

WYKORZYSTANIE ANIZOTROPII WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH  
ZŁOŻA ZIARNA DO REDUKCJI ASYMETRII OBCIĄŻENIA WYWOŁANEJ  
NIESYMETRYCZNYM OPRÓŻNIANIEM SILOSU

*J. Horabik<sup>1</sup>, M. Molenda<sup>1</sup>, I. J. Ross<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

<sup>2</sup>Biosystems and Agric. Engng Dept., University of Kentucky, Lexington, KY 40546, USA

e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl

**Streszczenie.** W pracy omówiono wyniki badań asymetrii obciążenia silosu zbożowego podczas niesymetrycznego napełniania i opróżniania. Badania przeprowadzono na modelowym silosie zbożowym o średnicy 2,44 m i wysokości 7,3 m wykonanym z blachy falistej. Wykazano, że do ograniczenia asymetrii obciążenia wywołanej niesymetrycznym opróżnianiem można wykorzystać anizotropię właściwości mechanicznych powstającą podczas niesymetrycznego napełniania.

**Słowa kluczowe:** ziarno zbóż, anizotropia, silos, napór.

WSTĘP

Do przechowywania ziarna zbóż coraz powszechniej stosuje się cienkościenne, blaszane silosy o płaskim dnie. Konstrukcje te rosnącą popularność zyskują dzięki niskiej cenie i licznym zaletom funkcjonalnym. Często zdarza się, że zbiorniki te są napełniane bądź opróżniane nieosiowo. Obserwacje użytkowników wskazują, że operacje takie prowadzić mogą do asymetrii obciążenia ściany powodującej owalizację jej przekroju, co po dłuższym czasie eksploatacji lub w przypadkach skrajnie wysokich wartości obciążeń powoduje awarie konstrukcji [8].

Nierównomierność obciążenia wynikająca ze zróżnicowania właściwości ciernych na powierzchni ściany oraz niedoskonałości kształtu geometrycznego

ściany obserwowano również w przypadku osiowego napełniania [5,7]. Inne powody zmienności obciążeń statycznych to nierównomierny rozkład gęstości złoża oraz anizotropia jego właściwości mechanicznych. Niesymetryczne napełnianie silosu wytwarza złoże o silnej anizotropii właściwości mechanicznych, co skutkuje znaczną asymetrią rozkładu naprężeń w złożu oraz asymetrią rozkładu naporu na ścianę i dno. Horabik i in. [2] jako przyczynę zaobserwowanej asymetrii obciążeń podają uporządkowanie orientacji przestrzennej ziaren złoża. Autorzy wprowadzili zmienny wewnątrz elementu różniczkowego Janssena kąt tarcia wewnętrznego, zależny od kąta zawartego pomiędzy kierunkiem wyróżnionej orientacji ziaren a kierunkiem przemieszczenia.

Szczególnie wysokie momenty zginające ścianę występują w przypadkach kiedy otwór wylotowy ze zbiornika umieszczony jest poza jego osią. Przy niesymetrycznym opróżnianiu obserwowano liczne awarie silosów, gdyż bardzo silna jest wtedy nierównomierność obciążeń. Kamiński [4] stwierdził, że wartości i rozkład naporu poziomego w trakcie niesymetrycznego opróżniania zależą także od rodzaju materiału sypkiego. W eksperymentach z pszenicą autor wykazał, że po stronie otworu wysypowego występował wzrost naporu poziomego na ścianę rzędu 100%. Wystąpiła też duża nierównomierność rozkładu naporu na ścianie po stronie wypływu. W dolnej strefie silosu rejestrowano spadek wartości naporu poziomego, zaś w strefie górnej – znaczne przyrosty. Maksymalny moment powstaje w przypadku umieszczenia wylotu w odległości od osi bliskiej 0,7 promienia silosu. Jego wartość jest wtedy kilkunastokrotnie wyższa niż przy wypływie osiowym, co praktycznie wyklucza stosowanie niesymetrycznego opróżniania [3]. Twórcy norm projektowania silosów zalecają unikanie niesymetrycznego opróżniania, gdyż trudno w tych warunkach oszacować obciążenie ściany [1]. Jedynie w ostatniej fazie rozładunku, kiedy materiał już nie wypływa przez centralny otwór wysypowy dopuszcza się stosowanie otworów zlokalizowanych mimośrodowo [4]. Mimo to niesymetryczne opróżnianie jest nadal powszechnie stosowane ze względu na wygodę i łatwość obsługi.

