

POMIAR WSPÓLCZYNNIKA TARCIA WEWNĘTRZNEGO PSZENICY O RÓŻNEJ WILGOTNOŚCI I STOPNIU ROZDROBNIENIA

J. Laskowski, S. Skonecki

Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego AR
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

Streszczenie: Przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tarcia wewnętrznego i kohezji rozdrobnionych ziarn trzech odmian pszenicy w zależności od ich wilgotności i średniego wymiaru cząstki. Pomiary te przeprowadzono w na aparacie bezpośredniego ścinania. Stwierdzono, że ze zwiększeniem wilgotności i średniego wymiaru ziarna rośnie współczynnik tarcia wewnętrznego i kohezja.

Słowa kluczowe: współczynnik tarcia wewnętrznego, pszenica, wilgotność, stopień rozdrobnienia.

WSTĘP

W większości procesów związanych z przeróbką ziarnistych materiałów roślinnych występuje przepływ masy materiału i istotne jest określenie oporów występujących w trakcie transportu, mieszania, przesiewania, aglomerowania, przechowywania i innych zabiegów. Opory te związane są z tarciem występującym zarówno między ziarnami, jak i ziarnami a stykającymi się z nimi elementami maszyn i urządzeń. Opór przemieszczania się ziaren względem siebie jest wytrzymałością ośrodka ziarnistego na ścinanie. Wytrzymałość tą określa się za pomocą współczynnika tarcia wewnętrznego (kąta tarcia wewnętrznego) i spójności (kohezji). Znajomość tych oporów może umożliwić przeprowadzenie prawidłowej optymalizacji procesów technologicznych, zmniejszenie strat materiałów roślinnych i oszczędność energii [2]. Współczynnik tarcia wewnętrznego

jest także podstawowym parametrem w teoretycznym modelowaniu szeregu procesów [2, 5].

Ziarniste materiały roślinne są z reguły ośrodkami trójfazowymi złożonymi z pojedynczych ziaren zwanych szkieletem, w których zawarta jest pewna ilość wody oraz powietrza wypełniającego przestrzenie międzyskieletowe. Wielofazowa struktura oraz nieciągła budowa komórkowa są głównymi czynnikami wpływającymi na przebieg procesu tarcia [1,2,4]. Stosunkowo najlepiej poznany jest wpływ wilgotności na wartość siły tarcia. Uogólniając wyniki badań można stwierdzić, że siła tarcia rośnie wraz ze zwiększeniem wilgotności [1-3,6,7]. W mniejszym stopniu w dotychczasowych badaniach uwzględniono gęstość materiału, kształt cząstek oraz orientację przestrzenną ziarna [2,7].

Analiza literatury wskazuje, że proces tarcia wewnętrznego ziarnistych materiałów roślinnych nie jest w pełni wyjaśniony. Dla celów poznawczych i użytkowych ważne jest wyznaczenie wartości współczynnika tarcia wewnętrznego i kohezji materiału roślinnego o różnych właściwościach fizyko-chemicznych. W tym aspekcie w niniejszym opracowaniu określono parametry tarcia dla ziarna pszenicy.

Celem badań jest określenie wpływu wilgotności i stopnia rozdrobnienia ziarna pszenicy na współczynnik tarcia wewnętrznego i kohezję.

MATERIAŁ I METODY

Charakterystyka materiału

Do badań wybrano ziarno trzech odmian pszenicy: Izolda, Juma i Maltanka. Wszystkie te odmiany należą do pszenic ozimych i znajdują się w rejestrze. Charakteryzują się dobrą wartością przemiałową i wypiekową, natomiast różnią się wartością technologiczną.

Oczyszczone ziarno pszenicy rozdrabniano na rozdrabniaczu bijakowym H III/3. Dla uzyskania zróżnicowanego materiału badawczego rozdrabnianie prowadzono pięcioma sposobami (stosowano sита o różnych średnicach otworów, lub nie wykorzystywano sít). W ten sposób dla każdej odmiany pszenicy uzyskano pięć próbek materiału badawczego.

