

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWr*
mgr inż. Agata Aniszczuk*

Prototypowa konstrukcja silosu o wiotkim płaszczu do składowania biomasy

Prototype construction of flaccid silo shell for storage of biomass

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zapotrzebowania elektrowni konwencjonalnych na różne rodzaje biomasy, co wiąże się z koniecznością budowy magazynów do jej składowania.

W tym celu bardzo często wykorzystywane są metalowe silosy [1], [2] o konstrukcjach stosowanych w rolnictwie. Biomasa jest z reguły produktem odpadowym o bardzo zmiennych właściwościach, które zależą w dużym stopniu od jej dostawców i sposobu magazynowania [3], [4]. Bardzo częstym, niekorzystnym zjawiskiem jest pęcznienie lub zlepianie się biomasy w silosach pod wpływem wilgoci, gdyż wiele jej rodzajów ma właściwości higroskopijne. Zbrylanie się lub pęcznienie biomasy w silosach prowadzi do jej przesklepień i poważnych utrudnień w rozładunku, skutkujących często poważnymi awariami silosów (szczególnie lejów) podczas samoczynnego lub wymuszonego tąpnięcia powstałego przesklepienia [5], [6].

Podczas przesklepienia cały ciężar materiału składowanego nad powstałym przesklepieniem jest przekazywany na płaszcz silosu. Wzrasta wówczas całkowite obciążenie tego płaszczu w stosunku do wartości ustalonych w normie PN-EN 1991-4. W silosach z blach falistych takie zwiększone obciążenie pionowe może prowadzić do znacznego przeciążenia południkowych żeber usztywniających płaszcz.

Poszukiwania skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych lub technologicznych, zapewniających wyeliminowanie przesklepień i innych utrudnień w opróżnianiu silosów z materiałów pęczniących i kohezyjnych, nie przyniosły dotychczas zadowalających rezultatów. W artykule przedstawiono wybrane wyniki końcowej obecnie pracy badawczej, której celem było opracowanie konstrukcji silosów do składowania biomasy, zapewniających bezkłóceniową i bezpieczną eksploatację. Przedstawione prototypowe konstrukcje były poddane badaniom eksperymentalnym, których wyniki potwierdziły dobrą skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

Wpływ rozkładu globalnych obciążeń w cylindrycznych silosach na proces ich rozładunku

Po napełnieniu cylindrycznego silosu materiałem sypkim część ciężaru G tego materiału przekazywana jest bezpośrednio na płaszcz przez tarcie. Ta część południkowego obciążenia płaszczu, oznaczona jako P_w , zależy od współczynnika tarcia μ materiału o ścianę, od wartości ilorazu parcia bocznego K oraz od stosunku wysokości cylindrycznej po-

włoki silosu h_c do jej średnicy d_c (rysunek 1). Pozostała część obciążenia od ciężaru zgromadzonego materiału G w silosie jest przekazywana bezpośrednio na płaskie dno lub lej silosu i oznaczona ją jako P_b . Całkowite obciążenie dna w silosie cylindrycznym można wyznaczyć na podstawie wartości pionowego parcia p_v (rysunek 1) na poziomie płaskiego dna lub przejścia płaszczu w lej, a przyjmuje ono wartość:

$$P_b = p_v \cdot \pi \cdot d_c^2 / 4 \quad (1)$$

gdzie: wartość parcia p_v wyznaczana jest na podstawie PN-EN 1991-4 lub mierzona podczas badań eksperymentalnych.