Celem niniejszej pracy jest wykazanie wpływu struktury upakowania złoża ziarna na jego właściwości mechaniczne oraz na rozkład naporu w silosie. Wyniki badań anizotropii właściwości mechanicznych złoża ziarna zastosowano do interpretacji wpływu metody napełniania silosu na rozkład naporu.

## ANIZOTROPIA ZŁOŻA ZIARNA

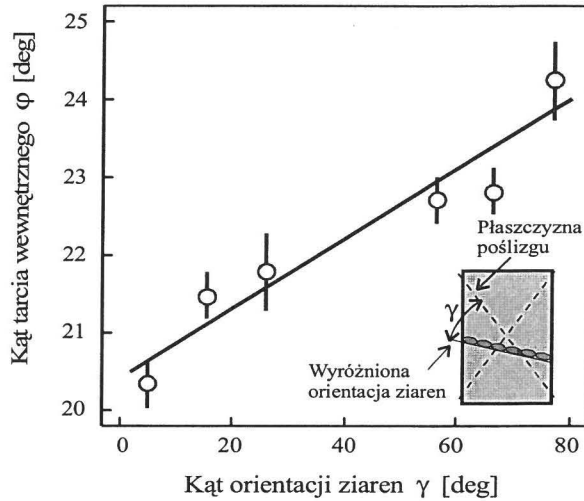
Wytrzymałość na ścinanie materiału sypkiego zależy od właściwości ciernych poszczególnych ziaren oraz od struktury upakowania złoża. Ziarna zbóż są wyraźnie niesferyczne. W przypadku pszenicy długość ziarna jest około dwukrotnie większa od szerokości. Jeżeli ziarna są zorientowane losowo i upakowane z jednakową gęstością, to ośrodek będzie jednorodny i izotropowy. Jeśli jednak w złożu materiału dominuje pewna wyróżniona orientacja najdłuższych osi niesferycznych ziaren, to ośrodek wykazuje własności anizotropowe - posiada różną wytrzymałość na ścinanie w różnych kierunkach. Ze względu na działanie sił grawitacji i występowanie tarcia między ziarnami trudno jest uformować próbkę materiału sypkiego o w pełni losowym rozkładzie orientacji ziaren.

Systematyczne badania wpływu struktury przestrzennego ułożenia ziaren ośrodka na właściwości mechaniczne zapoczątkował Oda [9]. Strukturę wzajemnego, przestrzennego ułożenia ziaren opisał dwoma parametrami uporządkowania: kierunkiem wyróżnionej orientacji najdłuższych osi ziaren względem wybranego układu odniesienia oraz intensywności równoległego ułożenia osi ziaren. Autor wprowadził też rozróżnienie dwóch typów anizotropii wywołanej przestrzennym uporządkowaniem ziaren: anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem ułożenia niesferycznych ziaren oraz anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem koncentracji kierunków normalnych w punktach styku ziaren. Gdy ośrodek składa się z niesferycznych ziaren mogą wystąpić obydwa typy anizotropii, natomiast gdy ośrodek składa się z ziaren sferycznych pojawić może się jedynie drugi typ anizotropii.

W wyniku powszechnie stosowanych sposobów przemieszczania materiału sypkiego często tworzy się struktura z pewną wyróżnioną orientacją ziaren. Przykładowo, w trakcie powolnego zsuwania się ziarna wzdłuż powierzchni stożka naturalnego usypu ziarna zatrzymują się na ogół najdłuższą osią wzdłuż tworzącej stożka.

