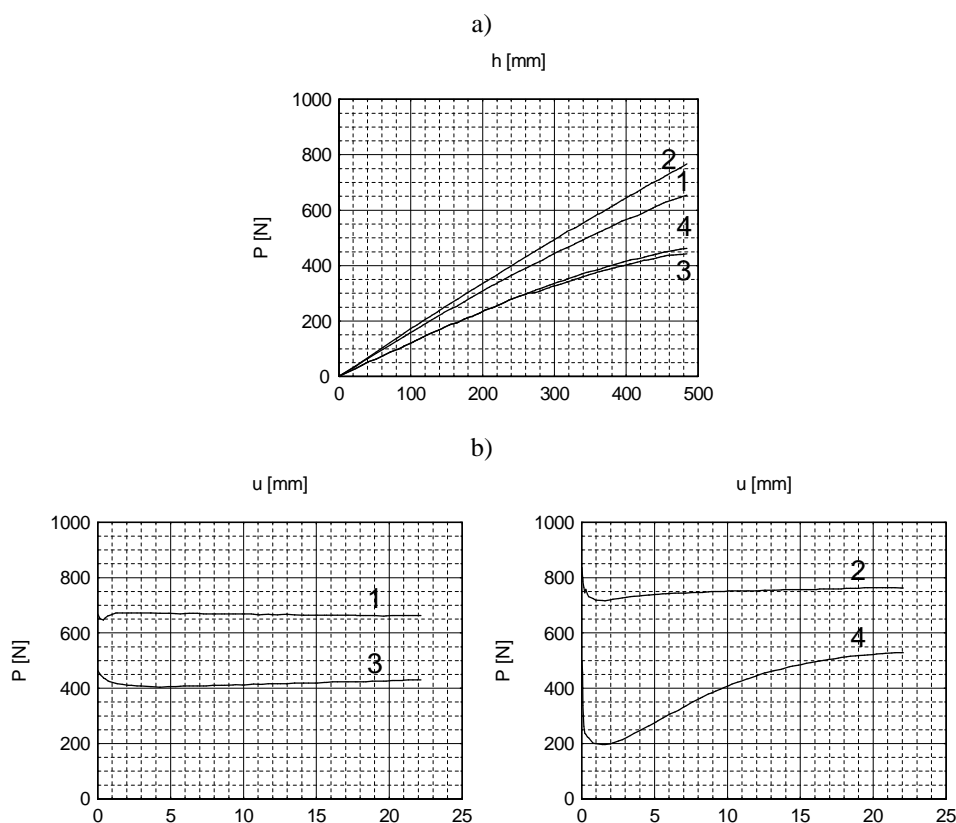
to, że tzw. *błędy grube* nie zostały popełnione. Dla wykonanych serii pomiarowych, w celu określenia współczynnika $k\alpha$, zamiast rozkładu Gaussa wykorzystano tzw. rozkład t-Studenta. Ilość stopni swobody serii 4-pomiarowej wynosiła $\nu = 4 - 1 = 3$, tak więc dla założonego poziomu ufności na poziomie $p\alpha = 95\%$, współczynnik rozszerzenia wynosił $k\alpha = 2,74$ (Praca zbiorowa 2003, Niedostatkiwicz 2008). Wszystkie eksperymenty badawcze wykonano przy zachowaniu stałej temperatury w pomieszczeniu 20°C oraz wilgotności względnej 50% .

WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZENIA W SILOSIE PROSTOKĄTNYM

Wpływ zagęszczenia początkowego, wpływ szorstkości ścian ($h = 0,5$ m)

Doświadczenia przeprowadzone przez Tejchmana (1989) wykonane zostały w modelu silosu prostokątnego o wysokości $h = 0,50$ m, głębokości $g = 0,60$ m i zmiennej szerokości $b = 0,10-0,30$ m. W czasie badań silos opróżniany był ze stałą prędkością $v = 0,001$ mm·s⁻¹. Doświadczenia przeprowadzono dla piasku luźnego ($\gamma = 14,45$ kN·m⁻³, $e_o = 0,81$) oraz zagęszczonego ($\gamma = 16,75$ kN·m⁻³, $e_o = 0,56$), dla przypadku ścian gładkich, szorstkich oraz bardzo szorstkich. W czasie badań pomierzono wartości wypadkowej siły pionowej działającej na dno silosu P , wypadkowej siły tarcia T oraz wypadkowej siły normalnej na ściany silosu N . Pomiary wykonano dla stanu napełnienia oraz opróżniania silosu.