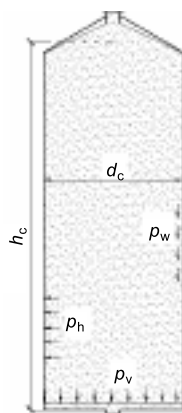
Wartość globalnego (wypadkowego) południkowego obciążenia całego płaszczu P_w można wyznaczyć z prostego warunku równowagi sił, co pozwala uzyskać zależność:

$$P_w = G - P_b \quad (2)$$

Porównując wartość globalnego obciążenia ściany silosu P_w z całkowitym ciężarem G zmagazynowanego w silosie materiału, można wyznaczyć współczynnik rozkładu globalnego obciążenia pionowego k , który przyjmuje wartość:

$$k = P_w / G \quad (3)$$

Teoretyczna wartość tego współczynnika wynosi $0 \leq k \leq 1,0$, a jego praktyczne znaczenie jest bardzo duże. Jeśli wartość współczynnika k będzie zbliżała się do 1,0, to oznacza, że prawie cały materiał składowany jest niejako zawieszony na płaszczu (np. przesklepiony). Jeśli natomiast wartość k zbliża się do zera, to występuje bardzo korzystna sytuacja parcia hydrostatycznego na dno silosu, co oznacza brak zawieszania się materiału składowanego na ścianach płaszczu. W takiej bardzo korzystnej sytuacji rozdział obciążenia pionowego płaszczu silosu nie stanowi przeszkody w swobodnym przesuwaniu się materiału składowanego w kierunku dna podczas opróżniania silosu. Jeśli materiał składowany znajdzie się na płaskim dnie, to są ogólnie znane i skuteczne techniki wybierania go z silosu, np. za pomocą przenośników ślimakowych. Osiągnięcie takiego stanu jest jednak bardzo trudne i do tej pory niemożliwe do uzyskania.



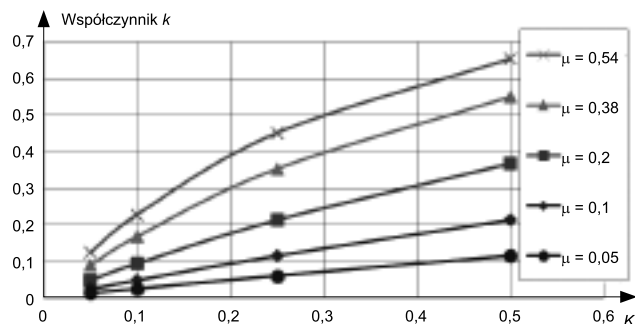
Rys. 1. Geometria i podstawowe parcia materiału wypełniającego w silosie

* Politechnika Wroclawska

W klasycznych silosach, o sztywnych ścianach płaszcz, wartość współczynnika k jest dość znaczna, a udział płaszcz silosu w przenoszeniu obciążeń od ciężaru materiału wypełniającego smukły silos przekracza z reguły 50% (rysunek 2, $k > 0,5$).

Wykres wartości współczynnika $k = k_r$ (stan po napełnieniu), przedstawiony na rysunku 2, sporządzony został na podstawie normowych (PN-EN 1991-4) wartości parcia p_v na płaskie dno walcowego silosu o średnicy $d_c = 6$ m i wysokości $h_c = 15$ m, w którym składowana jest pszenica o ciężarze objętościowym $\gamma = 8,0$ kN/m³. Wartość współczynnika k zależy w dużym stopniu od wartości ilorazu parcia bocznego K , która w rzeczywistości zależy m.in. od wilgotności materiału w silosie [3], [4]. Większa wartość wilgotności prowadzi do zmniejszenia ilorazu K , a więc i korzystnego zmniejszenia współczynnika k . Intensywne zraszanie składowanej biomasy nie jest jednak wskazane, gdyż zmniejsza wartość energetyczną paliwa oraz powoduje inne niekorzystne efekty.