Dla rozdrobnionych próbek pszenicy określono średni wymiar cząstek. Pomiary wykonano zgodnie z PN-89/R-64797 przy wykorzystaniu przesiewacza laboratoryjnego typu SZ-1 (stosowano zestaw sít o wymiarach oczek: 0,095; 0,18; 0,315; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 i 3,2 mm).

Wyznaczono także gęstość usypową i utrzesioną dla surowców o wilgotności 10+/-0,2%.

Właściwości fizyczne próbek pszenic zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości próbek pszenicy

Table 1. Basic properties of wheat samples

| Odmiana pszenicy | Średni wymiar cząstki [mm] | Gęstość usypowa [kg/m ³] | Gęstość utrzesiona [kg/m ³] |
|------------------|-------------------------------|---|--|
| Izolda | 0,63 | 625 | 706 |
| | 0,96 | 644 | 725 |
| | 1,30 | 649 | 728 |
| | 1,71 | 700 | 771 |
| | 2,07 | 710 | 768 |
| Juma | 0,62 | 604 | 695 |
| | 1,11 | 654 | 703 |
| | 1,40 | 653 | 719 |
| | 1,69 | 685 | 744 |
| | 1,99 | 716 | 770 |
| Maltanka | 0,63 | 608 | 678 |
| | 1,05 | 618 | 689 |
| | 1,37 | 627 | 723 |
| | 1,65 | 689 | 750 |
| | 1,96 | 715 | 768 |

Badania procesu tarcia przeprowadzono dla próbek pszenic o wilgotności 10, 12, 14, 16 i 18% (+/-0,2%). Wilgotność określano metodą suszarkową zgodnie z PN-76/R-64762. Daną wilgotność uzyskiwano poprzez suszenie lub dodanie wody do materiału.

Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego i kohezji

Badania tarcia wewnętrznego przeprowadzono przy wykorzystaniu aparatu bezpośredniego ścinania (typ AB-2a produkcji Zakładu Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie). Stanowisko pomiarowe opisano w pracy [5].

Próbkę materiału umieszczano w skrzynce dwudzielnej, składającej się z dwóch metalowych ramek o wymiarach 0,06x0,06m i wysokości 0,04m każda.

Skrzynkę wypełniano do około 2/3 wysokości górnej ramki i wkładano metalową płytkę perforowaną. Na płytce układano tłoczek, który poddawano działaniu siły normalnej (F_n), uzyskanej przez odpowiedni mechanizm aparatu i rejestrowanej na siłomierzu pionowym. Siłę ścinającą wywoływano przez przemieszczenie górnej ramki (prędkość przesuwu wynosiła $0,167\text{mms}^{-1}$). Do określenia tej siły wykorzystano pierścień oporowy z tensometrem, którego odkształcenia poprzez mostek tensometryczny wprowadzono do komputerowego programu rejestrującego wartości siły stycznej w zależności od czasu pomiaru. Wielkość siły stycznej rejestrowano do odkształcenia próbki nie przewyższającego 20% co umożliwiała wyznaczenie siły ścinającej (F_t).

Badania prowadzono przy pięciu wartościach siły normalnej obciążającej: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 kN (nacisk normalny w zakresie 139-695kPa). Przyjęty zakres obciążenia określono na podstawie badań wstępnych, które wykazały że w zastosowanym aparacie badawczym przy tych naciskach osiągany jest stan ustalonego płynięcia. Uzyskiwana gęstość próbki materiału w komorze zawierała się w przedziale 720–830 kgm^{-3} . Ścięcie zachodziło przy odkształceniach próbki w zakresie 8-15% zależnie od materiału i nacisku normalnego.