Wyniki doświadczeń dla silosu o szerokości $b = 0,20$ m oraz ścian gładkich i bardzo szorstkich pokazały, że wartość obciążenia na dno silosu zasadniczo wzrasta wraz z zagęszczeniem początkowym materiału. Dla ścian gładkich wartość siły po napełnieniu silosu dla piasku zagęszczonego była $\approx 18,55\%$ większa od wartości obciążenia dla piasku w stanie luźnym (rys. 2a). Dla ścian bardzo szorstkich pomierzone wartości sił pionowych obciążających dno w stanie napełniania były mniejsze niż dla ścian gładkich. Dla piasku zagęszczonego wartość siły P była jedynie $\approx 2,39\%$ większa od wartości obciążenia dla piasku w stanie luźnym. Bezpośrednio po rozpoczęciu opróżniania silosu nastąpiło odciążenie dna: dla ścian gładkich zmniejszenie wartości obciążenia dna w porównaniu do wartości w stanie spoczynkowym wynosiło odpowiednio dla piasku zagęszczonego $\approx 9,32\%$, natomiast dla piasku luźnego $\approx 1,65\%$ (rys. 2b). Dla przypadku ścian bardzo szorstkich zmniejszenie siły pionowej pomierzonej w dnie wynosiło odpowiednio dla piasku zagęszczonego $\approx 57,54\%$ oraz dla piasku luźnego $\approx 22,02\%$. Duży spadek wartości obciążenia dna w czasie opróżniania w przypadku doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi spowodowany był zjawiskiem zawieszenia się przepływającego materiału na bardzo szorstkiej ścianie silosu. Wartości siły P pomierzone w stanie rezydualnym były bardzo zbliżone do wartości wyznaczonych po napełnieniu silosu.



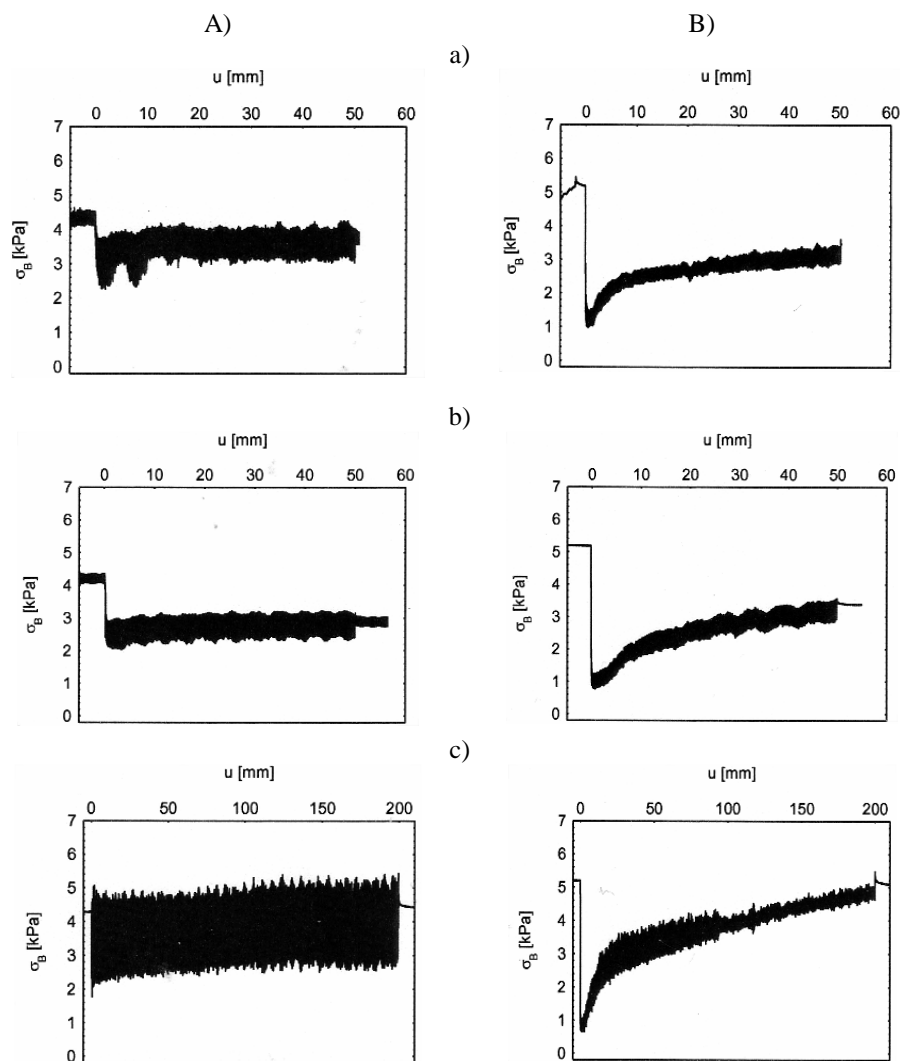
Rys. 2. Pomierzona siła pionowa P na dno silosu o wysokości $h = 0,5$ m: a) napełnianie, b) opróżnianie; 1) piasek luźny, ściana gładka, 2) piasek zagęszczony, ściana gładka, 3) piasek luźny, ściana bardzo szorstka, 4) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka ($v = 0,001 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$)

Fig. 2. Measured vertical bottom loads P of silo with $h = 0.5$ m: a) filling state, b) emptying state; 1) loose sand, smooth wall, 2) dense sand, smooth wall, 3) loose sand, very rough wall, 4) dense sand, very rough wall ($v = 0.001 \text{ mm s}^{-1}$, $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$)

DOŚWIADCZENIA W SILOSIE CYLINDRYCZNYM

Wpływ zagęszczenia początkowego i prędkości opróżniania ($h = 2,0$ m)

Doświadczenia w silosie o wysokości $h = 2,0$ m przeprowadzono dla przypadku obniżania płaskodennego dna silosu z prędkościami: $v = 0,05$ oraz $0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ określonymi jako prędkości bardzo wolne (quasi-statyczne) (zakres przemieszczenia dna: $u = 50 \text{ mm}$) oraz $v = 5,0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ określoną jako prędkość mała (zakres przemieszczenia: $u = 200 \text{ mm}$).



