

EFEKTY DYNAMICZNE PODCZAS OPRÓŻNIANIA DUŻYCH SILOSÓW*

Maciej Niedostatkiewicz

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

Streszczenie. Efekty dynamiczne są nieodłącznym elementem każdego procesu opróżniania silosów i występują najczęściej w postaci pulsacji uderzeń. W materiałach sypkich bezkohezyjnych występują jedynie pulsacje, w materiałach kohezyjnych, w tym samym czasie, dodatkowo uderzenia. Celem artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów dynamicznych przeprowadzonych w dużych silosach spowodowanych różnymi przyczynami: rezonansem pomiędzy materiałem sypkim a konstrukcją silosu oraz rezonansem pomiędzy urządzeniami technologicznymi a konstrukcją silosu. Pomiary wykonane zostały w silosach zawierających granulaty polimerowy, cukier oraz śrutę sojową. W przypadku silosu zawierającego granulaty polimerowe efekty dynamiczne spowodowane były rezonansem pomiędzy materiałem sypkim a silosem. W silosie zawierającym cukier efekty dynamiczne spowodowane były wzbudnikiem wspomagającym wypływ materiału z uwagi na obecność kohezji. W przypadku silosu zawierającego śrutę sojową efekty dynamiczne spowodowane były wywołane pracą wybieraka i podajnika. W czasie badań pomierzone zostały przyspieszenia pionowe i promieniowe na ścianach silosów. Przeanalizowano wpływ prędkości opróżniania silosów na wielkość amplitud przyspieszeń.

S ł o w a k l u c z o w e : silosy, efekty dynamiczne, materiały sypkie

WSTĘP

Efekty dynamiczne są nieodłącznym elementem każdego procesu opróżniania silosów. Podczas wypływu materiałów sypkich z silosów mogą powstać efekty dynamiczne w postaci pulsacji i uderzeń [1], [3-7]. W materiałach sypkich bezkohezyjnych powstają pulsacje, natomiast w materiałach kohezyjnych pulsacje i uderzenia [2-5].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów dynamicznych wywołanych różnymi przyczynami, występujących podczas opróżniania dużych silo-

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

sów: powstałych w wyniku rezonansu pomiędzy materiałem sypkim a konstrukcją silosu, oraz powstałych w wyniku rezonansu pomiędzy pracującymi urządzeniami technologicznymi, a konstrukcją silosu. Ponadto celem artykułu jest przedstawienie wpływu efektów dynamicznych na przepływ materiałów sypkich.

Niezależnie od źródła pochodzenia, efekty dynamiczne należy ograniczać ponieważ wywołują one hałas, który zakłóca pracę, przyczyniają się do powstania i propagacji drgań dynamicznych w podłożu gruntowym, które zagrażają sąsiednim budowlom, oraz mogą spowodować awarię silosu poprzez znaczne zwiększenie naporu materiału sypkiego na ściany (rys. 1).



Rys. 1. Silos na zboże ze ścianami zniszczonymi podczas dynamicznego opróżniania
Fig. 1. Silos for cereals with walls destroyed during dynamic discharge

REZONANS POMIĘDZY MATERIAŁEM SYPKIM A KONSTRUKCJĄ SILOSU

Samowzbudne efekty dynamiczne w silosach w postaci pulsacji są związane z drganiami własnymi materiału sypkiego wzbudzonymi wskutek zakłócenia przepływu przy dnie silosu w wyniku jego zwężenia [6]. Pulsacje te wzbudzone przy dnie propagują do góry przez materiał w postaci sprężysto-plastycznych fal naprężeniowych. Zwężenie kanału przepływu powoduje zmianę kierunku odkształceń stycznych w materiale przy dnie silosu co przyczynia się do ciągłych zmian objętościowych materiału od dylatacji (zwiększenie objętości) do kontrakcji (zmniejszenie objętości) i odwrotnie. Mechanizm ten powtarza się nieustannie podczas wypływu materiału z silosu. Zmiany objętościowe prowadzą do zmian naprężeń, które przy obecności sił bezwładności wywołują dynamiczne pulsacje w materiale sypkim. Podczas przepływu masowego w silosach o gład-

kich ścianach pulsacje są bezpośrednio przenoszone na ścianę silosu, a stamtąd na konstrukcję wsporczą. W przypadku zgodności częstotliwości drgań własnych materiału sypkiego z częstotliwościami drgań własnych konstrukcji powstaje efekt rezonansowy [3-7], który znacznie zwiększa amplitudy pulsacji. Taki przypadek ma często miejsce w silosach stalowych i aluminiowych, których sztywność ścian jest dużo mniejsza niż sztywność komór silosów żelbetowych. Podczas przepływu rdzeniowego pulsacje są z reguły wyłumione przez materiał spoczywający nieruchomo przy ścianie silosu.

SILOS NA GRANULAT POLIMEROWY

Silne efekty dynamiczne połączone z efektami akustycznymi zostały zaobserwowane podczas opróżniania stalowego silosu na granulaty polimerowe (rys. 2). Materiał sypki charakteryzował się następującymi parametrami: ciężar objętościowy $\gamma = 6,35 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt tarcia na ścianie $\phi_w = 15,4^\circ$, maksymalny kąt tarcia wewnętrzznego $\phi_{max} = 34,1^\circ$, rezydualny kąt tarcia wewnętrzznego $\phi_{cr} = 32,6^\circ$, kohezja $c = 0,08 \text{ kPa}$.

