

WYZNACZANIE ILORAZU NAPORU W ROŚLINNYCH MATERIAŁACH SYPKICH. CZ. II. BADANIA DOŚWIADCZALNE¹

J. Horabik, R. Rusinek

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

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

Streszczenie: W pracy omówiono wyniki badań doświadczalnych ilorazu naporu i współczynnika tarcia nasion rzepaku oraz ziarna pszenicy. Analizowano zachowanie się złoza nasion podczas kolejnych cykli obciążania i odciążania symulujących warunki magazynowania w silosach zbożowych. Wartości doświadczalne pokrywają się z zakresem zmian ilorazu naporu wyliczonym z zależności analitycznych przy założeniu uplastycznienia materiału przy ściance zbiornika w czynnym stanie naprężenia.

Słowa kluczowe: iloraz naporu, współczynnik tarcia, złoże ziarna

WSTĘP

W zbiornikach użytkowych na materiały sypkie pomiar naporu prowadzi się dwoma sposobami: pośrednio poprzez określenie sił w konstrukcji silosu lub bezpośrednio mierząc napór lokalny [2]. Oba przypadki są dalece niewygodne i obarczone błędami. Dlatego też bardzo często badania prowadzone są na modelach laboratoryjnych, które przy zachowaniu proporcji wymiarowych dobrze odzwierciedlają rzeczywiste warunki magazynowania materiałów ziarnistych.

W warunkach laboratoryjnych pomiar ilorazu naporu można realizować poprzez pomiar średniego naporu na ściany i dno modelowego zbiornika lub poprzez bezpośredni pomiar naprężenia w masie ośrodka za pomocą głowicy pomiarowej. W przypadku pomiaru naprężeń działających na zbiornik mamy do

¹ Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 5 P06F 021 17 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999-2002.

czynienia z ich średnią wartością mierzoną po powierzchni kontaktu złoża z elementem czynnym: ścianą zbiornika i dnem oraz, w przypadku gdy złoże jest dodatkowo obciążane, pokrywą górną. W przypadku pomiaru naprężenia za pomocą głowicy w masie ośrodka istotne jest dobranie odpowiedniej wielkości powierzchni czynnej przetwornika naporu do wielkości ziarna, tak by wystarczająco duża ilość ziaren była z nim w kontakcie. Zaletą pomiaru składowych stanu naprężenia w masie ośrodka sypkiego jest możliwość monitorowania jego wielkości w poszczególnych obszarach zbiornika. Głównym problemem występującym podczas wyznaczania ilorazu naporu na drodze eksperymentalnej jest dobór odpowiedniej metody badawczej oraz aparatury dla określonego rodzaju ośrodka.

EKSPERYMENTALNE METODY WYZNACZANIA ILORAZU NAPORU

Atewologun i Riskowski [1] przeprowadzili pomiary naporu na ścianę i dno modelowego zbiornika i ilorazu naprężeń przy pomocy głowicy umieszczonej w materiale sypkim (soja) w zbiorniku o średnicy 0,91 m i wysokości 2,74 m. Głowicę umożliwiającą pomiar naprężenia normalnego w trzech kierunkach (leżących w jednej płaszczyźnie i zorientowanych co 45°) umieszczano w różnej odległości od osi zbiornika. Badania wykazały nieliniowość rozkładów naprężeń. Maksymalne wartości naprężeń występowały w odległości 0,3 m od osi zbiornika.

Lohnes [7] mierzył ilorazu naporu dla materiałów sypkich pochodzenia roślinnego i mineralnego w cylindrycznym zbiorniku umożliwiającym pomiar naporu poziomego i współczynnika tarcia materiału o ścianę zbiornika. Napór pionowy wyznaczany był w oparciu o równanie Janssena. Analizując zachowanie się materiału podczas obciążania i odciążania złoża autor wykazał nieliniową zależność pomiędzy naprężeniem poziomym i pionowym.