Rys. 3. Napór pionowy σ_B na dno silosu o wysokości $h = 2,0$ m pomierzony dla różnych prędkości opróżniania: A) piasek luźny, B) piasek zagęszczony: a) $v = 0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm), b) $v = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm) oraz c) $v = 5,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (zakres przemieszczenia dna $u = 200$ mm) ($d_{50} = 0,8$ mm, ściana gładka)

Fig. 3. Vertical bottom pressure σ_B of the silo with $h = 2,0$ m measured for different outlet velocities: A) loose sand, B) dense sand: a) $v = 0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (range of the bottom displacement $u = 50$ mm), b) $v = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (range of bottom displacement $u = 50$ mm) and c) $v = 5,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (range of bottom displacement $u = 200$ mm) ($d_{50} = 0,8$ mm, smooth wall)

Po napełnieniu silosu dla ścian gładkich wartość pomierzonego naporu pionowego σ_B na dno silosu dla przypadku piasku luźnego wynosiła 4,28 kPa, natomiast dla piasku zagęszczonego była $\approx 20,79\%$ wyższa niż dla piasku luźnego i wynosiła 5,17 kPa. Zależności pomiędzy zagęszczeniem początkowym materiału oraz pionowym naporem na dno silosu były identyczne jak w przypadku doświadczeń z prostokątnym modelem silosu (Tejchman 1989). Podobnie jak miało to miejsce we wcześniejszych badaniach z modelem prostokątnym bezpośrednio w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu nastąpiło chwilowe odciążenie dna.

Wyniki pomiarów pokazały, że wielkość zmian naporu pionowego σ_B na dno płaskodennego silosu smukłego o ścianach gładkich w czasie jego opróżniania w sposób istotny zależy od zagęszczenia początkowego materiały sypkiego (rys. 3). Wartość spadku naporu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości opróżniania dla materiału wstępnie luźnego, natomiast dla przypadku materiału w stanie zagęszczonym jest w praktyce stała. Wielkość amplitud oscylacji naporu pionowego na dno silosu w czasie jego opróżniania wzrasta wraz ze wzrostem prędkości opróżniania. Dla przypadku piasku luźnego wzrost wielkości amplitud jest szybszy niż dla piasku w stanie zagęszczonym. Wartość naporu pionowego na dno silosu w stanie rezydualnym jest zbliżona do wartości w stanie początkowym dla przypadku opróżniania silosu z małymi prędkościami ($v \geq 1,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). W przypadku opróżniania quasi-statycznego ($v < 1,0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) wartość w stanie rezydualnym była mniejsza niż w stanie początkowym, dla piasku zagęszczonego różnice te są były większe niż dla piasku luźnego.

Wpływ zagęszczenia początkowego i szorstkości ścian ($h = 2,0 \text{ m}$)

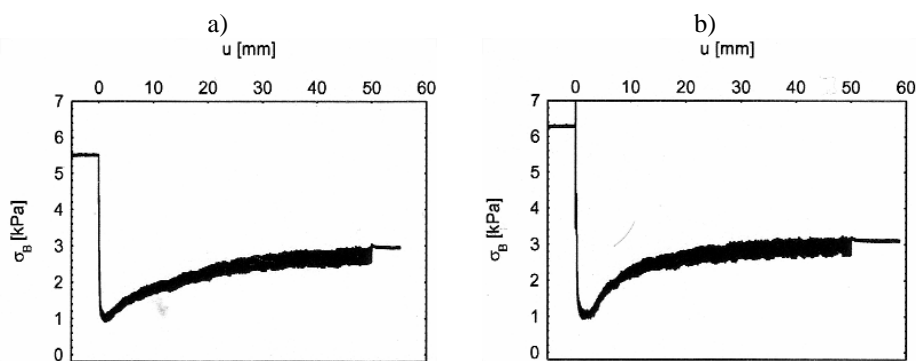
Doświadczenia w silosie o wysokości $h = 2,0 \text{ m}$ ze ścianami szorstkimi oraz bardzo szorstkimi przeprowadzono dla przypadku obniżania płaskodennego dna silosu z prędkością $v = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ jako prędkością reprezentatywną dla przepływów quasi-statycznych określonych jako prędkości bardzo wolne.

Po napełnieniu silosu dla ścian bardzo szorstkich (papier ścierny „16”) wartość pomierzonego naporu pionowego σ_B na dno silosu dla przypadku piasku luźnego wynosiła 5,50 kPa, natomiast dla piasku zagęszczonego wynosiła 6,29 kPa (rys. 4). Wartości te były większe od wartości pomierzonych dla ściany gładkiej odpowiednio o $\approx 28,50\%$ oraz o $\approx 21,66\%$.

Wyniki pomiarów w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi pokazały, że zależności pomiędzy zagęszczeniem początkowym materiału oraz naporem pionowym σ_B na dno silosu nie są zgodne z zależnościami wyznaczonymi doświadczalnie przez Tejchmana (1989). Dla silosu o wysokości $h = 2,0 \text{ m}$ charakteryzującego się smukłością 10 ($h/d = 2,0/0,2$) materiał sypki zachowywał się zupełnie inaczej niż w krępy silosie prostokątnym. Prawdopodobną przyczyną



wzrostu naporu podczas doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi była mobilizacja materiału sypkiego wzdłuż ścian silosu. Zjawisko to było niezależne od sposobu napełniania silosu.