Silos znajdował się na dachu budynku, w którym prowadzony był proces polikondensacji granulatu polimerowego. Wydajność ciągu technologicznego, w skład którego wchodził silos wynosiła 60 ton/dobę. Silos wykonany został z blachy stalowej nierdzewnej, składał się z części cylindrycznej i leja. Wysokość silosu wynosiła 4,4 m, a jego średnica 1,8 m. Część cylindryczna miała wysokość 2,7 m. Wysokość leja od jego górnej krawędzi do poziomu stropodachu była równa 0,6 m. Pojemność silosu wynosiła około 3,5 tony. Wpływ granulatu z silosu był regulowany za pomocą obrotowej śluzy. Silos posiadał jeden niesymetryczny górny otwór włączowy, napełnianie zbiornika odbywało się pneumatycznie od góry silosu. Silos przymocowany był do ramy stalowej, która spoczywała na stropodachu budynku. Silos w poziomie stropodachu posadowiono na żelbetowych prefabrykowanych płytach o grubości 0,1 m. Pozostałą część konstrukcji stropodachu zaprojektowano jako przekrycie typu lekkiego. W czasie oględzin silosu nie stwierdzono uszkodzeń spoin stalowego płaszcza silosu i nie zaobserwowano jego deformacji. Nie stwierdzono także poluzowania się śrub na instalacji rurowej napełniającej silos.

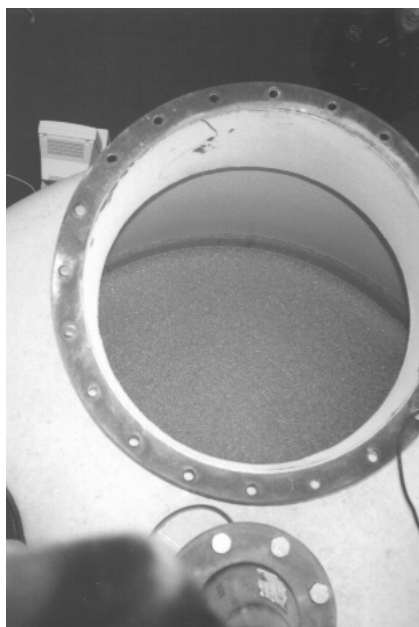


Rys. 2. Silos na granulaty polimerowe
Fig. 2. Silo for polymer granulate

W czasie pomiarów dynamicznych pomierzono przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia pionowe (u_v, v_v, a_v), promieniowe (u_h, v_h, a_h) i obwodowe (u_o, v_o, a_o) na ścianie silosu.

Pomiary przyspieszeń wykonane zostały przy zastosowaniu akcelerometrów indukcyjnych. Przyspieszenia pionowe, promieniowe i obwodowe pomierzone zostały na wysokościach 1 oraz 1,8 m od miejsca połączenia leja z częścią cylindryczną silosu. Prędkości oraz przemieszczenia dla poszczególnych punktów pomiarowych otrzymano poprzez całkowanie pomierzonych przyspieszeń (jednokrotne lub dwukrotne).

Podczas pomiarów silos był prawie cały napełniony (3,2 tony). Prędkość wypływu wynosiła $3 \text{ tony} \cdot \text{h}^{-1}$. Materiał sycki przemieszczał się równomiernie wzdłuż całego



Rys. 3. Przemierzająca się górną powierzchnią granulat polimerowy w silosie

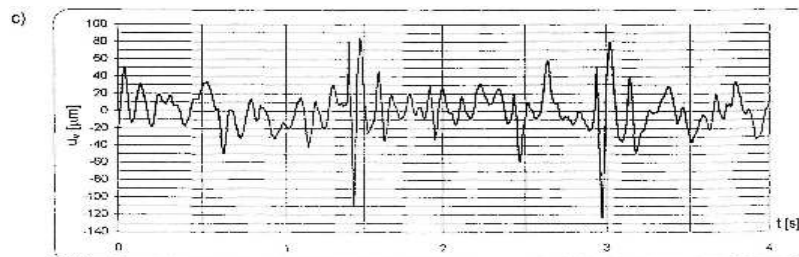
Fig. 3. The upper surface of polymer granulate during silo discharge

przekroju poprzecznego. Kształt górnej powierzchni materiału po napełnieniu silosu nie wiele się zmienił. Szerokość strefy ścięcia materiału przy ścianie wynosiła około 6-8 cm (rys. 3). Podczas opróżniania silosu zaobserwowano w granulacie polimerowym silne pulsacje dynamiczne, które przenosiły się z materiału na ścianę silosu, a stamtąd na stalową ramę wsporczą i stropodach.