Molenda i in. [6] badali szczegółowo wpływ wyróżnionej orientacji ziarna zbóż, powstającej na skutek zsuwania się ziarna wzdłuż powierzchni stożka naturalnego usypu, na kąt tarcia wewnętrznego. Pomiarzy przeprowadzone metodą trójosiowego ściskania oraz bezpośredniego ścinania na dużych próbkach materiału sypkiego (średnica próbki trójosiowego ściskania  $D = 150$  mm, bezpośredniego ścinania - 210 mm) wykazały, że kąt tarcia wewnętrznego rośnie ze wzrostem kąta zawartego między kierunkiem wyróżnionej orientacji ziarna a kierunkiem poślizgu. Przyczyną jest różny, w różnych kierunkach, udział składowej geometrycznej

w wypadkowym oporze tarcia. W przypadku ziarna pszenicy kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany metodą trójosiowego ściskania zmieniał się w zakresie od  $20,4$  do  $24,4^\circ$  (Rys. 1).



**Rys. 1.** Wpływ orientacji przestrzennej ziarna pszenicy na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany metodą trójosiowego ściskania.

**Fig. 1.** The influence of the spatial orientation of wheat grain on the angle of internal friction determined in the triaxial compression test.

## APARATURA I PROGRAM BADAŃ

Badania eksperymentalne rozkładu obciążenia wykonano w Laboratorium Materiałów Sypkich Wydziału Biosystemów i Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Kentucky w Lexington w USA na modelowym silosie o średnicy  $2,44$  m i wysokości  $7,3$  m wykonanym z blachy falistej. Skok profilu blachy wynosił  $67,5$  mm zaś amplituda była równa  $13$  mm. Ścianę i płaskie dno silosu podparto niezależnie, każdy element na trzech tensometrycznych przetwornikach siły. Punkty podparcia ułożono symetrycznie względem osi, na tej samej wysokości, co  $120^\circ$ . Lokalizację przetworników siły i otworów wysypowych w przyjętym układzie współrzędnych przedstawia Rys. 2.

Na podstawie wskazań trzech czujników siły podpierających ścianę ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) wyznaczano wypadkową siłę,  $F_z$ , wywieraną w kierunku pionowym przez ziarno, wypadkowy moment siły,  $M$ , stanowiący globalną miarę asymetrii obciążenia oraz jego orientację,  $\alpha_0$ , względem przyjętego układu współrzędnych:

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (2)$$

$$\alpha_o = \arcsin \frac{M_y}{M} \quad \text{dla } M \neq 0 \quad (3)$$

gdzie:

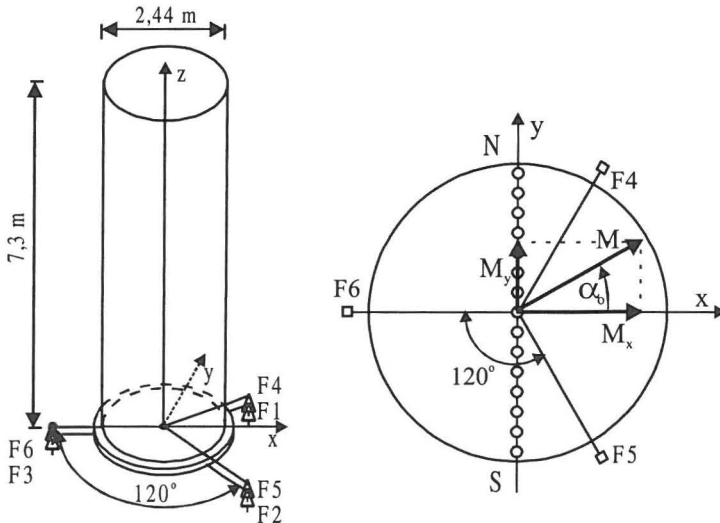
$$M_x = R(F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 + F_3 \sin \alpha_3), \text{ [N}\cdot\text{m];}$$

$$M_y = -R(F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 + F_3 \cos \alpha_3), \text{ [N}\cdot\text{m];}$$

$F_1, F_2, F_3$  – siła wskazywana przez czujniki 1, 2 i 3, [N];

$R$  – promień, [m];

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - współrzędne katowe czujników siły 1, 2 i 3 [0°, 120° i 240°].



Rys. 2. Schemat układu eksperymentalnego.