Rys. 4. Napór pionowy σ_B na dno silosu o wysokości $h = 2,0$ m pomierzony dla prędkości opróżniania $v = 0,5$ mm: a) piasek luźny, b) piasek zagęszczony (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,8$ mm, ściana bardzo szorstka)

Fig. 4. Vertical bottom pressure σ_B of the silo with $h = 2,0$ m measured for outlet velocity $v = 0,5$ mm, a) loose sand, b) dense sand (range of bottom displacement $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,8$ mm, very rough wall)

Wpływ smukłości, zagęszczenia początkowego i szorstkości ścian ($h = 1,0$ m, $r_w \approx d_{50}$)

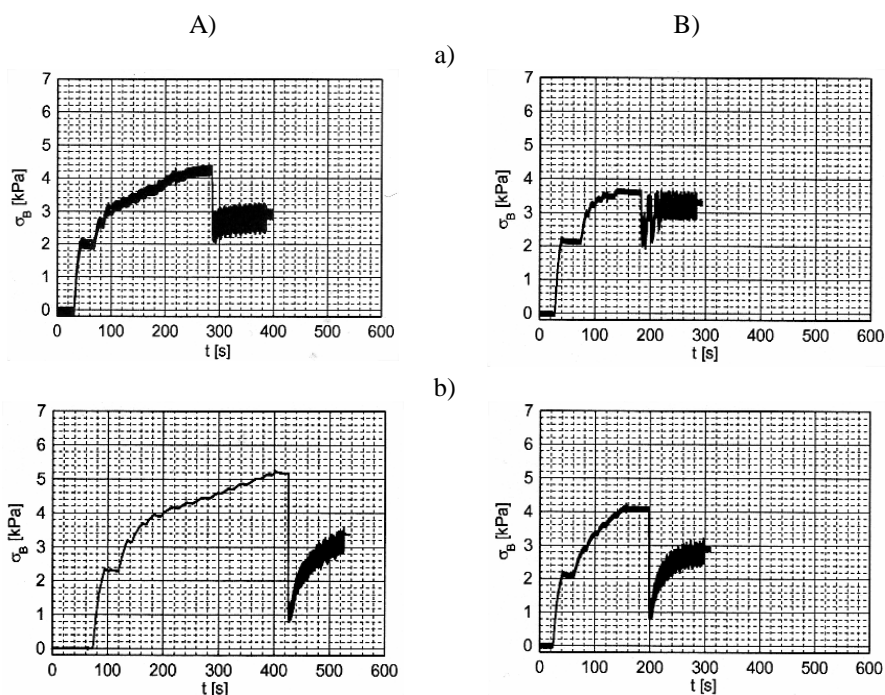
W celu oceny wpływu smukłości silosu na napór pionowy σ_B w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi (papier ścierny „16”) przeprowadzono badania dla modelu o wysokości $h = 1,0$ m. Badania te poprzedzono jednak pomiarem naporu pionowego w czasie napełniania silosu o wysokości $h = 2,0$ m, gdy poziom materiału sypkiego miał wysokość 1,0 od dna. Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku obniżania płaskodennego dna silosu z prędkością $v = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

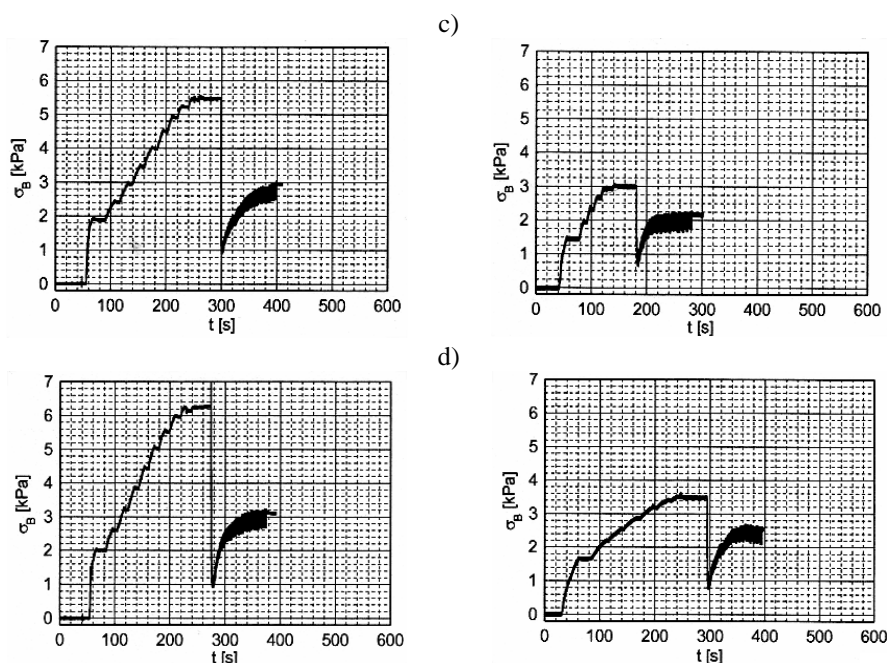
Po napełnieniu silosu o wysokości $h = 2,0$ m ze ścianami gładkim do połowy wysokości wartość pomierzonego naporu pionowego σ_B na dno silosu dla przypadku piasku luźnego wynosiła $\approx 3,75$ kPa (rys. 5Aa), natomiast dla piasku zagęszczonego wynosiła $\approx 4,28$ kPa (rys. 5Ab). Wartości pomierzone podczas doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi wynosiły dla piasku luźnego $\approx 3,17$ kPa (rys. 5Ac), natomiast dla piasku zagęszczonego $\approx 4,0$ kPa (rys. 5Ad). Duża wartość naporu dla piasku zagęszczonego w doświadczeniach ze ścianami bardzo szorstkimi potwierdza tezę o mobilizacji materiału sypkiego podczas napełniania silosu smukłego. Zjawisko to nie występuje jednak na wysokości 1,0 m w przypadku napełniania silosu materiałem w stanie luźnym.