Otrzymane wyniki pomiarów dynamicznych pokazały że:

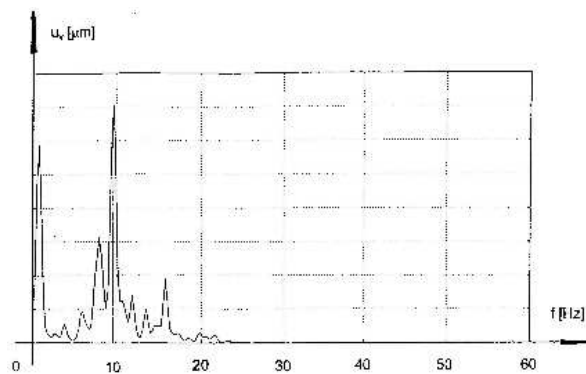
- największe wartości amplitud drgań wystąpiły w kierunku pionowym,
- maksymalne amplitudy drgań przemieszczeń wynosiły 0,09-0,14 mm (na wysokości 1 m) i 0,04-0,12 mm (na wysokości 1,8 m), (rys. 4),
- maksymalne amplitudy drgań prędkości wynosiły $1,3-8,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (poziom 1 m) i $1,5-2,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (poziom 1,8 m),
- maksymalne amplitudy drgań przyspieszeń wynosiły $0,4-1,55 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (poziom 1,0 m) i $0,7-2,6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (poziom 1,8 m),
- efekty dynamiczne w postaci pulsacji

występowały nieprzerwanie podczas procesu opróżniania silosu. Podstawowa częstotliwość pulsacji wynosiła na podstawie analizy spektrum częstotliwości przemieszczenia pionowego 9,6 Hz (rys. 5).



Rys. 4. Pomierzone przemieszczenie pionowe u_v na ścianie silosu w przedziale czasowym 4 s (poziom 1,8 m)

Fig. 4. Measured vertical displacement u_v on the silo wall in the time of 4 s (level 1.8 m)



Rys. 5. Spektrum częstotliwości przemieszczenia pionowego ściany u_v na wysokości 1,8 m

Fig. 5. Spectrum of the frequency of vertical displacement u_v of the wall at height 1.8 m

REZONANS POMIĘDZY URZĄDZENIAMI TECHNOLOGICZNYMI A KONSTRUKCJĄ SILOSU

W dużych silosach, w których zamontowane są urządzenia technologiczne wspomagające wypływ materiału sypkiego często występują efekty dynamiczne w wyniku rezonansu pomiędzy pracującymi urządzeniami ciągu technologicznego, a konstrukcją silosu.

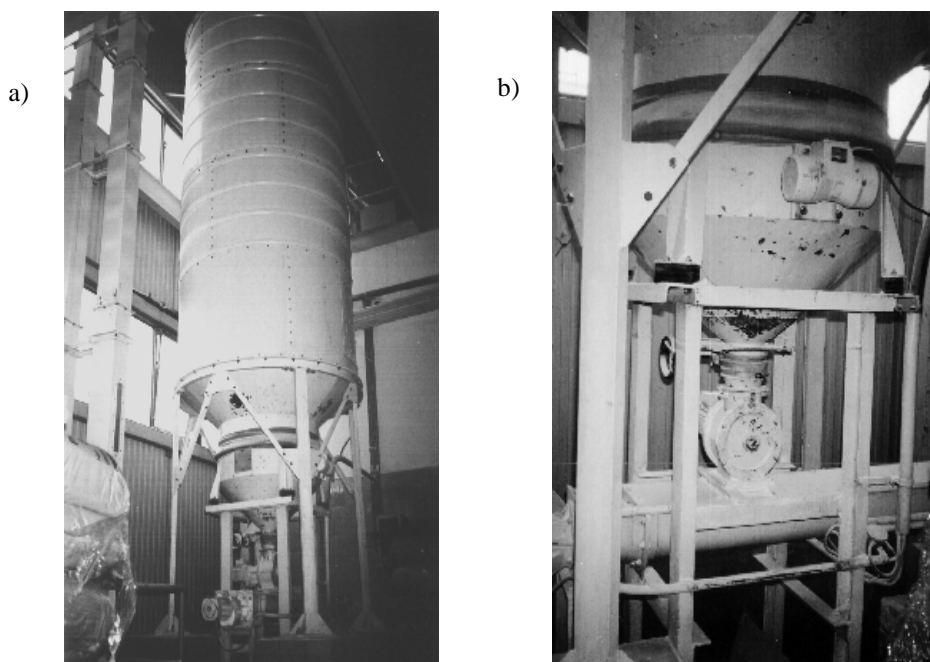
SILOS NA CUKIER

Efekty dynamiczne zostały zaobserwowane podczas opróżniania stalowego silosu na cukier (rys. 6a). Materiał sypki charakteryzował się następującymi parametrami: ciężar objętościowy $\gamma = 10,70 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt tarcia na ścianie $\phi_w = 14,02^\circ$, maksymalny kąt tarcia wewnętrzznego $\phi_{max} = 33,15^\circ$, rezydualny kąt tarcia wew-

nętrznego $\phi_{cr} = 30^\circ$, średnia średnica ziarna $d_{50} = 0,95$ mm, kohezja $c = 3,15$ kPa.

Silos znajdował się w budynku produkcji wyrobów cukierniczych w ciągu technologicznym produkcji masy czekoladowej. Wykonany został z blachy stalowej. Średnica zewnętrzna silosu wynosiła 1,9 m, a wysokość części cylindrycznej około 4,8 m. Wysokość leja była równa 0,5 m. Silos wsparty był na stalowej konstrukcji wsporczej posadowionej na żelbetowych cokołach. Opróżnianie silosu odbywało się przy zastosowaniu śluzy obrotowej oraz wzbudnika dynamicznego z częstotliwością drgań 50 Hz (rys. 6b). Celem wzbudnika było zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego materiału, kąta tarcia na ścianie oraz kohezji materiału sypkiego. Silos posadowiony został na trójwarstwowych podkładkach wibroizolacyjnych o wymiarach 6 x 6 x 12 cm. Całkowita pojemność silosu wynosiła około 8 ton. Zazwyczaj silos napełniony był do połowy swojej pojemności.