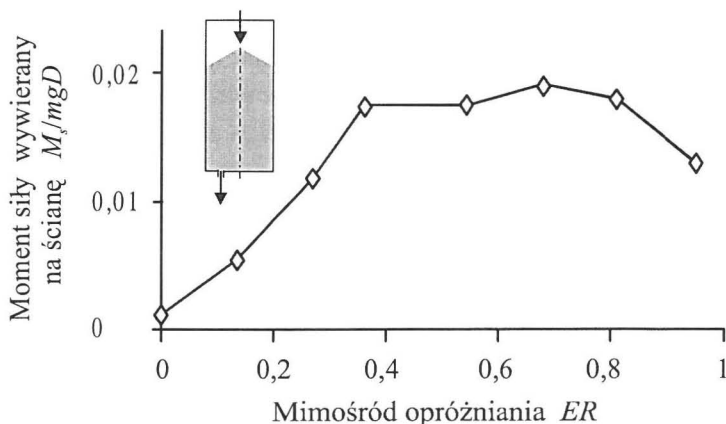
Fig. 2. Scheme of the experimental set.

W górnej części silosu zamontowano urządzenie skupiające i kierujące strumień ziarna wąską, pionową strugą. Zbiornik napełniano do wysokości  $4,9 \text{ m}$  ( $H/D = 2,0$ ) osiowo oraz przez otwór zasypowy usytuowany w odległości  $0,5 R$  oraz  $0,7 R$  od osi zbiornika. Następnie po 30 min. spoczynku zbiornik opróżniano symetrycznie oraz niesymetrycznie przez jeden z 15 otworów wysypowych. W przypadku napełniania niesymetrycznego zbiornik opróżniano przez otwory wysypowe usytuowane w odległości  $e = 0,5 R$  bądź  $0,7 R$  po obu stronach osi

wzdłuż średnicy silosu równoległej do linii wyznaczonej przez środki otworów zasypowych. Silos napełniano pszenicą klasy Soft Red Winter Wheat o wilgotności kondycjonalnej za pomocą przenośnika zgrzeblowego z szybkością  $250 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### WYNIKI

Rysunek 3 przedstawia bezwymiarowy moment siły,  $M/mgD$ , (iloraz momentu  $M$  wyznaczonego zgodnie z równanie (2) i ciężaru ziarna oraz średnicy zbiornika,  $mgD$ ) w funkcji mimośrodu opróżniania,  $ER = e/R$ , dla przypadku symetrycznego napełniania. Moment siły, będący globalną miarą asymetrii obciążenia, osiąga największą wartość przy mimośrodku opróżniania w zakresie 0,4-0,8.



Rys. 3. Moment siły wywierany na ścianę zbiornika w funkcji mimośrodu otworu wysypowego.

Fig. 3. Moment of force exerted on the silo wall as influenced by the orifice eccentricity ratio.

W Tabeli 1 zestawiono wartości momentu siły wywieranego na ścianę otrzymanego podczas niesymetrycznego napełniania i opróżniania. Moment statyczny  $M_s$  wyznaczano z wartości sił zmierzonych po 30 minutowym spoczynku tuż przed rozpoczęciem opróżniania, a moment dynamiczny  $M_d$  po 120 sekundach od rozpoczęcia wypływu.

Przy napełnianiu symetrycznym uzyskiwano wartości momentu statycznego w zakresie od 0,4 do 1,9 kN·m. Przy napełnianiu z kanału zasypowego położonego w odległości  $0,5 R$  otrzymano wartości  $M_s$  od 6,84 kN·m do 7,42 kN·m, zaś przy napełnianiu z kanału zasypowego położonego w odległości  $0,75 R$  otrzymano wartości  $M_s$  w zakresie od 6,95 kN·m do 7,92 kN·m. Napełnianie niesymetryczne wytwarzało statyczny moment obciążenia ściany wielokrotnie wyższy niż