Po napełnieniu silosu o wysokości $h = 1,0$ m ze ścianami gładkimi wartość pomierzonego naporu pionowego σ_B na dno silosu dla przypadku piasku luźnego wynosiła 3,57 kPa (rys. 5Ba), natomiast dla piasku zagęszczonego wynosiła 4,10 kPa (rys. 5Bb). Wartości te były mniejsze od wartości wyznaczonych dla wypełnionego w połowie silosu o wysokości $h = 2,0$ m o odpowiednio $\approx 4,8$ % (piasek luźny) oraz $\approx 4,21$ % (piasek zagęszczoney). Wartości pomierzone podczas doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi wynosiły dla piasku luźnego 3,00 kPa (Rys.5Bc), natomiast dla piasku zagęszczonego 3,5 kPa (rys. 5Bd). Wartości te były mniejsze od wartości wyznaczonych dla wypełnionego w połowie silosu o wysokości $h = 2,0$ m o odpowiednio $\approx 5,36$ % (piasek luźny) oraz $\approx 12,5$ % (piasek zagęszczoney).

Wyniki pomiarów w silosie o wysokości $h = 1,0$ m ze ścianami bardzo szorstkimi pokazały, że związek pomiędzy zagęszczeniem początkowym materiału oraz naporem pionowym σ_B na dno silosu zależy od smukłości silosu.

Dla silosu o wysokości $h = 1,0$ m charakteryzującego się smukłością 5 ($h/d = 1,0/0,2$) uzyskane wyniki są zgodne z zależnościami wyznaczonymi doświadczalnie przez Tejchmana (1989).





Rys. 5. Napór pionowy σ_B na dno silosu pomierzony w czasie napełniania oraz opróżniania z prędkością $v = 0,5$ mm: A) silos o wysokości $h = 2,0$ m, B) silos o wysokości $h = 1,0$ m: a) piasek luźny, ściana gładka, b) piasek zagęszczony, ściana gładka, c) piasek luźny, ściana bardzo szorstka, d) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,8$ mm)

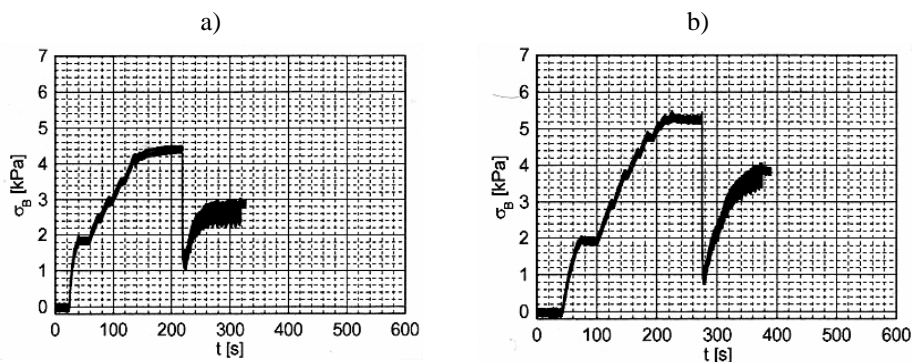
Fig. 5. Vertical bottom pressure σ_B measured during filling and emptying states for outlet velocity $v = 0.5$ mm of the silo: A) $h = 2.0$ m, B) $h = 1.0$ m: a) loose sand, smooth wall, b) dense sand, smooth wall, c) loose sand, very rough wall, d) dense sand, very rough wall (range of bottom displacement $u = 50$ mm, $d_{50} = 0.8$ mm)

Wpływ smukłości, zagęszczenia początkowego i szorstkości ścian ($h = 1,0$ m, $r_w \approx 1/2 \times d_{50}$)

W celu dalszej oceny wpływu smukłości oraz pozostałych parametrów zmiennych takich jak zagęszczenie początkowe oraz szorstkość ścian na napór pionowy σ_B w silosie o wysokości $h = 1,0$ m przeprowadzono kontrolne badania dla przypadku ścian szorstkich (papier ścierny „40”). Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku obniżania płaskodennego dna silosu z prędkością $v = \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Wartości naporu pionowego σ_B pomierzone podczas doświadczeń ze ścianami szorstkimi wynosiły dla piasku luźnego 4,42 kPa (rys. 6a), natomiast dla piasku zagęszczonego 5,28 kPa (rys. 6b). Wartości te były większe od wartości wyznaczonych dla silosu o wysokości $h = 2,0$ m ze ścianami gładkimi. $h = 2,0$ m o odpowiednio $\approx 3,27\%$ (piasek luźny) oraz $\approx 2,13\%$ (piasek zagęszczony).