Law i inni [6] określali iloraz naporu przy pomocy głowicy pomiarowej umożliwiającej pomiar naprężenia pionowego i dwóch naprężeń poziomych. Badania przeprowadzono w modelowym zbiorniku walcowym o wysokości 0,87 m i średnicy wewnętrznej 0,3 m. Dno zbiornika zamocowane było w sposób niezależny od ściany. Sztywna pokrywa górna umożliwiała przyłożenie zewnętrznej siły dociażającej. Sześciennej kostki pomiarowej o długości boku 50 mm została umieszczona na wysokości 0,547 m w masie materiału sypkiego. Autorzy badali własności sprężysto-plastyczne pszenicy i jęczmienia podczas cyklicznych obciążeń. Przeprowadzono analizę iloczynu ilorazu naporu

i współczynnika tarcia w funkcji naporu pionowego dla trzech cykli obciążenie - odciążenie, w których kolejno iloczyn ten malał. Autorzy zwracają uwagę na niezgodność wyników eksperymentu z rekomendacjami norm ISA, które zalecają obliczanie ilorazu naporu jako liniowej funkcji naprężenia pionowego. Norma przewiduje dla jęczmienia iloraz naporu w zakresie od 0,21 do 0,35 przy pionowym obciążeniu 100 kPa. Natomiast średni wynik eksperymentu przy takich samych parametrach wynosił 0,38.

Kwade i inni [5] zastosowali pośrednią metodę wyznaczania ilorazu naporu polegającą na pomiarze naporu poziomego na ścianę modelowego zbiornika oraz wyznaczeniu naporu pionowego z równania Janssena. Badania przeprowadzono w zbiorniku o średnicy wewnętrznej 0,149 m i wysokości 0,06 m, obciążając próbkę za pomocą sztywnej pokrywy górnej. Eksperyment wykazał istotny wpływ kształtu ziarna oraz stopnia rozdrobnienia na równomierność rozkładu naprężeń. Autorzy podkreślają, że sztywność konstrukcji zbiornika istotnie wpływa na pomiar ilorazu naporu.

METODA POMIAROWA

Celem podjętych badań było wyznaczenie zakresu zmian ilorazu naporu w roślinnym materiale sypkim podczas cyklicznych obciążeń statycznych symulujących obciążenia występujące podczas magazynowania ziarna oraz porównanie wyników badań doświadczalnych z przewidywaniami teoretycznymi.

Pomiary wykonano w modelowym zbiorniku walcowym o średnicy 0,61 m i wysokości 0,61 m, którego ściana zawieszona była niezależnie od dna na trzech głowicach tensometrycznych i zbudowana z dwóch identycznych części złączonych ze sobą wzdłuż tworzącej walca przy pomocy czterech czujników siły. Dno zbiornika składało się z pięciu koncentrycznych pierścieni, każdy o tym samym polu powierzchni. Każdy pierścień podparty był na trzech czujnikach siły. W celu zwiększenia naprężenia w materiale swobodną powierzchnię ziarna obciążano pokrywą górną, skonstruowaną w identyczny sposób jak dno, dociskaną za pomocą mechanizmu śrubowego (Rys. 1). Układ pomiarowy umożliwiał wyznaczenie naporu pionowego na dno σ_x i pokrywę górną σ_x'' oraz średniego naporu stycznego σ_t i normalnego na ścianę σ_n , a także ilorazu naporu uśrednionego po całej objętości materiału sypkiego w zbiorniku [3].

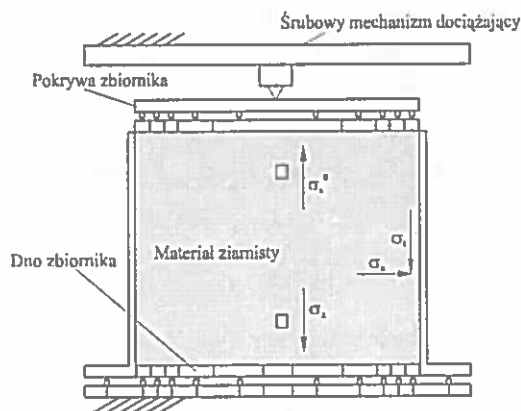
Równoczesny pomiar naporu stycznego σ_t i normalnego σ_n na ścianę zbiornika pozwalał wyznaczyć rzeczywistą wartość współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę odpowiadającą faktycznej mobilizacji sił tarcia.

Wyznaczony w ten sposób współczynnik tarcia jest na ogół mniejszy niż współczynnik tarcia kinetycznego materiału sypkiego o powierzchnię ściany:

$$\mu^* = \frac{\sigma_t}{\sigma_n} < \mu, \quad (1)$$

a jedynie w przypadku pełnej mobilizacji sił tarcia np. podczas uporządkowanego ruchu materiału sypkiego względem ściany jest mu równy:

$$\mu^* = \mu. \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

Fig. 1. Schematic diagram of the measuring system.

