

## ROZKŁAD OBCIĄŻENIA W MODELOWYM SILOSIE ZBOŻOWYM PODCZAS CZĘŚCIOWEGO NAPELNIANIA I OPRÓŻNIANIA<sup>1</sup>

*J. Horabik, M. Molenda, I.J. Ross\**

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

\*Biosystems and Agric. Engng Dept., University of Kentucky

Lexington, KY 40546, USA

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

**Streszczenie:** Badano wpływ różnych procedur napełniania i opróżniania silosu zbożowego na obciążenie ściany zbiornika. Pomiar pionowego obciążenia ściany ziarnem pszenicy klasy soft red winter przeprowadzono na modelowym zbiorniku wykonanym z gładkiej blachy stalowej o średnicy 2,4 m oraz wysokości 7,3 m. Zastosowane procedury częściowego opróżniania i dopełniania silosu małymi porcjami pozwalają na redukcję dynamicznego przeciążenia podczas opróżniania.

**Słowa kluczowe:** pszenica, napór, tarcie, silos

### WSTĘP

W praktycznych warunkach magazynowania ziarna często zdarza się, że napełniony zbożem silos jest częściowo opróżniany, a następnie ponownie napełniany. Pewna część ziarna pozostaje w silosie wielokrotnie dłużej niż pozostała i podlega cyklicznym obciążeniom. Ziarno zbóż reaguje na historię obciążenia jak ciało sprężysto-plastyczne. Różne procedury częściowego napełniania, opróżniania i ponownego napełniania w różny sposób wpływają na rozkład naprężenia w złożu ziarna. Wpływ ten obejmuje również rozkład

---

<sup>1</sup> Część badań wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 P06F 021 17 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999-2002.

obciążenia na konstrukcję silosu oraz rodzaj przepływu, jaki uformuje się w zbiorniku podczas opróżniania.

Historia obciążenia wpływa w sposób złożony na zależność naprężenie-odkształcenie w materiałach sypkich. Ishihara [5] wykazał, że należy rozważać oddzielnie dwa różne przypadki historii obciążenia: wstępne zagęszczanie oraz wstępne ścinanie. W wyniku wstępnego zagęszczania powstaje izotropowa konsolidacja materiału. Niewielkie wstępne ścinanie powoduje zmianę właściwości materiału jedynie w przypadku ponownego obciążenia w tym samym kierunku, zaś duże wstępne ścinanie zmienia właściwości materiału we wszystkich kierunkach ponownego obciążania. Zhang i in. [11] wykazali, że zachowanie się ziarna pszenicy podczas cykli obciążania i odciążania dobrze opisuje sprężysto-plastyczny model ośrodka sypkiego, w którym warunek plastyczności podlega izotropowemu oraz kinematycznemu wzmocnieniu.

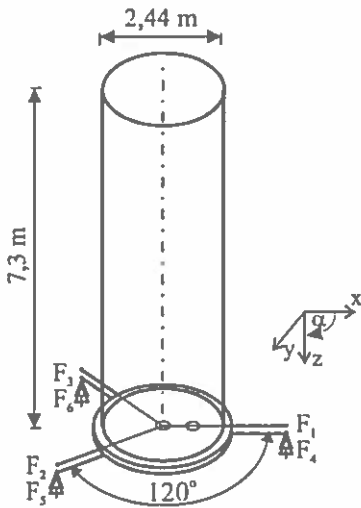
Cykliczne obciążenie ziarna w zbiorniku podczas częściowego opróżniania i napełniania jest jakościowo podobne do cyklicznego zagęszczania materiału sypkiego w edometrze. Sawicki [8,9] zwraca uwagę na trzy różne fazy cyklu obciążenie-odciążenie materiału sypkiego podczas badań edometrycznych. Podczas obciążania zachodzi odwracalne oraz nieodwracalne zagęszczanie. W pierwszym etapie odciążania odpowiedź materiału jest wyłącznie odwracalna. W drugim etapie odciążania przyrost objętości (dylatacja) następuje w wyniku odkształcenia sprężystego i plastycznego. Podobne etapy można wyróżnić w trakcie częściowego opróżniania i napełniania zbiornika.