Wyniki pomiarów w silosie o wysokości $h = 1,0$ m potwierdziły, że związek pomiędzy zagęszczeniem początkowym materiału oraz naporem pionowym σ_B na dno silosu zależy od smukłości silosu, jak również od szorstkości ścian. Pokazały również, że w przypadku silosów smukłych wprowadzenie nieznacznej imperfekcji do materiału sypkiego w postaci podwyższenia szorstkości ścian (papier ścierny „40” tj. $r_w \approx 1/2 \times d_{50}$) powoduje gwałtowne zaburzenie w rozkładzie naporu na dno i ściany silosu. Zaburzenie to powstaje w chwili napełniania silosu, a nie w chwili rozpoczęcia opróżniania. Dla silosu o wysokości $h = 1,0$ m i ścian szorstkich uzyskane wyniki nie są zgodne z zależnościami wyznaczonymi doświadczalnie przez Tejchmana (1989).



Rys.6. Napór pionowy σ_B na dno silosu o wysokości $h = 1,0$ m pomierzony w czasie napełniania oraz opróżniania z prędkością $v = 0,5$ mm: a) piasek luźny, b) piasek zagęszczony (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,8$ mm, ściana szorstka).

Fig. 6. Vertical bottom pressure σ_B of the silo with $h = 1.0$ m during filling and emptying states for outlet velocity $v = 0.5$ mm: a) loose sand, b) dense sand (range of bottom displacement $u = 50$ mm, $d_{50} = 0.8$ mm, rough wall).

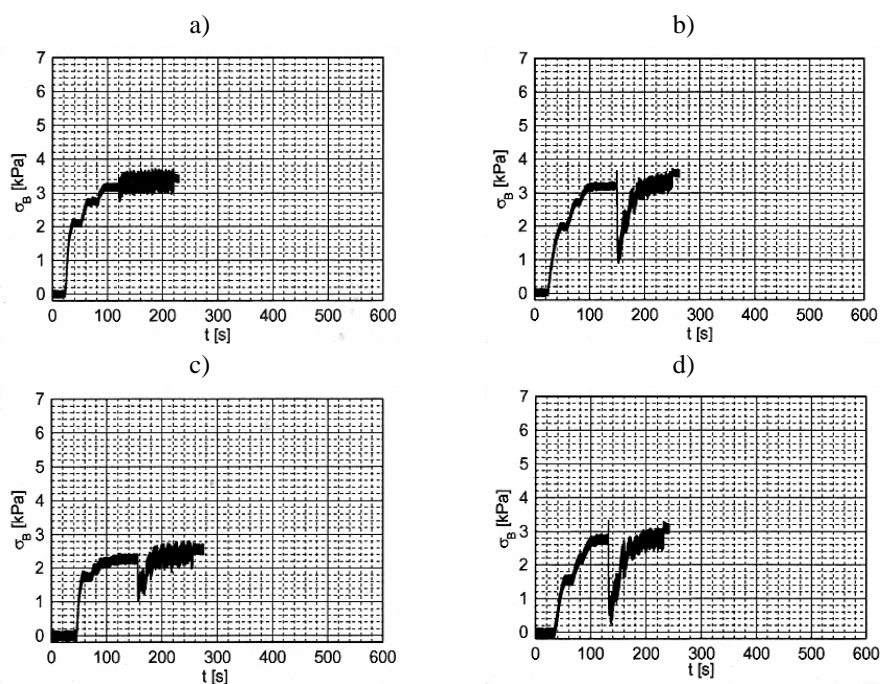
Wpływ smukłości, zagęszczenia początkowego i szorstkości ścian ($h = 0,5$ m, $r_w \approx d_{50}$)

W celu jednoznacznego podsumowania wpływu smukłości, zagęszczenia początkowego oraz szorstkości ścian na napór pionowy σ_B przeprowadzono badania sprawdzające dla silosu o wysokości $h = 0,5$ m. Doświadczenia przeprowadzono dla przypadku ścian gładkich i bardzo szorstkich (papier ścierny „16”) oraz obniżania płaskodennego dna silosu z prędkością $v = 0,5$ mm/s.

Po napełnieniu silosu o wysokości $h = 0,5$ m ze ścianami gładkim wartość pomierzonego naporu pionowego σ_B na dno silosu dla przypadku piasku luźnego wynosiła 3,14 kPa (rys.7a), natomiast dla piasku zagęszczonego wynosiła 3,21 kPa (rys. 7b). Wartości pomierzone podczas doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi wynosiły dla piasku luźnego 2,14 kPa (rys. 7c), natomiast dla piasku

zagęszczonego była większa o $\approx 3,27\%$ i wynosiła 2,21 kPa (rys.7d). Uzyskane różnice w wartościach naporu pionowego σ_B na dno silosu dla ścian bardzo szorstkich były zbliżone do uzyskanych w doświadczeniach z modelem prostokątnym i ścianami bardzo szorstkimi, gdzie różnice pomiędzy piaskiem luźnym a zagęszczonym w obciążeniu wynosiły $\approx 2,39\%$.