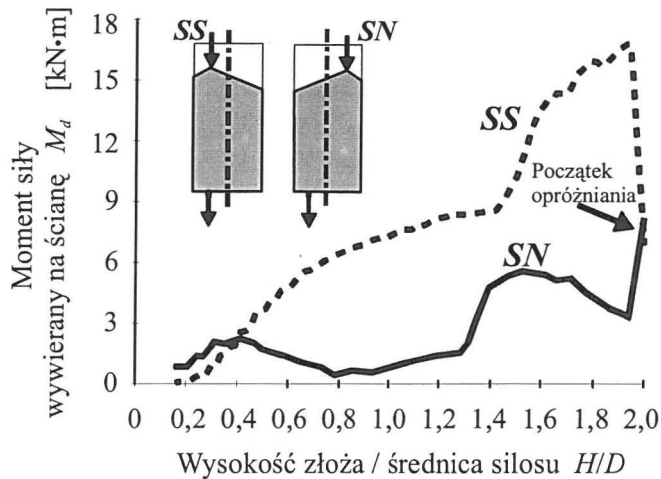
napełnianie osiowe. Zwiększenie mimośrodowo napełniania o 25% skutkowało stosunkowo niewielką zmianą asymetrii obciążenia statycznego. Rozpoczęcie niesymetrycznego opróżniania po symetrycznym napełnianiu spowodowało w obu przypadkach (mimośród  $0,7 N$  i  $0,7 S$ ) przyrost momentu do około  $11,2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ . W przypadku symetrycznego opróżniania po symetrycznym napełnianiu moment przyrósł od  $1,93 \text{ kN}\cdot\text{m}$  do  $2,13 \text{ kN}\cdot\text{m}$  i był ponad pięciokrotnie niższy niż przy opróżnianiu niesymetrycznym.

**Tabela 1.** Statyczny  $M_s$  i dynamiczny  $M_d$  moment siły wywierany na ścianę silosu przy różnych lokalizacjach otworu zasypowego i wysypowego

**Table 1.** Statical  $M_s$  and dynamical  $M_d$  moment of force exerted on the silo wall for different locations of filling and discharge gates

Mimośród napełniania	Mimośród opróżniania	Moment siły $M_s$ [kN·m]	Moment siły $M_d$ [kN·m]
0	0	1,93	2,13
0	$0,7 N$	0,41	11,27
0	$0,7 S$	0,96	11,17
$0,5 S$	0	6,84	6,60
$0,5 S$	$0,7 N$	7,27	4,75
$0,5 S$	$0,7 S$	7,42	17,50
$0,75 S$	0	7,92	6,37
$0,75 S$	$0,7 N$	8,33	3,21
$0,75 S$	$0,7 S$	6,95	17,50

Stwierdzono, że wpływ niesymetrycznego opróżniania na asymetrię rozkładu naporu może być częściowo zredukowany poprzez zastosowanie niesymetrycznego napełniania. Rysunek 4 przedstawia przebiegi momentu wywieranego na ścianę w trakcie opróżniania przez otwory  $0,7 S$  i  $0,7 N$  po napełnianiu z otworu zasypowego o mimośrodku  $0,7 S$ . W przypadku położenia otworów zasypowego i wysypowego po tej samej stronie osi (oznaczenie  $SS$ ) po rozpoczęciu wypływu nastąpił skok momentu od wartości  $6,95 \text{ kN}\cdot\text{m}$  do  $17,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , po którym moment malał, początkowo szybko, a w dalszym przebiegu wolniej. W przypadku położenia otworów zasypowego i wysypowego po przeciwnych stronach osi (oznaczenie  $SN$ ) po rozpoczęciu wypływu nastąpił spadek momentu od wartości  $8,3 \text{ kN}\cdot\text{m}$  do  $3,2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , po którym moment początkowo przyrósł nie osiągając jednak wartości  $M_s$ . Najwyższe obserwowane statyczne momenty spowodowane niesymetrycznym napełnianiem stanowiły około 70% najwyższych momentów spowodowanych niesymetrycznym opróżnianiem po symetrycznym napełnianiu.