Celem podjętych badań było określenie wpływu historii użytkowania modelowego silosu na rozkład obciążenia na ścianę i dno zbiornika. Przeprowadzono cykle częściowego napełniania oraz opróżniania zbiornika według trzech różnych schematów i określono wpływ zastosowanej procedury na rozkład obciążenia.

#### STANOWISKO POMIAROWE I METODA BADAŃ

Badania doświadczalne przeprowadzono na modelowym silosie zbożowym wykonanym z gładkiej blachy stalowej o średnicy  $D=2,4$  m oraz wysokości  $H=7,3$  m w Uniwersytecie Kentucky w Lexington w USA. Ściana zbiornika oraz płaskie dno podparte były oddzielnie, każde na trzech czujnikach siły rozmieszczonych symetrycznie, co  $120^\circ$  (Rys. 1). Dzięki temu możliwe było rozdzielenie całkowitego pionowego obciążenia ściany od obciążenia dna. Dolna część ściany zbiornika została osadzona w koszu o wysokości 1 m wykonanym ze

stalowej kratownicy w celu usztywnienia konstrukcji. Zbiornik napełniano centrycznie zwartym strumieniem ze stałej wysokości 1,5 m powyżej górnej powierzchni zbiornika z prędkością  $16,7 \text{ m}^3/\text{h}$ . Opróżniano centrycznie bądź niecentrycznie przez usytuowany w dnie otwór wysypowy o średnicy 8,9 cm. Prędkość przemieszczania się słupa ziarna względem ściany zbiornika wynosiła  $3,1 \text{ m/h}$ . Podczas napełniania i opróżniania obciążenie pionowe ściany i dna mierzono co 1 minutę, zaś podczas spoczynku ziarna co 1 godzinę. Dokładność pomiaru siły wynosiła  $\pm 50 \text{ N}$ .



Rys. 1. Schemat modelowego zbiornika.  $F_1, F_2, F_3$  – czujniki podpierające ścianę,  $F_4, F_5, F_6$  – czujniki podpierające dno.

Fig. 1. Schematic diagram of the model bin.  $F_1, F_2, F_3$  – wall load cells,  $F_4, F_5, F_6$  – floor load cells.

W celu przeprowadzenia eksperymentu w warunkach maksymalnie zbliżonych do występujących w rzeczywistości zbiornik napełniano ziarnem do pewnej wysokości. Następnie po upływie 24 godzin częściowo opróżniano i po kolejnej 24-godzinnej przerwie ponownie dopełniano. Wykonano trzy serie eksperymentów z różnymi procedurami napełniania i opróżniania. Każdą serię eksperymentów powtarzano trzykrotnie. Do badań użyto ziarna pszenicy klasy soft red winter o gęstości usypnej  $750 \text{ kg/m}^3$  i wilgotności 11,5%.

W pierwszej serii eksperymentów zbiornik napełniano każdorazowo do wysokości  $H/D=2,75$  a następnie opróżniano do momentu, gdy całkowite pionowe obciążenie ściany zmalało do zera, co występowało przy wartości  $H/D$  ok. 1,5. Przy tej wysokości napełnienia skierowana w dół siła tarcia pochodząca od przemieszczającego się ziarna była równoważona przez skierowaną w górę siłę pochodzącą od ziarna zgromadzonego w martwej strefie nad dnem zbiornika. Malejący nacisk wypływającego ziarna na martwą strefę powodował sprężystą

oraz plastyczną dylatację [8], w wyniku czego siła tarcia o ścianę była skierowana w górę [2]. Pełny eksperyment obejmował pięć cykli napełniania i opróżniania.

W drugiej serii eksperymentów zbiornik napełniano do wysokości  $H/D=1,5$ , a następnie opróżniano do momentu, gdy całkowite pionowe obciążenie ściany zmalało do zera. W każdym kolejnym cyklu zbiornik napełniano do wysokości wyższej od poprzedniej o  $H/D=0,25$ . Po zakończeniu całego cyklu wykonywano eksperyment składający się z pojedynczego cyklu napełnienia zbiornika do wysokości  $H/D=1,75$  i kompletnego opróżnienia w celu dodatkowego porównania wykonanej serii z pojedynczym pełnym cyklem [4].

W trzeciej serii eksperymentów zbiornik napełniano do wysokości  $H/D=2,75$  a następnie opróżniano do wysokości  $H/D=2$ . Zbiornik opróżniano na przemian niecentrycznie i centrycznie w celu określenia trwałego wpływu niecentrycznego opróżniania na wartość momentu siły.