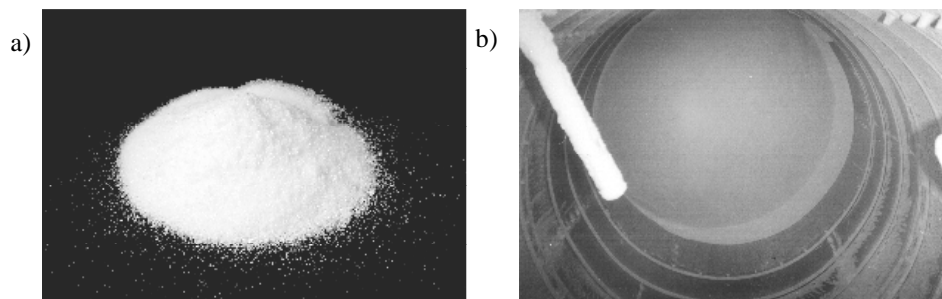
W czasie pomiarów dynamicznych pomierzono przyspieszenia pionowe a_v i promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 1 m, tj. na wysokości w przybliżeniu połowie średnicy silosu licząc od miejsca połączenia leja z częścią cylindryczną silosu. Pomiar przyspieszeń na ścianie silosu stalowego wykonane zostały przy zastosowaniu akcelerometrów indukcyjnych, podobnie jak w przypadku silosu na granulaty polimerowe.



Rys. 6. Silos na cukier: a) widok ogólny, b) śluza obrotowa i wzbudnik
Fig. 6. Silo for sugar: a) general view, b) rotary material lock and inductor

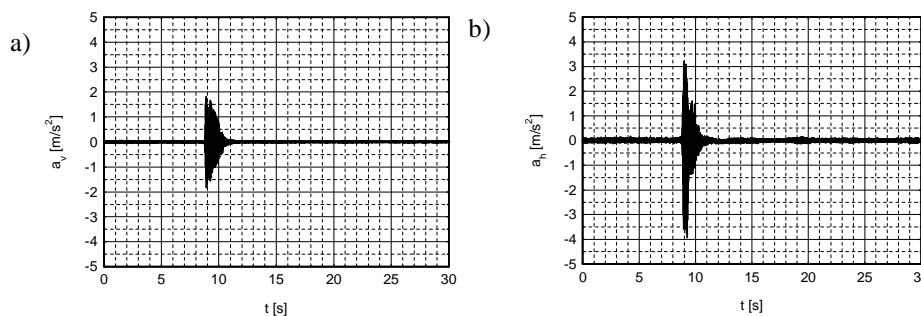
Podczas pomiarów w silosie znajdował się cukier w ilości około 3,8 ton (rys.7). W czasie opróżniania zaobserwowano drgania dynamiczne konstrukcji silosu, którym towarzyszyły efekty akustyczne. Lekkie drgania płaszcza silosu były wyczuwalne dłonią. Zaobserwowano następujące rodzaje pojawiających się efektów dynamicznych w silosie podczas wypływu materiału sypkiego:

- pojedyncze słabe pulsacje po rozpoczęciu opróżniania silosu (podczas pracy śluzy obrotowej),
- gwałtowne tąpnięcia materiału występujące w 9 s opróżniania silosu, w momencie załączenia wzbudnika dynamicznego.

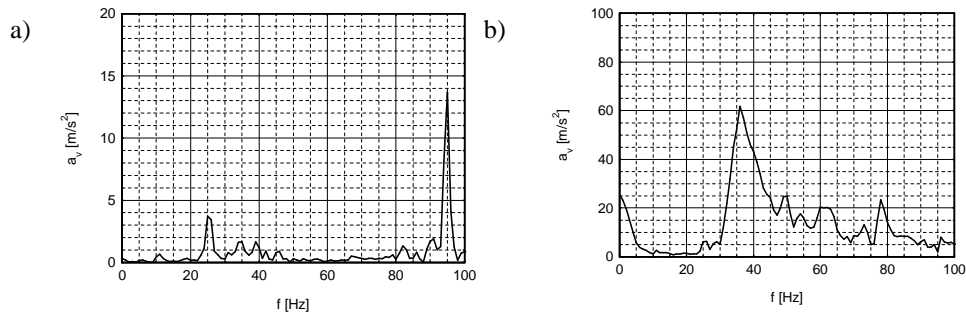


Rys. 7. Silos na cukier: a) cukier składowany w silosie, b) wnętrze silosu
Fig. 7. Silo for sugar: a) sugar stocked in silo, b) internal part of the silo

Rysunek 8 przedstawia wyniki pomiarowe przyspieszeń ściany silosu na wysokości 1 m podczas pracy śluzy obrotowej oraz wzbudnika dynamicznego. Na rysunkach 9 i 10 pokazano analizę spektrum częstotliwości pomierzonych przyspieszeń. Rysunki 11 i 12 odnoszą się do przypadku pracy wzbudnika dynamicznego.