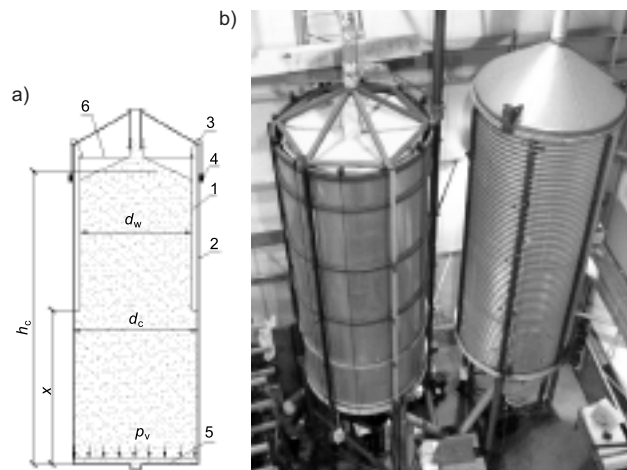
Skuteczną metodą zmniejszenia współczynnika k jest bardzo znaczne zmniejszenie współczynnika tarcia μ materiału składowanego o ściany płaszcz silosu (rysunek 2). Zmniejszenie współczynnika tarcia poniżej $\mu \leq 0,05$ jest technicznie bardzo trudne do osiągnięcia i byłoby niezwykle kosztowne, a dopiero wtedy można liczyć na znaczne odciążenie płaszcz, prowadzące do w miarę swobodnego przepływu materiału na dno podczas opróżniania.



Rys. 2. Wartość współczynnika k w smukłym silosie stalowym (opis w tekście)

Charakterystyka prototypowych konstrukcji silosów o wiotkich płaszczach

Podstawowe wymaganie, związane z zapewnieniem bezzakłócenowego przesuwania się materiału składowanego w kierunku płaskiego dna silosu, to prawie całkowite wyłączenie ścian płaszcz silosu z przyjmowania obciążenia pionowego G , pochodzącego od ciężaru tego materiału. Wartość współczynnika globalnego rozdziału obciążenia k powinna więc zbliżać się do zera. Uzyskanie bardzo niskiego współczynnika tarcia materiału o ścianę silosu $\mu \leq 0,05$ dałoby dość dobre rezultaty (rysunek 2), ale jest niezwykle trudne technicznie. Poszukiwano więc innych rozwiązań konstrukcyjnych. Przygotowano więc dwie koncepcje płaszcz silosów walcowych, wykonanych z tkanin technicznych, głównie poliamidowych, które zostały zastrzeżone w Urzędzie Patentowym RP pod numerami P. 402661 i P. 402662. Pierwsza z nich (rysunek 3a) polega na wyposażeniu istniejących silosów (2) z płaskimi dnami (5) w wewnętrzny



Rys. 3. Silos z wewnętrznym płaszczem tkaninowym: a) schemat konstrukcyjny; b) stanowisko badawcze – silos z płaszczem wewnętrznym po lewej stronie

płaszcz z tkaniny (1), a druga polega na realizacji niezależnych płaszcz tkaninowych w silosach wolno stojących, bez sztywnych osłonowych płaszcz zewnętrznych.

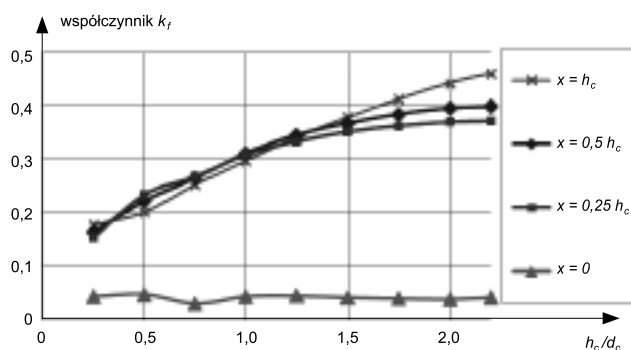
Wewnętrzny wiotki płaszcz tkaninowy (rysunek 3a) ma płaski dach tkaninowy (6) i nie jest podwieszony do stałej konstrukcji dachowej istniejącego silosu. Podtrzymanie cylindrycznego kształtu tego płaszcz w stanie opróżnionym zapewnione jest przez wiotkie cięgna, mocowane do górnej krawędzi płaszcz silosu i przerzucone przez rolki (3). Cięgna te mają na swych drugich końcach niewielkie obciążniki (ok. 2% ciężaru materiału wypełniającego G), które podnoszą samoczynnie wiotki płaszcz do góry po opróżnieniu silosu, przed jego kolejnym załadunkiem.