Wyniki pomiarów w silosie o wysokości $h = 0,5$ m charakteryzującego się smukłością 2,5 ($h/d = 0,5/0,2$) ze ścianami gładkimi i bardzo szorstkimi potwierdziły, że związek pomiędzy zagęszczeniem początkowym materiału oraz naporem pionowym σ_B na dno silosu zależy w sposób bardzo istotny od smukłości silosu. Wpływ szorstkości ściany na zaburzenie w rozkładzie naporu na dno silosu maleje wraz ze spadkiem smukłości silosu. Dla silosu o wysokości $h = 0,5$ m uzyskane wyniki są zgodne z zależnościami wyznaczonymi doświadczalnie przez Tejchmana (1989).



Rys. 7. Napór pionowy σ_B na dno silosu o wysokości $h = 0,5$ m pomierzony w czasie napełniania oraz opróżniania z prędkością $v = 0,5$ mm: a) piasek luźny, ściana gładka, b) piasek zagęszczony, ściana gładka, c) piasek luźny, ściana bardzo szorstka, d) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,8$ mm)

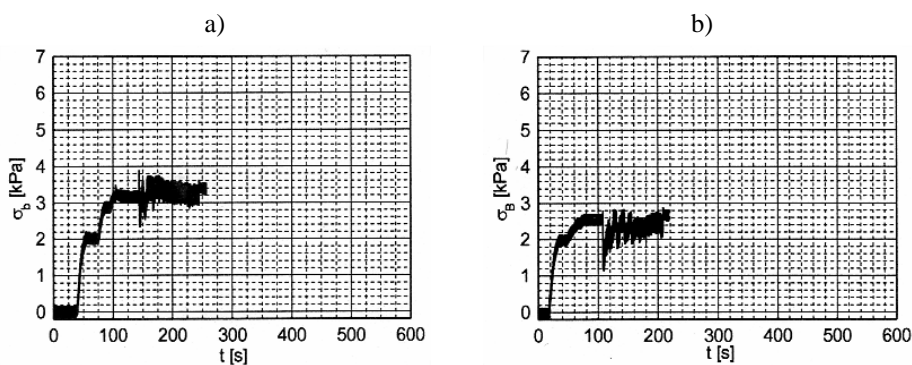
Fig. 7. Vertical bottom pressure σ_B of the silo with $h = 0.5$ m during filling and emptying states for outlet velocity $v = 0.5$ mm: a) loose sand, smooth wall, b) dense sand, smooth wall, c) loose sand, very rough wall, d) dense sand, very rough wall (range of bottom displacement $u = 50$ mm, $d_{50} = 0.8$ mm)

Wpływ smukłości, szorstkości ścian i średniej średnicy ziarna ($h = 0,5$ m, $r_w \approx 2 \times d_{50}$)

W celu dalszej oceny wpływu smukłości, zagęszczenia początkowego oraz szorstkości ścian na napór pionowy σ_B w silosie o wysokości $h = 0,5$ m przeprowadzono dalsze badania dla przypadku zmniejszonej średniej średnicy ziarna – zastosowano piasek drobnziarnisty $d_{50} = 0,3$ mm. Doświadczenia przeprowadzono w silosie ze ścianami gładkimi i bardzo szorstkimi, tylko dla piasku zagęszczonego, dla przypadku obniżania płaskodennego dna silosu z prędkością $v = 0,5$ mm·s⁻¹.

Wartość naporu pionowego σ_B pomierzona podczas doświadczeń ze ścianami gładkimi wynosiła 3,35 kPa (rys. 8a), natomiast dla doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi wynosiła 2,50 kPa (rys. 8b). Wartości te były większe od wartości wyznaczonych dla silosu o wysokości $h = 0,5$ m wypełnionego materiałem sypkim ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm odpowiednio o $\approx 4,36\%$ (ściana gładka – rys.7b) oraz $\approx 19\%$ (ściana szorstka – rys.7d).

Wyniki pomiarów w silosie o wysokości $h = 0,5$ m potwierdziły tezę, że w przypadku silosów krępych o ścianach zarówno gładkich, jak również bardzo szorstkich widoczny jest wyraźny wpływ średniej średnicy ziarna d_{50} . Zmniejszenie średniej średnicy ziarna powoduje zwiększenie wartości naporu materiału sypkiego na ściany silosu, ja również na jego dno. Uzyskane wyniki potwierdzają, że decydujący jednak wpływ na rozkład naporu ma geometria silosu w postaci jego smukłości.



Rys. 8. Napór pionowy σ_B na dno silosu o wysokości $h = 0,5$ m pomierzony w czasie napełniania oraz opróżniania z prędkością $v = 0,5$ mm: a) piasek zagęszczony, ściana gładka, b) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka (zakres przemieszczenia dna $u = 50$ mm, $d_{50} = 0,3$ mm)

Fig. 8. Vertical bottom pressure σ_B of the silo with $h = 0.5$ m during filling and emptying states for outlet velocity $v = 0.5$ mm: a) dense sand, smooth wall, b) dense sand, very rough wall (range of bottom displacement $u = 50$ mm, $d_{50} = 0.3$ mm)

WNIOSKI

1. Wielkość naporu materiału sypkiego na dno silosu zależy od jego smukłości, zgęszczenia początkowego materiału wypełniającego silos oraz od szorstkości ścian. Czynnikiem determinującym oddziaływanie materiału sypkiego na konstrukcję silosową jest smukłość silosu.