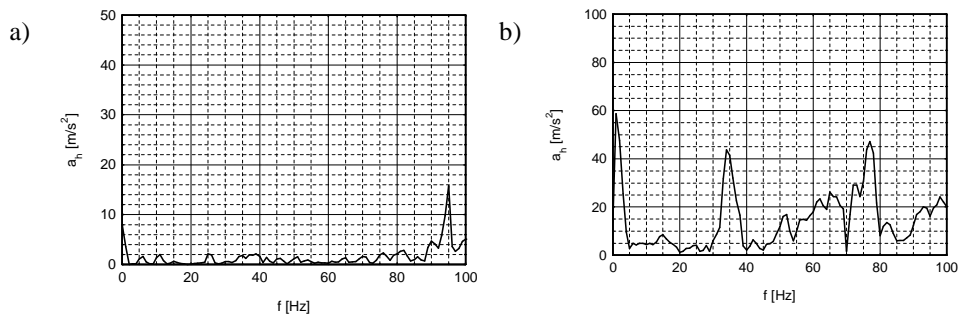


Rys. 8. Pomierzone: a) przyspieszenie pionowe a_v i b) promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 1 m (śluza obrotowa+wzbudnik)
Fig. 8. Measured: a) vertical acceleration a_v and b) horizontal a_h on the silo wall at height of 1 m (rotary material lock+inductor)



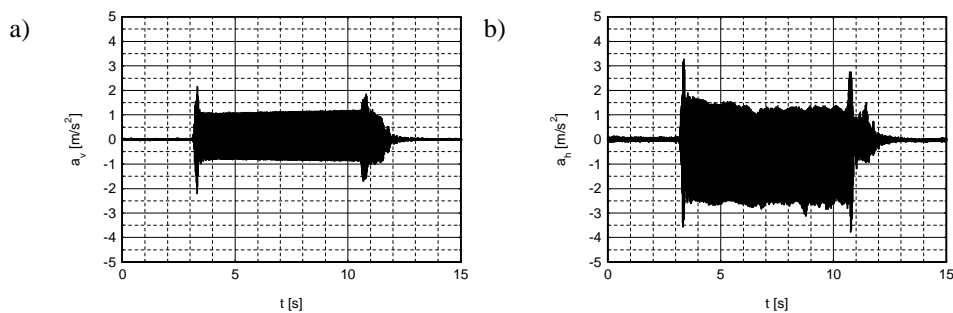
Rys. 9. Spektrum częstotliwości pomierzonego przyspieszenia pionowego a_v na ścianie silosu na wysokości 1 m w przedziale czasowym: a) 5-6 s, b) 9-10 s (śluga obrotowa+wzbudnik)

Fig. 9. Spectrum of the frequency of vertical acceleration a_v measured on the silo wall at height of 1 m in the time section of: a) 5-6 s, b) 9-10 s (rotary material lock+inductor)



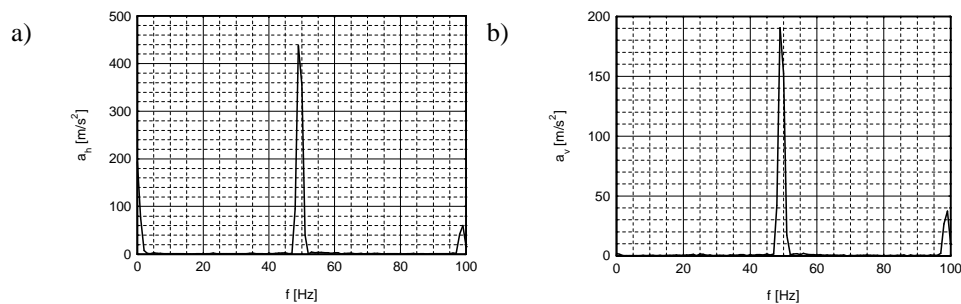
Rys. 10. Spektrum częstotliwości pomierzonego przyspieszenia promieniowego a_h na ścianie silosu na wysokości 1 m w przedziale czasowym: a) 5-6 s, b) 9-10 s (śluga obrotowa+wzbudnik)

Fig.10. Spectrum of the frequency of horizontal acceleration a_h measured on the silo wall at height of 1 m in the time section of: a) 5-6 s, b) 9-10 s (rotary material lock+inductor)



Rys. 11. Pomierzone: a) przyspieszenie pionowe a_v , i b) promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 1 m (wzbudnik)

Fig. 11. Measured: a) vertical acceleration a_v and b) horizontal a_h on the silo wall at height of 1 m (inductor)



Rys. 12. Spektrum częstotliwości pomierzonego przyspieszenia na ścianie silosu na wysokości 1 m w przedziale czasowym 5-6 s: a) pionowego a_v , b) poziomego a_h (wzbudnik)