Jako wynik próby bezpośredniego ścinania otrzymuje się wykres we współrzędnych naprężenie styczne ($\tau_n = F_t/S$, gdzie: S-pole przekroju próbki [m^2]), naprężenie normalne ($\sigma_n = F_n/S$). Współczynnik tarcia wewnętrzznego (f_w) i kohezję (C) obliczano z równania:

$$\tau_n = f_w \sigma_n + C \quad (1)$$

Wyniki badań poddano analizie statystycznej. Zależności pomiędzy współczynnikiem tarcia wewnętrzznego (f_w) oraz kohezją (C) od średniego wymiaru cząstki (d_s) i wilgotności materiału (w) opisano równaniami analitycznymi (wielomiany drugiego stopnia). Przy pomocy programu Statistica firmy StatSoft dokonano analizy regresji wielokrotnej z wyborem najlepszego podzbioru zmiennych niezależnych. Zmienne nieistotne zostały wyeliminowane z równań.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki współczynnika tarcia wewnętrznego

Równania regresji opisujące zależności współczynnika tarcia wewnętrznego (f_w) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) uzyskane dla poszczególnych odmian pszenicy mają taką samą postać (tab. 2, równania 1-3).

Tabela 2. Równania regresji opisujące zależności współczynnika tarcia wewnętrznego (f_w) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) oraz wartości współczynnika determinacji R^2

Table 2. Regression equations describing relation of internal friction coefficient (f_w) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) and the values of determination coefficients R^2

| Lp | Odmiana pszenicy | Równanie regresji | R^2 |
|----|------------------|--|-------|
| 1 | Izolda | $f_w = 0,451 + 0,00064w^2 + 0,2179d_s - 0,0984d_s^2$ | 0,918 |
| 2 | Juma | $f_w = 0,534 + 0,00052w^2 + 0,0901d_s - 0,0598d_s^2$ | 0,899 |
| 3 | Maltanka | $f_w = 0,466 + 0,00042w^2 + 0,2985d_s - 0,1442d_s^2$ | 0,861 |
| 4 | Wszystkie | $f_w = 0,500 + 0,00052w^2 + 0,1718d_s - 0,0889d_s^2$ | 0,803 |

Zależności te przedstawiono na rysunkach 1-3. Wynika z nich, że przebieg zmienności jest podobny dla każdej odmiany, lecz występują różnice w wartościach współczynnika tarcia.

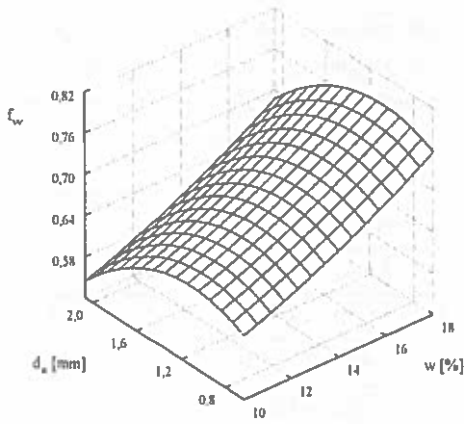
Z uzyskanych zależności stwierdzono, że ze zwiększeniem wilgotności rośnie współczynnik tarcia wewnętrznego dla każdego stopnia rozdrobnienia.

Najmniejsze wartości uzyskano dla surowców o wilgotności 10% i największym średnim wymiarze cząstki i wynoszą dla pszenicy: Izolda $f_w=0,55$; Juma $f_w=0,51$ i Maltanka $f_w=0,53$. Natomiast największymi wartościami współczynnika tarcia wewnętrznego charakteryzują się pszenice o wilgotności 18%. Wartości te wynoszą dla pszenicy odmiany : Izolda $f_w=0,76$; Juma $f_w=0,75$ i Maltanka $f_w=0,79$.

Analiza wyników badań wskazuje, że zakres zmienności współczynnika tarcia wewnętrznego zawiera się w przedziale od $f_w=0,53$ do $f_w=0,79$. Zwiększenie wilgotności od 10% do 18% każdej odmiany pszenicy powoduje wzrost współczynnika tarcia wewnętrznego o 6-10% zależnie średniego wymiaru cząstki.