2. Dla przypadku silosów smukłych i ścian szorstkich oraz bardzo szorstkich materiał sypki w czasie procesu napełniania mobilizuje się bezpośrednio przy ścianach, co powoduje wzrost wartości naporu na czasie składowania materiału sypkiego w silosie. Sytuacja ta przyczynia się do powstania zaburzeń i utrudnień eksploatacyjnych w czasie opróżniania silosu.

3. W przypadku silosów krępych, gdy stosunek wysokości do przekroju poprzecznego nie przekracza 20 zwiększenie szorstkości ściany powoduje odciążenie dna w wyniku zawieszania się materiału sypkiego na ścianach silosu. Szorstkość ściany r_w powinna być większa niż $\frac{1}{2}$ średniej średnicy ziarna d_{50} .

4. Dokładne ilościowe określenie wpływu smukłości silosu na rozkład naporu materiału sypkiego nie jest jeszcze możliwe, aktualnie ma ono jedynie charakter jakościowy. Nie jest również możliwe przeniesienie w sposób bezpośredni wyników z badań modelowych na silosy w skali naturalnej ze względu na efekt skali spowodowany innym poziomem naprężeń i związanym z tym innym kątem tarcia materiału sypkiego o ściany silosu ϕ i innym kątem dylatacji β . Ponadto wpływ stosunku średniej średnicy ziarna d_{50} do średnicy silosu wpływa w sposób znaczący na zależności rozkładu naporu.

5. Badania wymagają kontynuacji, za celowe uznaje się ich przeprowadzenie dla materiałów roślinnych (zboża) składowanych w silosach smukłych.

PIŚMIENNICTWO

- Horabik, J., 1994. Wpływ własności mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku. Rozprawa habilitacyjna. Acta Agrophisica, 1, 1-71.
- Kamiński M., 1986. Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 50.
- Munch-Andersen J., Nielsen J., 1990. Pressures in slender grain silos. Measurements in three silos of different sizes. 2nd European Symposium on the Stress and Strain behaviour of Particulate Solids-Silo Stress, Praha, Czechoslovakia.
- Niedostatkiewicz M., 2008. Zastosowanie zmodyfikowanego pierścienia wewnętrznego jako metoda redukcji efektów dynamicznych podczas opróżniania silosów smukłych. Acta Agrophisica, Lublin, 11 (3), 703-713.
- Niedostatkiewicz M., Normant K., 2006. Redukcja efektów dynamicznych podczas opróżniania silosów w świetle obowiązujących przepisów prawnych. Przegląd Budowlany, Warszawa, 3, 31-34.
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2008. Effect of outlet velocity of bulk solids on loads in silos. The 7th International Workshop BioPhys Spring 2008, Praga, 48-51, 2008.

- Niedostatkiwicz M., Tejchman J., 2008. Reduction of dynamic effects during granular flow in silos. *Bulk Solids & Powder Science & Technology*, 1, 3, 51-55.
- Niedostatkiwicz, M., Tejchman J., 2003. Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow. *Powder Handling & Processing* 15, 1, 36-42.
- Nielsen J., Ruckebrod C., 1988. A note on dynamic phenomena in silos. *Proc. Int. Conf.: Silos-Forschung und Praxis*, Karlsruhe, 191-209.
- Pieper K., 1969. Investigation of silo loads in measuring models. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, 91, 365-372.
- PN-89/B-03262. Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kisonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Praca zbiorowa, 2003. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Krajowy Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Rucka M., Wilde K., Tejchman J., Niedostatkiwicz M., 2007. Zjawisko muzyki silosowej-doświadczenia i model mechaniczny. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Żelbetowe sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Szklarska Poręba, 1-8.
- Siedow L.J., 1969. Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1969.
- Tejchman J., 1989. Scherzonenbildung und verspannungseffekte in granulaten unter berucksichtigung von korndrehungen, University of Karlsruhe, 1-236.
- Tejchman J., Gudehus G., 1993. Silo-music and silo-quake, experiments and a numerical Cosserat approach. *Powder Technology*, 762, 201-212.
- Theimer O.F., 1969: Failures of reinforced concrete grain silos. *Transactions of the ASAE*, 91, 460-477.
- Wensrich C., 2002. Experimental behaviour of quaking in tall silos. *Powder Technology*, 127, 87-94.
- Wilde K., Rucka M., Tejchman J., 2007. Silo-quake-measurements, a numerical polar approach and a way for its suppression. *Powder Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.008>

INFLUENCE OF GEOMETRY AND WALL ROUGHNESS OF SILO WALL ON BOTTOM VERTICAL PRESSURE

Maciej Niedostatkiwicz

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

Abstract. The paper presents the results of experiments with silo bottom pressure measurement. Tests were performed for different conditions which simulated the different technological (increasing of the initial density) and technical (increasing of the wall roughness, decreasing of the silo slenderness ratio) solutions used in full scale silos. The trial of taking into account the wall roughness on silo wall distribution at slender silo was performed.

Key words: silo, controlled flow, bottom pressure, initial density, slenderness ratio