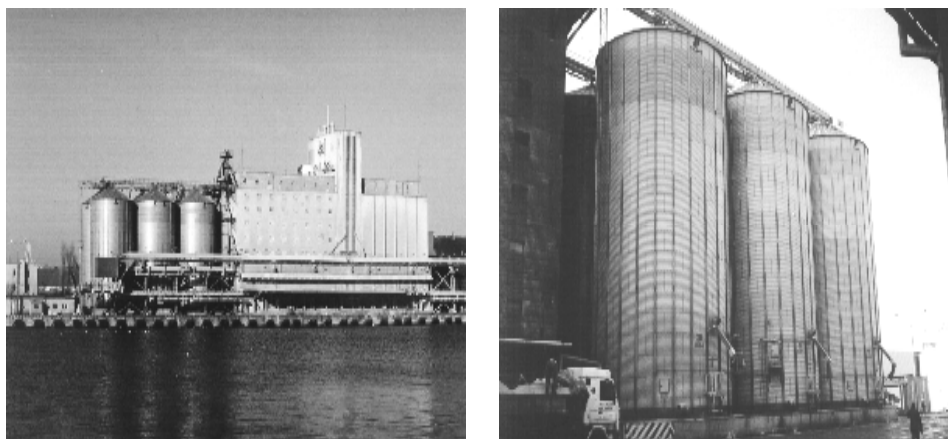
Fig. 12. Spectrum of the frequency of acceleration measured on the silo wall at height of 1 m in the time section of 5-6 s: a) vertical a_v , b) horizontal a_h (inductor)

Wyniki pomiarów pokazały, że:

- podczas opróżniania silosu z kontrolowaną prędkością wypływu (bez wpływu wzbudnika) maksymalne amplitudy przyspieszeń w kierunku poziomym wynosiły około $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, a w kierunku pionowym $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Podczas pracy wzbudnika dynamicznego amplitudy poziome wzrastały do wartości $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, natomiast amplitudy pionowe do wartości $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- podstawowa częstotliwość drgań pulsacji wyznaczona na ścianie podczas wypływu materiału sypkiego wynosiła około 25 Hz. Podczas pracy wzbudnika dynamicznego częstotliwość drgań wynosiła około 35 Hz,
- podstawowa częstotliwość drgań, 25 Hz, wyznaczona podczas wypływu na ścianie silosu była zbliżona do częstotliwości drgań własnych silosu wypełnionego cukrem w ilości około 40%. Silny efekt rezonansowy nie pojawił się z uwagi na małą prędkość wypływu materiału sypkiego.

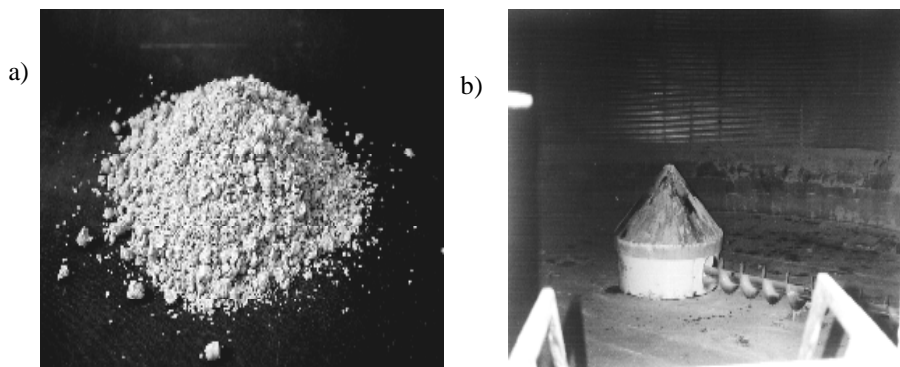
SILOS NA ŚRUTĘ SOJOWĄ

Efekty dynamiczne zostały zaobserwowane podczas opróżniania stalowego silosu zawierającego śrutę sojową. Materiał sypki charakteryzował się następującymi parametrami: ciężar objętościowy $\gamma = 8,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt tarcia na ścianie $\phi_w = 10,4^\circ$, maksymalny kąt tarcia wewnętrzny $\phi_{max} = 33,5^\circ$, rezydualny kąt tarcia wewnętrzny $\phi_{cr} = 29,7^\circ$, średnia średnica ziarna (w uproszczeniu) $d_{50} = 3,91 \text{ mm}$, kohezja $c = 2,2 \text{ kPa}$. Widok baterii silosów stalowych przedstawiono na rysunku 13. Bateria składała się z 8 silosów. Silosy na śrutę sojową wykonane zostały z blachy stalowej nierdzewnej o sfałdowanej powierzchni. Grubość blachy wynosiła 3 mm. Średnica zewnętrzna silosu na którym wykonano pomiary wynosiła 12,5 m, a jego wysokość 24,5 m. Bateria silosów posadowiona została na żelbetowym ruszcie oczepu pali, z których wykonano wzmocnienie nabrzeża portowego pod silosy.



Rys. 13. Silos na śrutę sojową
Fig. 13. Silo for soy beam

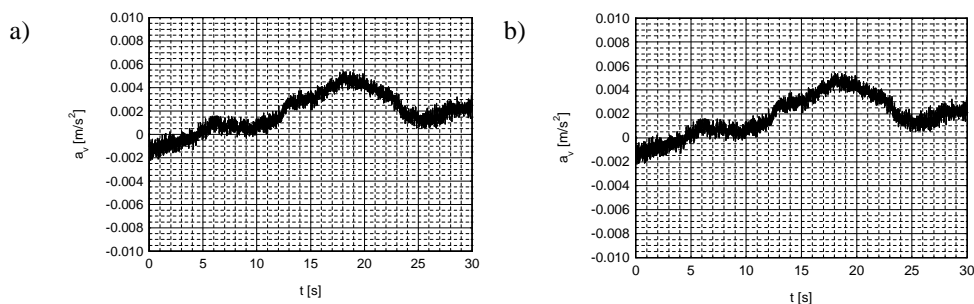
Wewnątrz silosu wykonano żelbetowy pierścień o wysokości 1,2 m i grubości 0,2 m w celu zabezpieczenia dolnej strefy silosu przed wzrostem naporu w czasie opróżniania silosu. Pojemność silosu na którym wykonano pomiary wynosiła około 2200 ton. Napełnianie odbywało się poprzez system instalacji pneumatycznych wprowadzających materiał sypki od góry silosu. Opróżnianie silosu odbywało się przy pomocy poziomego wybieraka (ślimaka) i trzech otworów wyspowych zlokalizowanych w dnie (rys. 14).