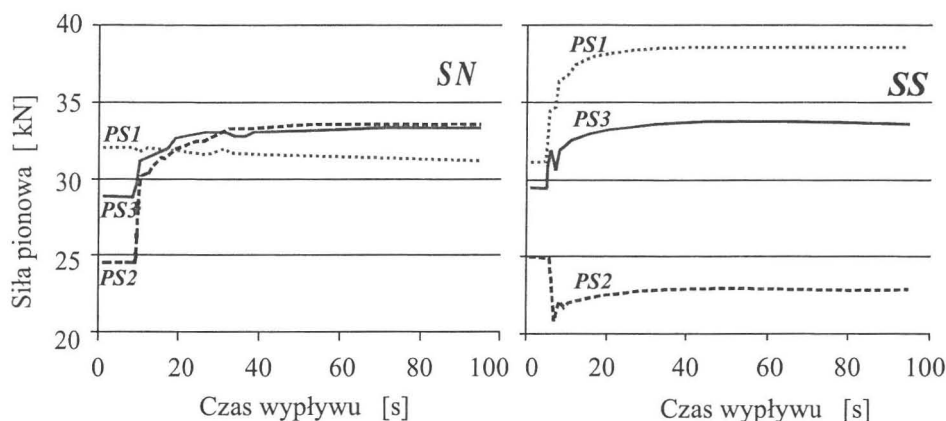


**Rys. 4.** Moment siły wywierany na ścianę zbiornika podczas nieosiowego opróżniania dla dwóch lokalizacji otworu zasypowego i wysypowego: *SS* - po tej samej stronie, *SN* - po przeciwnych stronach silosu.

**Fig. 4.** Moment of force exerted on the silo wall during off-center discharge for two localizations of filling and discharging gates: *SS* – on the same side, *SN* – on opposite sides of the silo.

W celu bardziej szczegółowej analizy przebiegu dynamicznego przeciążenia ściany zmiany obciążenia w chwili rozpoczęcia wypływu mierzono w odstępie 0,1 s. Rysunek 5 przedstawia wartości sił zmierzone na kilkanaście sekund przed uruchomieniem wypływu oraz w trakcie pierwszych 80 s wypływu. W wariancie *SN* w stanie statycznym najwyższe jest obciążenie przetwornika *PS1* (32 kN) położonego najbliżej osi strumienia ziarna wssypującego się do silosu. Najniższe jest obciążenie przetwornika *PS2* (24,6 kN) położonego najdalej od osi strumienia ziarna, pośrednią wartość przyjmuje *PS3* (28,9 kN). Rozpoczęcie wypływu powoduje najwyższy przyrost, najniższej w spoczynku, siły obciążającej przetwornik *PS2* (do 33,4 kN) najbliższy otworu wysypowego. Tylko nieznacznie zmienia się obciążenie przetwornika *PS1* położonego najdalej od otworu wysypowego, zaś *PS3* przyrasta do 33,4 kN. W efekcie następuje zmiana zwrotu wektora momentu o około 180°, ściana zginana jest w przeciwną stronę niż w stanie statycznym. W wariancie *SS* w wyniku identycznego sposobu napełniania obciążenia statyczne są bardzo bliskie tym z wariantu *SN* (*PS1* - 31,2 kN, *PS2* - 25 kN i *PS3* - 29,4 kN). Po rozpoczęciu wypływu nie następuje jednak zmiana zwrotu wektora momentu, ponieważ *PS1* przyrasta do 38,6 kN, *PS2* maleje do 23 kN, zaś *PS3* przyrasta podobnie jak w wariancie *SN* do 33,8 kN.





**Rys. 5.** Rozkład pionowego obciążenia czujników siły podpierających ścianę podczas nieosiowego opróżniania dla dwóch lokalizacji otworu zasypowego i wysypowego: *SS* - po tej samej stronie, *SN* - po przeciwnych stronach silosu.