#### WYNIKI BADAŃ

Wypadkową siłę w kierunku pionowym wywieraną przez ziarno,  $F_z$ , oraz moment siły,  $M$ , obliczano ze wskazań trzech czujników siły podpierających ścianę bądź dno:

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

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

gdzie:

$$M_x = R(F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 + F_3 \sin \alpha_3)$$

$$M_y = R(F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 + F_3 \cos \alpha_3)$$

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

$R$  – promień [m],

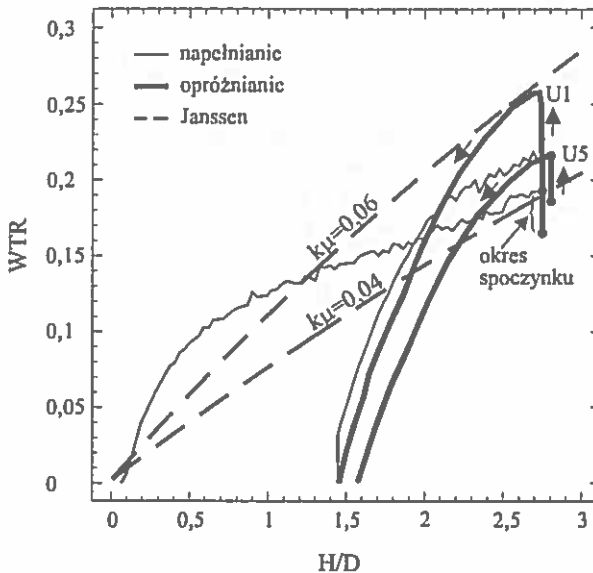
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - współrzędne kątowe czujników siły 1, 2 i 3 ( $0^\circ, 120^\circ$  i  $240^\circ$ ).

Eksperymentalne przebiegi ilorazu pionowego obciążenia ściany do ciężaru ziarna w zbiorniku ( $WTR$ ) w funkcji wysokości słupa ziarna w zbiorniku odniesionej do średnicy zbiornika ( $H/D$ ) aproksymowano równaniem Janssena [6] scalkowanym po powierzchni ściany [3]:

$$WTR = 1 - \frac{1 - e^{-4k\mu \frac{H}{D}}}{4k\mu \frac{H}{D}} \quad (3)$$

gdzie:

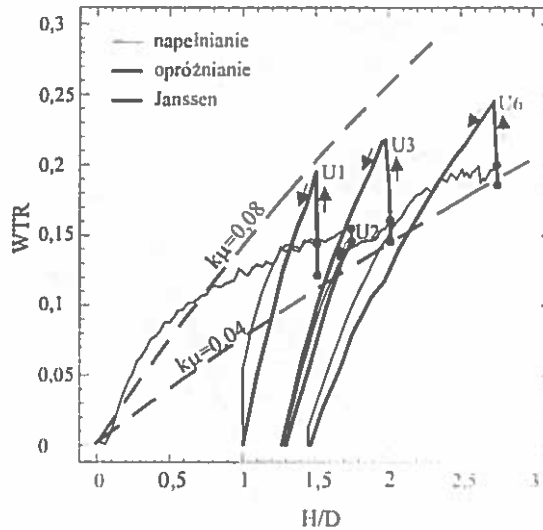
$k$  – iloraz poziomego i pionowego naporu,  
 $\mu$  – współczynnik tarcia ziarna o ścianę zbiornika.



Rys. 2. Przebiegi ilorazu obciążenia ściany do ciężaru ziarna ( $WTR$ ) w funkcji  $H/D$  podczas cykli napełniania i opróżniania zbiornika do tej samej wysokości  $H/D$ .

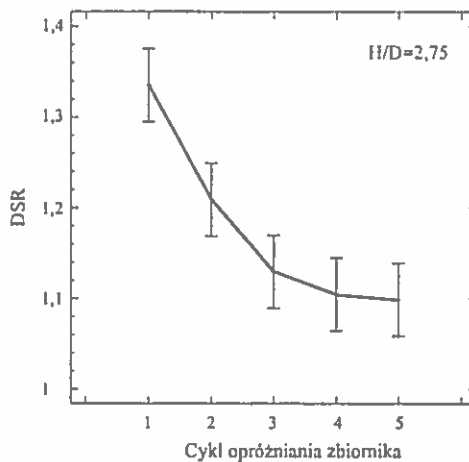
Fig. 2. Verical wall load-to-total grain load ratio ( $WTR$ ) as effected by the height-to diameter ratio ( $H/D$ ) during cycles of the same  $H/D$  fill ratios.