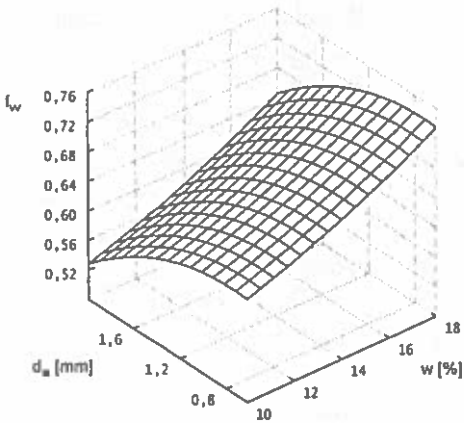
Analiza zależności wykazała także, że zmiana współczynnika tarcia wewnętrznego ze zwiększeniem średniego wymiaru cząstki jest podobna dla poszczególnych odmian pszenicy. Dla każdej wilgotności surowca występuje maksimum współczynnika tarcia wewnętrznego przy określonym średnim wymiarze cząstek. Maksymalne wartości f_w uzyskano dla pszenic o średnim wymiarze cząstek w zakresie od 1,3mm do 1,4 mm.

Ponieważ powyższe zmiany są podobne dla badanych pszenic, wyznaczono ze wszystkich wyników równanie 4 (tabela 2), które uogólnia charakter zmiany współczynnika tarcia wewnętrznego od wilgotności i średniego wymiaru cząstki.



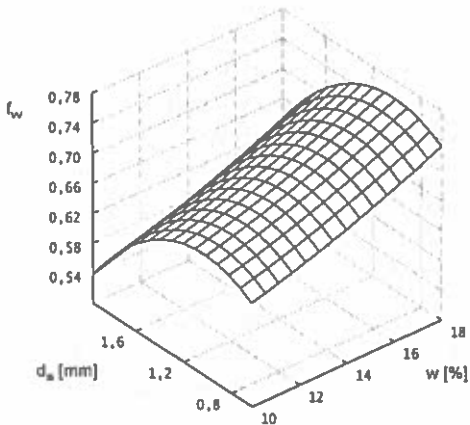
Rys. 1. Zależność współczynnika tarcia wewnętrznego (f_w) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Izolda.

Fig. 1. Relation of the internal friction coefficient (f_w) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Izolda.



Rys. 2. Zależność współczynnika tarcia wewnętrznego (f_w) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Juma.

Fig. 2. Relation of the internal friction coefficient (f_w) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Juma.



Rys. 3. Zależność współczynnika tarcia wewnętrznego (f_w) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Maltanka.

Fig. 3. Relation of the internal friction coefficient (f_w) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Maltanka.

Wyniki kohezji

Równania regresji opisujące zależności kohezji (C) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) podano w tabeli 3.

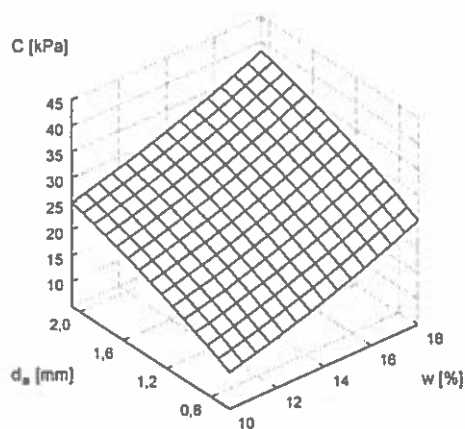
Tabela 3. Równania regresji opisujące zależności kohezji (C) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) oraz wartości współczynnika determinacji R^2

Table 3. Regression equations describing relation of cohesion (C) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) and the values of determination coefficients R^2

| Lp | Odmiana pszenicy | Równanie regresji | R^2 |
|----|------------------|---|-------|
| 1 | Izolda | $C = -2,091 + 0,0579w^2 + 14,698d_s - 2,086d_s^2$ | 0,953 |
| 2 | Juma | $C = -6,502 + 1,4499w + 5,8856d_s^2$ | 0,968 |
| 3 | Maltanka | $C = -4,414 + 0,0689w^2 + 13,551d_s$ | 0,968 |
| 4 | Wszystkie | $C = -2,491 + 0,0594w^2 + 12,396d_s$ | 0,904 |