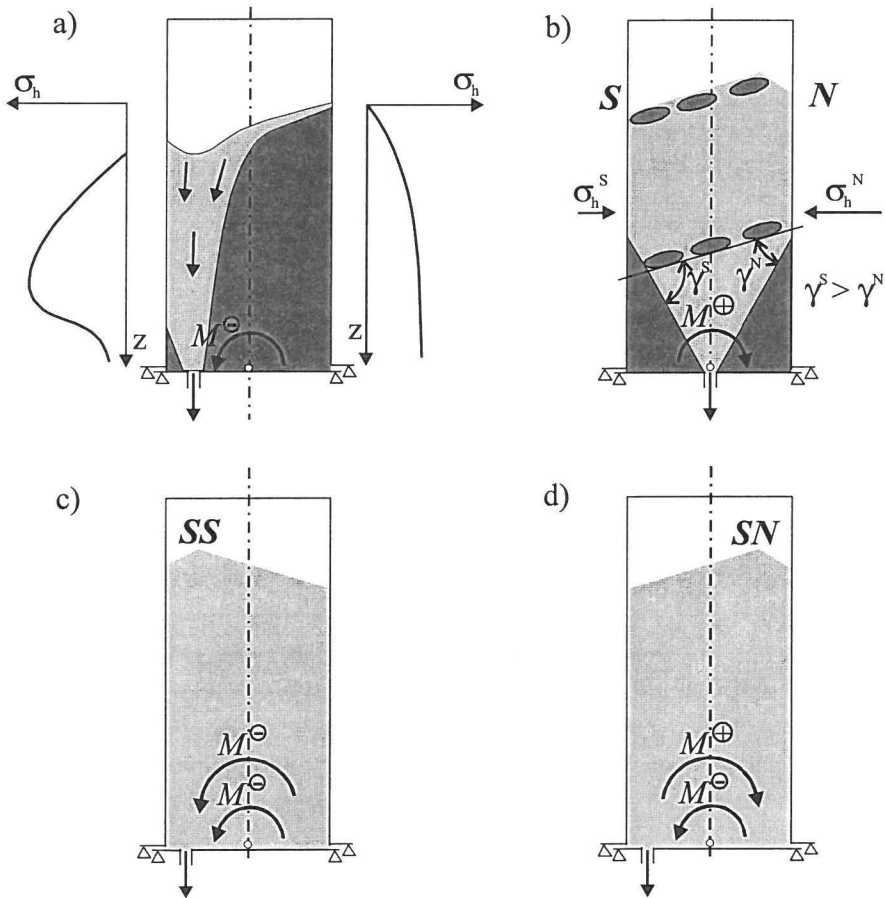
**Fig. 5.** Distribution of vertical force between load cells supporting the wall during off-center discharge for two localizations of filling and discharging gates: *SS* – on the same side, *SN* – on opposite sides of the silo.

W stanie równowagi statycznej najbardziej obciążony jest przetwornik siły najbliższy osi strumienia spadającego ziarna. Po rozpoczęciu wypływu najbardziej przyrasta obciążenie przetwornika siły najbliższego otworu wysypowego. Dlatego w przypadku położenia otworów zasypowego i wysypowego po tej samej stronie zbiornika uruchomienie wypływu wzmacnia nierównomierność obciążenia wytworzoną niesymetrycznym napełnianiem lub redukuje ją jeśli otwory ulokowane są po stronach przeciwnych.

Interpretację oddziaływań zachodzących w materiale sypkim w zbiorniku przedstawia Rys. 6. Podczas niesymetrycznego opróżniania powstaje rdzeń przepływu odchylony o pewien kąt od pionu. Wyniki licznych badań eksperymentalnych wskazują, że za wyjątkiem obszaru bezpośrednio sąsiadującego z otworem wysypowym napór na ścianę po stronie wypływu jest dużo większy niż po stronie przeciwnej [4]. Na skutek tego wypadkowy moment siły wywierany przez materiał sypki na ścianę będzie miał zwrot jak na Rys. 6a.

W przypadku nieosiowego napełniania (Rys. 6b) kąt  $\gamma$  zawarty pomiędzy kierunkiem dominującej orientacji ziaren a kierunkiem tworzącej stożka martwej strefy ziarna jest większy po stronie zbiornika *S* niż *N*. Skutkiem tego kąt tarcia wewnętrznego w obszarze ruchu ziarna względem martwej strefy będzie, podobnie jak kąt  $\gamma$  (Rys. 1), większy po stronie *S* niż *N*. Ponieważ iloraz naporu

poziomego do pionowego maleje ze wzrostem kąta tarcia wewnętrznego, zatem napór poziomy na ścianę,  $\sigma_h$ , będzie większy po stronie napełniania niż po stronie przeciwnej ( $\sigma_h^N > \sigma_h^S$ , Rys. 6b). Wypadkowy moment siły wywierany przez ziarno na ścianę będzie miał zwrot jak na Rys. 6b. W przypadku zastosowania zarówno nieosiowego napełniania jak i opróżniania momenty siły wywierane przez ziarno na ścianę zbiornika mogą sumować się (Rys. 6c) bądź redukować (Rys. 6d), zależnie od wzajemnego położenia otworu zasypowego i wysypowego.