Eksperymentalne przebiegi  $WTR$  w funkcji  $H/D$  podczas pierwszego napełniania, spoczynku i początkowego okresu opróżniania dla pierwszej serii pomiarów aproksymowane równaniem (3) przedstawiono na Rys. 2.  $U1$  oznacza pierwsze opróżnianie zbiornika, zaś  $U5$  piąte. Aproksymacja przebiegów eksperymetalnych równaniem (3) przy wartościach iloczynu  $k\mu$  w zakresie od 0,04 do 0,08 stanowi obwiednię całego zakresu wartości  $WTR$ . Przyjmując typową dla pszenicy wartość ilorazu naporu  $k=0,5$  [1,7] współczynnik tarcia ziarna o ścianę  $\mu$  znajduje się w przedziale od 0,08 do 0,12, co odpowiada typowemu zakresowi wartości współczynnika tarcia ziarna pszenicy o gładką blachę stalową [10]. Analogiczne przebiegi  $WTR(H/D)$  dla drugiej serii eksperymentów wraz z aproksymacją równaniem (3) dla wartości  $k\mu$  w zakresie od 0,04 do 0,08 przedstawiono na rysunku 3. Udział w wypadkowej pionowej sile



Rys. 3. Iloraz obciążenia ściany do ciężaru ziarna (WTR) w funkcji H/D podczas cykli napelniania do różnej wysokości H/D.

Fig. 3. Vertical wall load-to-total grain load ratio (WTR) as effected by the height-to diameter ratio (H/D) during cycles of different H/D fill ratios.



Rys. 4. Iloraz dynamicznego do statycznego obciążenia ściany (DSR) w kolejnych cyklach opróżniania zbiornika.

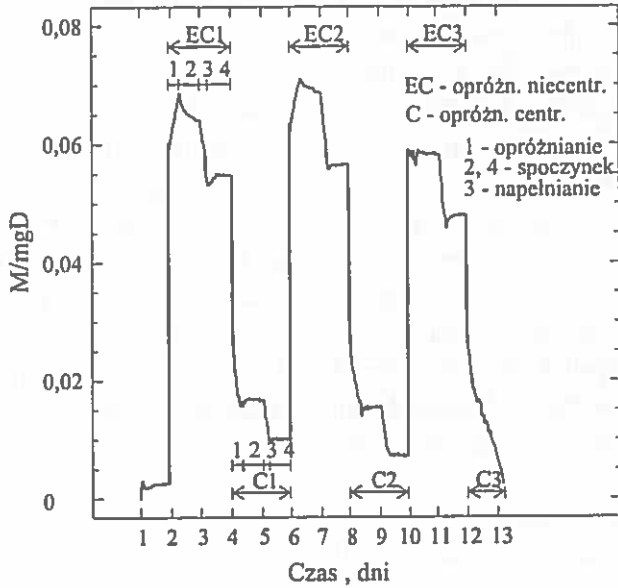
Fig. 4. Dynamic-to-Static vertical wall load Ratio (DSR) as effected by fill and unload cycle number.

tarcia ziarna o ścianę dwóch przeciwnie skierowanych składowych: w dół - pochodzącej od przepływającego ziarna oraz w górę - od ziarna unieruchomionego w martwej strefie nad płaskim dnem istotnie zmienia przebieg  $WTR$  w funkcji  $H/D$  w trakcie odciążania w stosunku do napełniania. Największe nieodwracalne zmiany w układzie sił między ziarnami powstają podczas pierwszego cyklu napełniania-opróźniania. W pierwszym cyklu pętla histerezy jest kilkakrotnie większa niż w następnych. Podczas 24 godzin spoczynku ziarna w zbiorniku wartość ilorazu  $WTR$  maleje. Spadek wartości  $WTR$  oznaczony został odcinkiem pionowej linii pomiędzy kropkami umieszczonymi na wykresach napełniania i opróżniania na Rys. 2. W identyczny sposób oznaczono spadek wartości  $WTR$  podczas spoczynku na Rys. 3. W momencie rozpoczęcia opróżniania (dolna kropka na wykresie) występuje dynamiczny wzrost obciążenia ściany. Dynamiczny wzrost pionowego obciążenia ściany przekracza 2-3-krotnie spadek obciążenia ściany powstały w trakcie spoczynku ziarna. Zaobserwowano istotny ( $\alpha=0,05$ ) spadek dynamicznego przeciążenia ściany w kolejnych cyklach opróżniania. Iloraz dynamicznego do statycznego pionowego obciążenia ściany ( $DSR$ ) malał w kolejnych cyklach opróżniania i stabilizował się na poziomie 1,1 (Rys. 4).