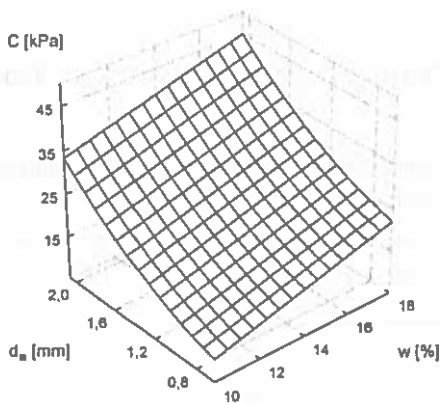
Z równań wynika, że kohezja rośnie ze zwiększeniem wilgotności i średniego wymiaru cząstki. Zmiany te są podobne dla trzech odmian pszenicy, a ich charakter zobrazowano na rysunkach 4-6.

Najmniejsze wartości kohezji uzyskano dla surowców o najniższej wilgotności i najmniejszym średnim wymiarze cząstki. Wartości te wynoszą dla pszenicy odmiany: Izolda $C=10,5\text{kPa}$; Juma $C=11,58\text{kPa}$ i Maltanka $C=9,1\text{kPa}$.



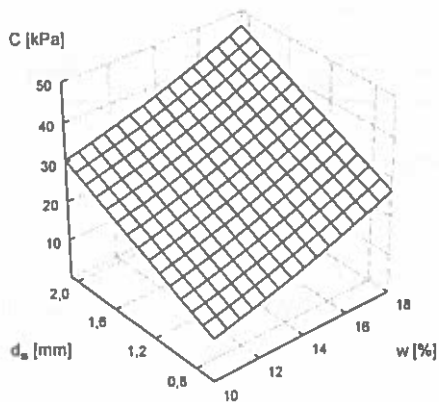
Rys. 4. Zależność kohezji (C) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Izolda.

Fig. 4. Relation of the cohesion (C) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Izolda.



Rys. 5. Zależność kohezji (C) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Juma.

Fig. 5. Relation of the cohesion (C) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Juma.



Rys. 6. Zależność kohezji (C) od wilgotności (w) i średniego wymiaru cząstki (d_s) – pszenica odmiany Maltanka.

Fig. 6. Relation of the cohesion (C) to moisture content (w) and mean particle size (d_s) – wheat cultivar Maltanka.

Natomiast najwyższymi wartościami kohezji charakteryzują się surowce o wilgotności 18% i dużym średnim wymiarze cząstek. Wartości te wynoszą dla pszenicy odmiany: Izolda $C=41,02\text{kPa}$; Juma $C=46,28\text{kPa}$ i Maltanka $C=46,73\text{kPa}$.

Równanie 4 (tab. 3) obliczone dla wszystkich odmian pszenic uogólnia zmiany kohezji od wilgotności i średniego wymiaru cząstki.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że na kohezję istotnie wpływają: wilgotność i stopień rozdrobnienia materiału biologicznego. Potwierdzają one stwierdzenia przedstawione w pracy [2]. Większa wilgotność materiału sprzyja tworzeniu się wiązań adhezyjnych – ziarna „przyklejają” się do siebie. Kohezja C reprezentuje wówczas wiązania adhezyjne w miejscu styku ziaren [2, 7]. Natomiast wielkość

ziarn oraz ich kształt i gęstość upakowania decyduje o rzeczywistej powierzchni kontaktu. Mikronierówności powierzchni, stykając się ze sobą, tworzą rzeczywistą powierzchnię styku ziarn i przesuwały się, współdziałają mechanicznie.