Iloraz naporu wyznaczono rozwiązując numerycznie równanie Janssena względem parametru k dla eksperymentalnych wartości naporu pionowego na dno σ_x , pokrywę górną σ_x^0 oraz rzeczywistej wartości współczynnika tarcia μ^* [3]. Pomiaru wykonano dla ziarna pszenicy ozimej odmiany Begra o wilgotności 13% oraz nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 7,2%. Zastosowano dwie metody napełniania zbiornika: centrycznie oraz rozproszone. W przypadku napełniania centrycznego ziarno wpadało do zbiornika wzdłuż jego pionowej osi ze stożka zasypowego umieszczonego 0,23 m nad zbiornikiem. W przypadku napełniania rozproszonego zastosowano zestaw sit umieszczonych w bezpośrednim kontakcie z górną krawędzią zbiornika, umożliwiającą usypywanie złoża równomiernym strumieniem na całym przekroju zbiornika. Po napełnieniu zbiornika i przykryciu go pokrywą ziarno dociążano poprzez układ dociążający uzyskując napór pionowy w granicach 5–13 kPa. W każdym

powtórzeniu eksperymentu wykonano cztery cykle obciążania i odciążania złoza. Każdy wariant eksperymentu wykonano w czterech powtórzeniach.

WYNIKI

Przykładowe pętle histerezy ilorazu naporu oraz współczynnika tarcia rzepaku oraz pszenicy dla napelniania rozproszonego przedstawia rysunek 2. We wszystkich badanych przypadkach kształt wykresu pozostawał podobny, zmieniały się natomiast graniczne wartości mierzonych parametrów. Kolejne pętle histerezy ilorazu naporu w obrębie jednego materiału i sposobu napelniania, począwszy od drugiej, pokrywały się. Największe różnice w wartościach ilorazu naporu pomiędzy czterema rozważanymi przypadkami zarejestrowano podczas pierwszego cyklu obciążania (Rys. 3). W przypadku warstwy obciążonej tylko ciężarem własnym nasion iloraz naporu był najmniejszy. Po przyłożeniu obciążenia pionowego iloraz naporu wzrastał a następnie stabilizował się, gdy napór pionowy przekroczył wartość około 5 kPa. Średnie wartości ilorazu naporu dla pierwszego cyklu obciążania warstwy przedstawia tabela 1. Różne wartości ilorazu naporu w przypadku napelniania centrycznego i rozproszonego wynikają z różnej gęstości upakowania. W wyniku napelniania rozproszonego powstaje wyższa gęstość materiału w porównaniu do napelniania centrycznego, powodując wzrost kąta tarcia wewnętrznego i tym samym spadek ilorazu naporu. Wyższe wartości ilorazu naporu rzepaku niż pszenicy wynikają z różnicy w module sprężystości oraz kształcie nasion. Właściwości powierzchniowe ziaren, ich kształt, moduł sprężystości oraz struktura złoza materiału sypkiego wpływają na wartość ilorazu naporu oraz wartość współczynnika tarcia o ścianę.

Tabela 1. Wartości średnie ilorazu naporu dla pierwszego cyklu obciążania

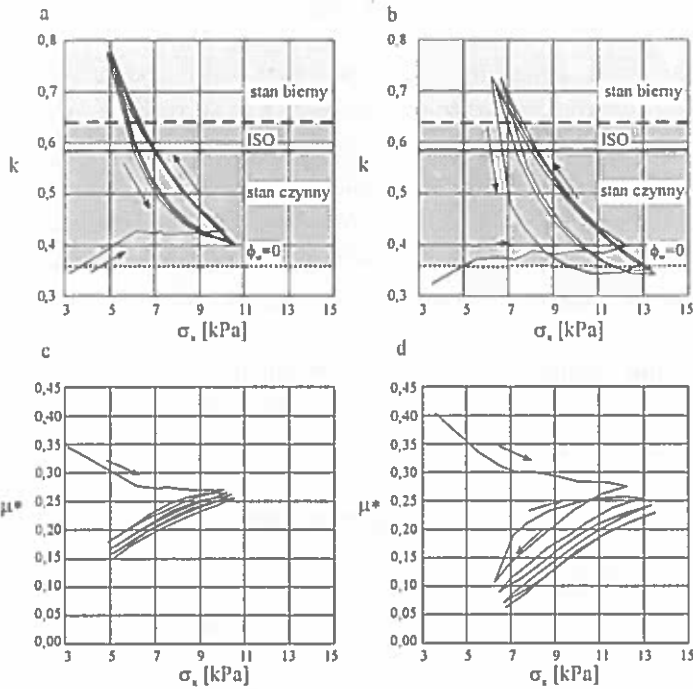
Table 1. Mean values of the pressure ratio during the first loading cycle