W serii eksperymentów ze zmienną wysokością napełniania nie obserwowano dynamicznego wzrostu obciążenia ściany w chwili rozpoczęcia drugiego opróżniania (Rys. 3,  $U_2$ ,  $H/D=1,75$ ). Dodatkowy eksperyment pojedynczego napełniania i opróżniania do wymienionej wysokości ( $U_2$ ) wykazał, że przyczyną braku dynamicznego przeciążenia podczas drugiego cyklu ( $U_2$ ) jest interakcja cyklu napełniania - opróżniania z wysokością  $H/D$ , przy której zachodzi zmiana rodzaju wpływu. Oznacza to, że dopełnianie zbiornika małymi porcjami nie narusza struktury warstwy ośrodka, wytworzonej podczas poprzedniego częściowego opróżniania, w której poprzednio występował przepływ. Dzięki temu w następnym cyklu opróżniania nie zachodzi reorientacja ziaren z początkowego układu losowego do stanu względnego uporządkowania występującego w obszarze przepływu.

Część ziarna, która pozostaje w zbiorniku podczas kolejnych operacji opróżniania i ponownego napełniania podlega cyklicznemu zagęszczaniu. Część ziarna, która przemieszcza się w kolejnych cyklach opróżniania i napełniania zbiorniku spełnia rolę obciążenia grawitacyjnego dla ziarna, które pozostaje w zbiorniku podczas kolejnych cykli. Iloraz  $WTR$ , czyli średni styczny napór na ścianę odniesiony do ciężaru ziarna w zbiorniku, zawiera informację o uśrednionym naprężeniu stycznym w materiale sypkim. Z kolei iloraz  $H/D$

zawiera informację o wielkości obciążenia ziarna w martwej strefie zbiornika. Histereza  $WTR(H/D)$  podczas cykli napełniania i opróżniania (Rys. 2 i 3) odzwierciedla zależności naprężenia dewiatorowego  $\sigma_1 - \sigma_3$  od odkształcenia  $\varepsilon_1$  w typowych badaniach laboratoryjnych np. w teście trójosiowego ściskania [11].



Rys. 5. Bezwymiarowy moment siły ( $M/mgD$ ) podczas cykli niecentrycznego i centrycznego opróżniania.

Fig. 5. Dimensionless moment of force ( $M/mgD$ ) during cycles of eccentric and centric unloading.

Rysunek 5 przedstawia porównanie bezwymiarowego momentu siły  $M/mgD$  (moment podzielony przez ciężar ziarna oraz średnicę zbiornika) podczas serii na przemian niecentrycznego i centrycznego opróżniania (trzecia seria eksperymentów). EC oznacza sekwencję niecentrycznego opróżniania, spoczynku, dopełniania i ponownego spoczynku, podczas gdy C oznacza analogiczną sekwencję dla centrycznego opróżniania. Moment siły wywierany przez ziarno na ścianę gwałtownie rósł w ciągu kilku pierwszych minut niecentrycznego opróżniania. Moment ten malał o około 20% podczas spoczynku, dopełniania i ponownego spoczynku ziarna w zbiorniku. Oznacza to, że rozkład sił między ziarnami ośrodka wywołany niecentrycznym opróżnianiem podlega tylko niewielkiej modyfikacji podczas wzrostu obciążenia. Dopiero centryczne



opróżnianie powoduje istotny spadek wartości momentu wywołanego niecentrycznym opróżnianiem. Wartość momentu spadła do 20% maksymalnej wartości podczas kilku pierwszych minut centrycznego opróżniania. Identyczną prawidłowość obserwowano podczas następnych sekwencji niecentrycznego i centrycznego opróżniania (Rys. 5). Obserwacja ta wskazuje, że wytworzony podczas jednego rodzaju przepływu rozkład sił pomiędzy ziarnami ośrodka może być zmieniony dopiero poprzez inny rodzaj przepływu. Dosypywanie ziarna do zbiornika oraz okres spoczynku niewiele zmieniają ten rozkład.