Podstawową zasadą w obu koncepcjach silosów o wiotkich płaszczach tkaninowych jest pozostawienie swobody odkształceń południkowych tych płaszcz podczas napełniania i opróżniania z materiału składowanego. Z uwagi na brak możliwości przenoszenia południkowych sił ściskających przez wiotki płaszcz tkaninowy, nie bierze on udziału w przenoszeniu obciążenia pionowego od ciężaru materiału składowanego G , a więc współczynnik $k = 0$ (spełniony cel poszukiwań). Gdyby wiotki płaszcz był podwieszony na górnej krawędzi do stałej konstrukcji wsporczej (np. dachu stałego silosu lub konstrukcji nadsilosowej), to nie osiągnięto by wartości $k \approx 0$, gdyż płaszcz ten przenosiłby południkowe siły rozciągające od tarcia materiału o jego ścianę, a więc brałby udział w przenoszeniu części obciążenia G .

W celu sprawdzenia skuteczności zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego wyposażono silos stalowy wysokości $h_c = 3,9$ m i średnicy $d_c = 1,8$ m w wewnętrzny płaszcz o średnicy $d_w = 1,6$ m, wykonany z tkaniny poliamidowej (rysunek 3b). Długość wiotkiego płaszcz była zmienna, a odległość jego dolnej krawędzi od płaskiego dna silosu (5) wynosiła $x = 0 \div 0,5h_c$. Badano również przypadek braku wewnętrznego, wiotkiego płaszcz ($x = h_c$) w celach porównawczych. Do górnej krawędzi wiotkiego płaszcz z wiotkim płaskim dachem zamocowano 12 wiotkich cięgien z ciężarkami 12 x 5 daN, aby utrzymywały one walcowy kształt pustego płaszcz (rysunek 3b) po opróżnieniu silosu i przed jego kolejnym załadunkiem. Silos wypełniany był droбноziarni-

stym granulatem polietylenowym HDPE ($\gamma = 5,6 \text{ kN/m}^3$), a maksymalny ciężar zgromadzonego materiału wynosił $47 \div 56 \text{ kN}$. Podczas opróżniania silosu wiotki płaski dach tworzył kształt pofalowanego stożka, a górna krawędź wiotkiego płaszczka obniżała się dość znacznie. Po opróżnieniu wracał on łatwo do swojego pierwotnego położenia, podnoszony przez obciążniki ciężien.

Dno stalowego silosu było płaskie i oddylatowane od walcowego płaszczka, opartego na 3 niezależnych słupach (dno również było oparte na 3 niezależnych słupach), pod którymi zainstalowane były siłomierze, rejestrujące pionowe obciążenia płaszczka i dna silosu. Stworzono tym samym możliwość łatwego wyznaczenia współczynnika globalnego rozdziału obciążeń k na podstawie wyników badań eksperymentalnych, wykorzystując wartości odczytów z zainstalowanych siłomierzy. Wyniki przeprowadzonych własnych badań eksperymentalnych pokazano na rysunku 4, na którym przedstawiono wartości współczynnika $k = k_f$ podczas napełniania silosu. Wartości tego współczynnika były podczas opróżniania praktycznie takie same, jeśli górna krawędź wiotkiego płaszczka miała całkowitą swobodę pionowych przemieszczeń. W przypadku częściowego zawieszenia się dachu wiotkiego płaszczka na rurze zasypowej, płaszcz ten przejmował wtedy część obciążeń od materiału wypełniającego silos ($k > 0$). Jest to ważna wskazówka do sposobu kształtowania górnej części wiotkiego płaszczka i miejsca mocowania ciężien, podnoszących płaszcz do góry.