Dane literaturowe wskazują, że kohezja rośnie ze zmniejszaniem się wielkości cząstek szkieletu ośrodka [4,7]. W analizowanych badaniach kohezja rośnie ze zwiększeniem średniego wymiaru cząstki. Przy tym należy zauważyć, że rozdrobnione próbki ziarna pszenicy nie są materiałem jednorodnym pod względem wymiarowym. Próbki rozdrobnionego ziarna pszenicy o większym średnim wymiarze cząstek są bardziej zróżnicowane pod względem zawartości cząstek o różnych rozmiarach i kształtach. Sprzyja to tworzeniu struktury charakteryzującej się budową bardziej zwartą z możliwością zwiększenia rzeczywistej powierzchni kontaktu a tym samym wytrzymałości poszczególnych wiązań szkieletu. Czynniki te można zatem uznać jako decydujące o sile spójności ziarn występujących w badanych próbkach pszenic.

Należy jednak zaznaczyć, że wielu autorów [2,7] zakłada, że w materiałach ziarnistych pochodzenia roślinnego zjawisko kohezji nie występuje, a sam parametr kohezji wynika jedynie z matematycznej interpretacji uzyskanych wyników opracowanych w oparciu o liniowy warunek stanu granicznego Coulomba-Mohra. Badanie zjawiska kohezji przy korzystaniu z wymienionego powyżej warunku pozostaje jak się wydaje nadal nie wyjaśnione.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zwiększenie wilgotności rozdrobnionej pszenicy powoduje wzrost współczynnika tarcia wewnętrznego. W badanym zakresie wilgotności 10%-18% współczynnik tarcia rośnie o około 6-10% zależnie od odmiany pszenicy i jej średniego wymiaru cząstki.
2. Stwierdzono, że współczynnik tarcia wewnętrznego zmienia się nieliniowo ze zwiększeniem średniego wymiaru cząstki dla wszystkich badanych odmian pszenicy. Osiąga wartość maksymalną przy średnim wymiarze cząstki w zakresie od 1,3 mm do 1,4 mm.
3. Dla materiału niejednorodnego pod względem wymiarowym kohezja rośnie ze zwiększeniem średniego wymiaru cząstki i wilgotności.

PIŚMIENNICTWO

1. Bucklin R.A., Thompson S.A., Ross I.J., Biggs R.H.: Apparent dynamic coefficient of friction of corn on galvanized steel bin wall material. Trans. of the ASAE, 36 (6), 1915-1918, 1993.
2. Frączek J.: Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Zeszyt 252, Kraków 1999.
3. Horabik J., Łukaszuk J.: Czynniki wpływające na dokładność pomiaru kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy. Mat. II Zjazdu Naukowego Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego. Referaty i doniesienia, Lublin-Dąbrowica, 11-12.09.2000, 175-176.
4. Horabik J., Grochowicz M.: Wyznaczanie parametrów plastycznego płynięcia sypkich surowców spożywczych. Mat. II Zjazdu Naukowego Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego. Referaty i doniesienia, Lublin-Dąbrowica, 11-12.09.2000r., 176-177.
5. Laskowski J., Andrejko D.: Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego sypkich materiałów roślinnych. Post. Tech. Przetw. Spoż., 1, 11-13, 1994.
6. Laskowski J., Andrejko D.: Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego nie rozdrobionych surowców sypkich. Probl. Inż. Rol., 4 (14), 57-67, 1996.
7. Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.: Tarcie ziarna pszenicy. Acta Agrophisica, 4, PAN, Lublin, 1995.

MEASUREMENT OF WHEATS INTERNAL FRICTION
COEFFICIENT FOR DIFFERENT MOISTURE AND RATE OF GRINDING

J. Laskowski, S. Skonecki

Department of Machine Operation in Food Industry, University of Agriculture
Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

Summary: Paper presents result of measure of internal friction coefficient and cohesion for three ground wheat cultivars in relation to their moisture and particle mean size. Research where carried out with a help of direct shear apparatus. An increase of internal friction coefficient and cohesion for higher values of moisture and mean particle size was observed.

Keywords: internal friction coefficient, wheat, moisture, particle size.