### WNIOSKI

1. Iloraz pionowego obciążenia ściany silosu do ciężaru ziarna w funkcji wysokości słupa ziarna w cyklach częściowego napełniania i opróżniania odzwierciedla zależność naprężenia dewiatorowego od odkształcenia w typowych badaniach próbek materiału sypkiego.
2. Obwiednie przebiegu ilorazu pionowego obciążenia ściany do ciężaru ziarna w funkcji wysokości słupa ziarna podczas cykli napełniania, spoczynku i początkowego okresu opróżniania mogą być aproksymowane równaniem Janssena dla wartości iloczynu  $k\mu$  w zakresie od 0,04 do 0,08.
3. Cykliczne napełnianie, opróżnianie i ponowne dopełnianie silosu małymi porcjami istotnie redukuje dynamiczne przeciążenia podczas opróżniania.
4. Zatrzymanie niecentrycznego wypływu zmniejsza moment siły wywierany przez ziarno na ścianę zbiornika o kilka procent. Ponowne dopełnienie zbiornika również niewiele redukuje wartość momentu siły pozostałego po niecentrycznym opróżnianiu. Moment ten może być istotnie zredukowany (o około 80%) poprzez krótkotrwałe centryczne opróżnianie.

### PIŚMIENNICTWO

1. ASAE Standard. 44<sup>th</sup> Ed. EP4333. Loads exerted by free flowing grain on bins. St. Joseph, MI. ASAE, 693-696, 1997.
2. Horabik J., Ross I.J., Schwab C.V.: Wall and bottom loads in a model grain bin during discharge. Transactions of the ASAE 34(2), 617-620, 1991.
3. Horabik J., Molenda M., Schwab C.V., Ross I.J.: Wall and bottom loads in grain bins of different diameters. Bulk Solids Handling Vol. 15(2), 215-218, 1995.
4. Horabik J., Molenda M., Ross I.J.: Wall loads in a model grain bin during fill and unload cycles. Transactions of the ASAE 42(3), 771-775, 1999.

5. **Ishihara K.:** Stress history effects on the behavior of sand. Proc. of the U.S.-Japan Seminar on Continuum-Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials. Gakujutsu Bunken Fukyukai, Tokyo, Japan, 71-90, 1978.
6. **Janssen H.A.:** Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Verein Deutscher Ingenieure, Zeitschrift (Dusseldorf) 39, 1045-1049, 1895.
7. **PN-89/B-03262.** Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kiszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
8. **Sawicki A.:** Elasto-plastic interpretation of oedometric test. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 41(1-2), 111-131, 1994.
9. **Sawicki A. Świdziński W.:** Cyclic compaction of soils, grains and powders. Powder Technology 85, 97-104, 1995.
10. **Thompson S.A., Ross I.J.:** Compressibility and frictional coefficients of wheat. Transactions of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.
11. **Zhang Q., Puri, V.M., Manbeck H.B., Wang M.C.:** Elastoplastic constitutive parameters of en masse wheat for a cyclic load model. Transactions of the ASAE 31(3), 919-916, 1988.

#### LOAD DISTRIBUTION IN A MODEL GRAIN BIN DURING PARTIAL FILL AND UNLOAD

*J. Horabik, M. Molenda, I.J. Ross\**

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27  
e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl

\*Biosystems and Agric. Engng Dept., University of Kentucky, Lexington, KY 40546, USA

**Summary:** This study was conducted to determine how several filling and unloading procedures affects wall loads. The vertical wall loads exerted by soft red winter wheat on a smooth-wall, flat-floor silo 2.4 m in diameter and 7.3 m high were determined as a function of fill height for different fill and unload cycles. The protocols used in the experiments of partially unloading and refilling the test bin allow to decrease overpressure during discharge.

**Keywords:** wheat, loads, friction, silos.