Rys. 4. Wartość współczynnika $k = k_f$ w badanym silosie (rysunek 3) z wewnętrznym wiotkim płaszczem

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych (rysunek 4) wskazują na bardzo dobrą skuteczność zaproponowanego rozwiązania, polegającego na zainstalowaniu w istniejącym silosie stalowym wewnętrznego wiotkiego płaszczka o nieco mniejszej średnicy. Zadowalająca skuteczność osiągana jest dopiero w przypadku zastosowania wiotkiego płaszczka na całej wysokości silosu ($x = 0$), gdyż dopiero wtedy wartość współczynnika wynosi $k \approx 0$. Stosowanie wkładów z wiotkich płaszczek o małej długości ($x = 0,25h_c \div 0,5h_c$) skutkuje pewnym zmniejszeniem współczynnika k , ale nie jest to efekt wystarczający. Niewielkie wartości współczynnika k (zbliżone do zera na rysunku 4), uzyskane z zastosowaniem wiotkiego płaszczka na całej wysokości silosu ($x = 0$), wynikają z zastosowanych obciążników ciężien oraz trudnych do uniknięcia efektów wzajemnego oddziaływania płaskiego dna na płaszcz silosu, pomimo ich oddylatowania.

Wnioski

W silosach do składowania biomasy i innych trudno sypliwych materiałów występują często trudności w ich opróżnianiu, wywołane zawieszaniem się (przesklepianiem) materiałów składowanych na ścianach płaszczki silosów. Takie przesklepienia nie wystąpią, jeśli płaszcz silosu nie będzie miał dużego udziału w przejmowaniu obciążeń pionowych od ciężaru materiału wypełniającego G , reprezentowanego przez wprowadzony współczynnik k . Idealnym stanem, skutkującym w praktyce wyeliminowaniem utrudnień w opróżnianiu silosu płaskodennego, jest osiągnięcie wartości współczynnika globalnego rozdziału obciążeń $k = 0$. Naszym zdaniem uzyskanie wartości $k < 0,1$ może również przynieść dobre rezultaty.

Zaproponowane prototypowe rozwiązania konstrukcyjne silosów płaskodennych o wiotkich, tkaninowych płaszczkach (chronione zgłoszeniami patentowymi) pozwalają na praktyczne wyeliminowanie udziału płaszczka w przejmowaniu obciążeń pionowych od ciężaru materiału wypełniającego. W takim silosie parcie p_v na dno (rysunek 3a) jest zbliżone do parcia hydrostatycznego, co oznacza brak przeszkód w przepływie materiału w kierunku dna podczas opróżniania silosu. Rozładunek materiału znajdującego się na płaskim dnie jest łatwy od strony technicznej. Wyniki badań eksperymentalnych (rysunek 4) potwierdziły dobrą skuteczność zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych, których szczegóły i zastrzeżenia patentowe zawarte są w zgłoszeniach w Urzędzie Patentowym RP pod numerami P. 402661 i P. 402662.

Abstract

A serious problem that needs to be taken into account in the design of silos for storage of biomass is to ensure interference-free process of discharge. Due to specific properties of the biomass, resulting in the vaulting in the silo chambers and their dangerous phenomena of crumps, the need for such exploration of structures that would eliminate these unfavorable operation effects is very timely. One of such structures is to use the concept of flaccid, textile, cylindrical shells in flat-bottomed silos. Such flaccid shells might be used in existing already silos for biomass. The results of own experimental investigations show good efficacy of the proposed solution.

Literatura

- [1] Hotała E., Pawłowski K.: Badania stalowych silosów do składowania biomasy. Przegląd Budowlany, nr 5/2012.
- [2] Hotała E., Zambrowicz M.: Problemy składowania wybranych rodzajów biomasy w silosach z blachy falistej. Przegląd Budowlany, nr 5/2010.
- [3] Hotała E., Kuśnierek M.: Badania laboratoryjne wybranych właściwości biomas składowanych w silosach. Materiały Budowlane, nr 3/2013.
- [4] Stasiak M., Molenda M., Rusinek R., Horabik J.: Właściwości mechaniczne złoża nasion rzepaku wyznaczone w teście jednoosiowego ściskania. Acta Agrophysica, 2001, nr 46.
- [5] Hotała E.: Remonty i wzmocnianie silosów metalowych. Materiały XXIII Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Szczyrk, 5-8 marca 2008, T. 1.
- [6] Hotała E.: Awaryjność silosów z blachy falistej. Materiały Budowlane, nr 2/2006.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego
NCN nr 0998/B/T02/2011/40