**Rys. 6.** Ilustracja mechanizmów powstawania asymetrii naporu: a) nieosiowe opróżnianie, b) nieosiowe napełnianie, c) i d) oba procesy naraz.

**Fig. 6.** Illustration of mechanisms of silo pressure asymmetry: a) off-center discharge, b) off-center filling, c) and d) both of them.

## PODSUMOWANIE

Jedną ze znanych przyczyn awarii silosów jest niesymetryczne opróżnianie, które powoduje niebezpieczny dla konstrukcji zbiornika niesymetryczny rozkład obciążeń. Do ograniczenia asymetrii rozkładu naporu wywołanej niesymetrycznym opróżnianiem wykorzystać można anizotropię właściwości mechanicznych złoża ziarna również powodującą asymetrię rozkładu naporu. Stwierdzono, że niesymetryczne napełnianie wzmacnia lub osłabia asymetrię rozkładu naporu wynikającą z niesymetrycznego opróżniania zależnie od wzajemnego położenia otworów zasypowego i wysypowego. W przypadku położenia otworu zasypowego i wysypowego po tej samej stronie osi silosu uruchomienie wypływu powodowało wzrost asymetrii naporu. Natomiast w przypadku umieszczenia otworu zasypowego po stronie przeciwnej do położenia otworu wysypowego wypadkowy moment siły wywierany przez ziarno na ścianę, będący globalną miarą asymetrii naporu, ulegał istotnej redukcji. Oznacza to, że formując odpowiednio strukturę złoża materiału w silosie, poprzez np. odpowiedni sposób napełniania, można w znacznym stopniu ograniczyć asymetrię obciążenia.

## PIŚMIENNICTWO

1. **ASAE Standards EP433:** Loads exerted by free-flowing grain on bins. ASAE, St. Joseph, MI, 49085-9659, pp 693-696, 1999.
2. **Horabik J., Ross I.J., Schwab C.V.:** Effects of spatial orientation on grain load distribution. Transactions of the ASAE, 31(6), 1787-1793, 1988.
3. **Horabik J., C.V. Schwab C.V., Ross I.J.:** Non-symmetrical loads in a model grain bin during eccentric discharge. Transactions of the ASAE, 35(3), 987-992, 1992.
4. **Kamiński M.:** Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 41, 1986.
5. **Łapko A.:** Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, nr 71, 1989.
6. **Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.:** Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
7. **Nielsen J.:** Load distribution in silos influenced by anisotropic grain behavior. International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, New Castle, NSW, Australia, August, 1983.
8. **Nohr R.M.:** Grain storage bin discharges. ASAE Paper No. MCR 85-146. St Joseph, Mich., ASAE, 1985.
9. **Oda M.:** Fabrics and their effects on the deformation behaviours of sands. Dept. Found. Engng, Fac. Engng, Saitama University, Special Issue, 1976.

APPLICATION OF THE ANISOTROPY OF MECHANICAL  
PROPERTIES OF BEDDING OF GRAIN FOR REDUCTION OF SILO LOAD  
ASYMMETRY RESULTING FROM OFF-CENTER DISCHARGE

*J. Horabik<sup>1</sup>, M. Molenda<sup>1</sup>, I.J. Ross<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences  
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

<sup>2</sup>Biosystems and Agric. Engng Dept., University of Kentucky, Lexington, KY 40546, USA  
e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The objective of the paper was to study pressure asymmetry in a grain silo resulting from eccentric filling and discharging. The corrugated wall model silo of 2,44 m in diameter and 7,3 m high was used for the study. It was found that the anisotropy of the mass of grain resulting from off-center filling can be used for reduction of the load asymmetry resulting from off-center discharge.

Key words: cereal grains, silo, pressure, load asymmetry, anisotropy.