Rys. 14. Silos na śrutę sojową: a) śruta sojowa składowana w silosie, b) wybierak poziomy do opróżniania silosu
Fig. 14. Silo for soy beam: a) soy beam, b) horizontal selector for silo discharge

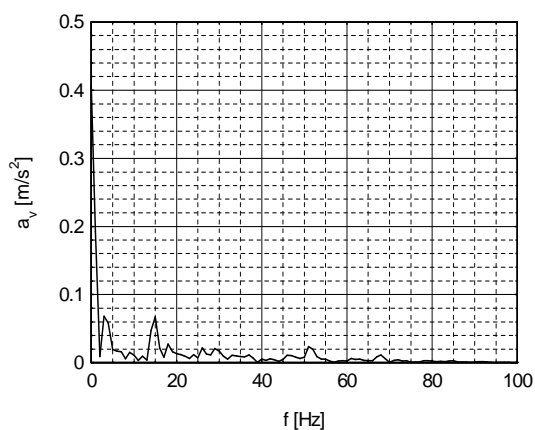
W czasie pomiarów dynamicznych pomierzono przyspieszenia pionowe a_v i promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 2 m oraz na wysokości 5 m. Pomiary przyspieszeń na ścianie silosu stalowego wykonane zostały przy zastosowaniu akcelerometrów indukcyjnych, podobnie jak w przypadku silosu na granulacie polimerowym oraz na cukier.

W czasie rozpoczęcia pomiarów w silosie znajdowała się śruta sojowa w ilości około 1000 ton. Silos wypełniony był do wysokości około 10 m (w przybliżeniu w połowie pojemności). Gdy pracował podajnik pneumatyczny zaobserwowano drgania dynamiczne podłoża (na którym posadowiony był silos) oraz słabo wyczuwalne dłońmi drgania konstrukcji silosu (w szczególności w jego dolnej partii na wysokości około 1,8-2 m). Rysunki 15 i 16 przedstawiają wyniki pomiarowe na wysokości 2 m podczas opróżniania silosu i pracy wybieraka poziomego oraz podajnika pneumatycznego, natomiast rysunki 17 i 18 odnoszą się do przypadku, gdy pracował jedynie podajnik pneumatyczny.



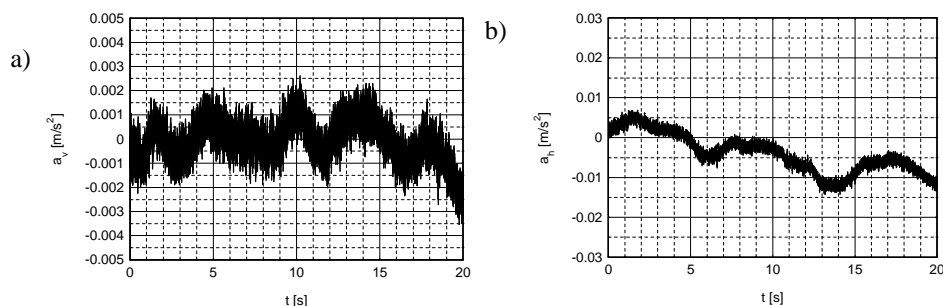
Rys. 15. Pomierzone: a) przyspieszenie pionowe a_v i b) promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 2 m (wybierak poziomy+podajnik pneumatyczny)

Fig. 15. Measured: a) vertical acceleration a_v and b) horizontal a_h on the silo wall at height of 2 m (horizontal selector+pneumatic feeder)



Rys. 16. Spektrum częstotliwości pomierzonego przyspieszenia pionowego a_v na ścianie silosu na wysokości 2 m w przedziale czasowym 7-8 s (wybierak poziomy+podajnik pneumatyczny)

Fig. 16. Spectrum of the frequency of vertical acceleration a_v measured on the silo wall at height of 2 m in the time section 7-8 s (horizontal selector+pneumatic feeder)

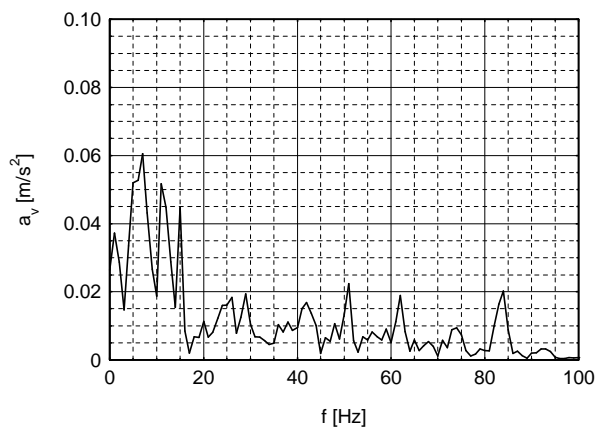


Rys. 17. Pomierzone: a) przyspieszenie pionowe a_v i b) promieniowe a_h na ścianie silosu na wysokości 2 m (podajnik pneumatyczny)