Material	Napelnianie	Iloraz naporu
Rzepak	Centryczne	0,450 ±0,009
	Rozproszone	0,433 ±0,003
Pszenica	Centryczne	0,427 ±0,008
	Rozproszone	0,376 ±0,003

Wyznaczony eksperymentalnie zakres zmian ilorazu naporu koresponduje dobrze z zakresem wartości teoretycznych obliczonym dla wartości kąta tarcia wewnętrznego $\varphi=28^\circ$, przyjętej w oparciu o zalecenia normy dla pszenicy

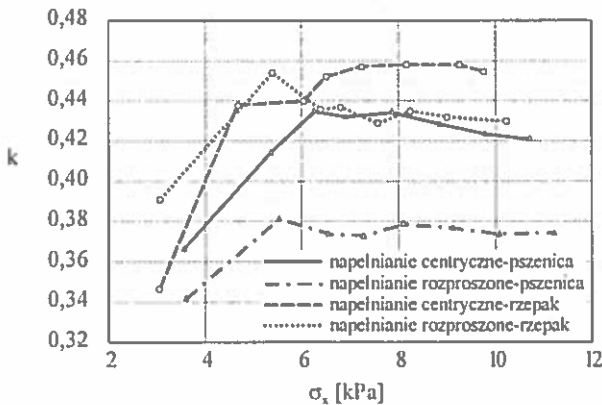
i rzepaku [8]. Iloraz naporu w pierwszym cyklu obciążania jest zbliżony do wartości teoretycznej wyznaczonej w części I pracy [4] dla przypadku uplastycznienia w środku warstwy w czynnym stanie naprężenia (Rys. 2 - linia kropkowa, $\varphi_w=0^\circ$). Większa część pętli histerezy ilorazu naporu leży w obszarze wartości teoretycznych obliczonych dla przypadku uplastycznienia przy ścianie zbiornika w czynnym stanie naprężenia [4]. Podczas odciążania pętla histerezy przekracza wartość ilorazu naporu obliczaną według zaleceń ISO (linia ciągła), a pod koniec odciążania przechodzi w obszar wartości odpowiadających biernemu stanowi naprężenia (powyżej linii przerywanej). W ramach przyjętego modelu iloraz naporu w przypadku stałej wartości kąta tarcia wewnętrznego zależy tylko od kąta tarcia o ścianę, miejsca uplastycznienia i założenia o czynnym bądź biernym stanie naprężenia. Wyznaczone eksperymentalnie pętla histerezy ilorazu naporu powstają w wyniku złożenia plastycznych i sprężystych oddziaływań w materiale. Pomimo iż uproszczenia przyjęte w modelu nie uwzględniają sprężystych oddziaływań wyliczony zakres wartości ilorazu naporu obejmuje zakres wartości eksperymentalnych.

Współczynnik tarcia materiału o ścianę μ^* zmieniał się wraz ze zmianą obciążania pionowego. Podczas pierwszej fazy obciążania malał od wartości statycznej 0,35 dla rzepaku oraz 0,4 dla pszenicy do wartości 0,27 odpowiadającej tarcia kinetycznemu ($\mu^*=\mu$). Podczas odciążania współczynnik tarcia malał do wartości 0,11 oraz 0,18 odpowiednio dla pszenicy oraz rzepaku. Kolejne cykle obciążania i odciążania powodowały systematyczny spadek wartości μ^* . Podczas obciążania składowa styczna wektora naprężenia przyrastała wolniej niż składowa normalna, natomiast przy odciążaniu na skutek odprężania materiału składowa styczna na części powierzchni ściany zanikała lub zmieniała swój zwrot, w wyniku czego współczynnik tarcia μ^* malał. W kolejnych cyklach obciążania materiał systematycznie zagęszczał się, co prowadziło do jego wzmocnienia. W wyniku złożenia oddziaływań sprężystych i plastycznych w materiale sytkim iloczyn ilorazu naporu i współczynnika tarcia $k\mu^*$ na ogół malał w kolejnych cyklach obciążania i odciążania od wartości 0,12-0,13 do: 0,08 (rzepak - napelnianie centryczne), 0,06 (pszenica - napelnianie centryczne) oraz 0,04 (pszenica - napelnianie rozproszone). Złoże rzepaku powstałe w wyniku napelniania rozproszonego wytworzyło bardzo zwartą i sprężystą strukturę, w wyniku czego początkowa i końcowa wartość iloczynu $k\mu^*$ pozostawała taka sama. Podobną tendencję zmian iloczynu $k\mu$ obserwował Law [6]. W trzech kolejnych cyklach obciążania i odciążania rejestrował spadek wartości iloczynu $k\mu$ od 0,23 do 0,08.