Fig. 17. Measured: a) vertical acceleration a_v and b) horizontal a_h on the silo wall at height of 2 m (pneumatic feeder)

Wyniki pomiarów pokazały, że:

- maksymalne amplitudy przyspieszeń wynosiły jedynie $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Największe drgania pionowe występowały podczas pracy podajnika pneumatycznego,
- podstawowa częstotliwość pulsacji wyznaczona na podstawie analizy spektrum częstotliwości przyspieszeń pionowych wynosiła około 14 Hz (rys.16) w czasie pracy wybieraka poziomego i podajnika pneumatycznego. Gdy pracował tylko podajnik pneumatyczny częstotliwość drgań była niższa i wynosiła około 7 Hz (rys. 18),
- częstotliwość drgań własnych konstrukcji silosowej wynosiła około 25 Hz.



Rys. 18. Spektrum częstotliwości pomierzonego przyspieszenia pionowego a_v na ścianie silosu na wysokości 2 m w przedziale czasowym 7-8 s (podajnik pneumatyczny)

Fig. 18. Spectrum of the frequency of vertical acceleration a_v measured on the silo wall at height of 2 m in the time section of 7-8 s (pneumatic feeder)

WNIOSKI

1. Efekty dynamiczne powstające podczas opróżniania silosów mogą być wynikiem rezonansu pomiędzy wypływającym materiałem sypkim a konstrukcją silosu, albo rezonansu pomiędzy urządzeniami wspomagającymi wypływ, a konstrukcją silosu.

2. Niezależnie od źródła pochodzenia oraz rodzaju składowanego materiału sypkiego, efekty dynamiczne podczas opróżniania silosów występują pod różnymi postaciami: jako gwałtowne, pojedyncze uderzenia, silne, cyklicznie powtarzające się tąpnięcia materiału sypkiego albo jako ciągłe pulsacje. Wszystkie te postacie mogą również występować jednocześnie w czasie opróżniania silosu.

3. W przypadku zgodności częstotliwości drgań własnych konstrukcji silosowej i drgającego materiału sypkiego lub urządzeń technologicznych w dużych silosach silny efekt rezonansowy nie pojawia się z uwagi na małą prędkość wypływu materiału sypkiego.

4. Z uwagi na właściwości tłumiące i samą objętość materiałów sypkich w dużych silosach efekty dynamiczne mają małe amplitudy przyspieszeń w porównaniu do uzyskiwanych w czasie doświadczeń w modelach silosów.

5. Przedstawione w artykule efekty dynamiczne powstające podczas opróżniania silosów zawierających granulaty polimerowy, cukier oraz śrutę sojową nie zagrażały bezpieczeństwu użytkowania oraz bezpieczeństwu konstrukcji silosów.

6. Powstające drgania miały charakter nie cykliczny, przypadkowy i charakteryzowały się małymi amplitudami przemieszczeń. Były jednak silnie odczuwalne powodując drgania konstrukcji wsporczych (uciążliwości eksploatacyjne) oraz wywoływały efekty akustyczne (dyskomfort użytkowy).

PIŚMIENNICTWO

1. **Borc A.:** Silosy w przemyśle materiałów wiążących. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987.
2. **Melix P.:** Modellversuche und Berechnungen zur Standsicherheit oberflächennaher Tunnel. Publication Series of the Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, Karlsruhe, 1987.
3. **Niedostatkiewicz M.:** Efekty dynamiczne w silosach. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1-258, 2003.
4. **Niedostatkiewicz M.:** Wpływ kohezji na przepływ materiałów sypkich w silosach. XII Konferencja Naukowo-Techniczna „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, Kraków, 149-156, 2003.
5. **Niedostatkiewicz M., Tejchman J.:** Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow. Powder Handling and Processing, 15, 1, 36-42, 2003.
6. **Tejchman J.:** Modelling of shear localisation and autogeneous dynamic effects in granular bodies. Publication Series of the Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, Karlsruhe, 1996.
7. **Tejchman J.:** Technical concept to prevent the silo honking. Powder Technology, 106, 7-22, 1999.

DYNAMIC EFFECTS DURING THE DISCHARGE PROCESS OF LARGE SILOS

Maciej Niedostatkiewicz

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

Abstract. Dynamic effects in bulk solids are an inherent characteristic of each silo discharge. Most frequently, they occur in the form of pulsations and shocks. In dry granular materials (non-cohesive) only pulsations are created. In the case of cohesive bulk solids, pulsations and shocks can be observed at the same time. The intention of this paper is to present measurements of dynamic effects in large silos, caused by different reasons: resonance between bulk solids and silo system, resonance between technological devices and silo system. Measurements in large silos were performed with silos containing: polymer granulate, sugar and soy bean. In the case of a silo containing polymer granulate, dynamic effects were due to resonance between the bulk solid and the silo system. In a silo where sugar was stored, dynamic effects were induced by a mechanical exciter used to promote flow of sugar due to cohesion. In the case of a silo containing soy bean, dynamic effects were caused by a selector and feeder. During tests on large silos, vertical and horizontal accelerations on silo wall were measured. Moreover, the effect of the discharge velocity on acceleration amplitudes was investigated.

Keywords: silo, dynamic effects, bulk solids