Rys. 2. Iloraz naporu oraz współczynnik tarcia w kolejnych fazach obciążania i odciążania dla napełniania rozproszonego: (a), (c) - rzepak; (b), (d) - pszenica.

Fig. 2. The stress ratio and the coefficient of wall friction in the loading-unloading cycles for the sprinkle filling: (a), (c) – rape seed; (b), (d) – wheat.



Rys. 3. Iloraz naporu w funkcji naporu pionowego σ_x dla pierwszego cyklu obciążania.

Fig. 3. The stress ratio versus the vertical stress σ_x for the first cycle of loading.

WNIOSKI

1. Struktura złoża materiału sypkiego wytworzona w trakcie napełniania zbiornika oraz właściwości ziarna wpływają na wartość ilorazu naporu.
2. Wyznaczone eksperymentalnie wartości ilorazu naporu dla ziarna pszenicy i nasion rzepaku pokrywają się z zakresem wartości teoretycznych. Większa część pętli histerezy ilorazu naporu wyznaczonej przy zmianie naporu pionowego w zakresie od 5 do 11 kPa leży w zakresie wartości obliczonych w oparciu o założenie uplastycznienia przy ścianie w czynnym stanie naprężenia.
3. Zastosowana metoda pomiarowa umożliwia wyznaczenie ilorazu naporu uśrednionego po stosunkowo dużej objętości materiału w warunkach odzwierciedlających proces magazynowania ziarna w silosach.

PIŚMIENNICTWO

1. **Atewologun A.O., Riskowski G.L.:** Experimental determination of Janssen's stress ratio by four methods for soybeans under static conditions. *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2193-2197, 1991.
2. **Borc A.:** Silosy w przemyśle materiałów wiążących. Politechnika Wroclawska, Wroclaw 1987.
3. **Horabik J., Molenda M.:** Wyznaczanie ilorazu poziomego do pionowego naporu w cylindrycznej warstwie ośrodka sypkiego. *Materiały X SZKOŁY „Fizyka z elementami agrofizyki”*, 145-146, 1998.
4. **Horabik J., Rusinek R.:** Wyznaczanie ilorazu naporu w roślinnych ośrodkach sypkich. Cz. I. Rozważania teoretyczne. *Acta Agrophysica*, 37, 61-71, 2000.
5. **Kwade A., Schulze D., Schwedes J.:** Determination of the stress ratio in uniaxial compression tests-Part 1. *Powder Handling and Processig*, 6 (1), 61-65, 1994.
6. **Law G.J., Negi S.C., Jofriet J.C.:** A method for measurement of horizontal to vertical pressure ratios of wheat and barley in a circular bin. *Canadian Agric. Eng.*, 35(1), 45-49, 1993.
7. **Lohnes R.A.:** Lateral stress ratios for particulate materials. *Powder Handling and Processig*, 5(4), 331-335, 1993.
8. **PN-89/B-03262.** Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kiszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie. 1989.

DETERMINATION OF THE STRESS RATIO OF PLANT GRANULAR SOLIDS. PART II. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

J. Horabik, R. Rusinek

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

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

Summary: The stress ratio and the coefficient of wall friction were determined experimentally for rape seeds and wheat grain. Behaviour of the grain was analysed during cycles of loading and unloading which simulated conditions of storage in a silo. Measured values of the stress ratio correspond to the range of variability obtained analytically for yielding at the bin wall in the active stress case.

Key words: pressure ratio, angle of friction, bed of grain.