Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie



74

Józef Horabik, Marek Molenda

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE SYPKICH SUROWCÓW SPOŻYWCZYCH ZARYS KATALOGU

Monografia

Lublin 2002

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. rzecz. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego: prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk	prof. dr hab. J. Laskowski
prof. dr hab. I. Dechnik	prof. dr hab. P.P. Lewicki
prof. dr hab. D. Drozd	prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN
prof. dr hab. F. Dubert	prof. dr hab. E. Niedźwiecki
prof. dr hab. J. Fornal	prof. dr hab. J. Sielewiesiuk
prof. dr hab. E. Kamiński	prof. dr hab. W. Stępniewski
prof. dr hab. A. Kędziora	prof. dr hab. Z. Ślipek
prof. dr hab. T. Kęsik	prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN
prof. dr hab. Cz. Koźmiński	

Redaktor tomu doc. dr hab. Józef Horabik

Opiniował do druku

prof. dr hab. Janusz Laskowski

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201 20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl http://www.ipan.lublin.pl

> Publikacja indeksowana przez Polish Scientific Journals Contents - Life Sci. w sieci Internet pod adresem http://www.psjc.icm.edu.pl

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2002

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

ISSN 1234 - 4125

Wydanic I. Nakład 250 cgz. Ark. wyd. 6,9 Skład komputerowy: Agata Woźniak Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

	WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
	DEFINICJE PODSTAWOWYCH POJĘĆ	6
1.	WSTĘP	7
2.	CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH MATERIAŁÓW	
	SYPKICH	9
	2.1. Gęstość	9
	2.2. Tarcie zewnętrzne	11
	2.3. Parametry wytrzymałości materiału sypkiego	14
	2.4. Iloraz naporu	18
	2.5. Sprężystość	19
	2.6. Wpływ parametrów materiału sypkiego na rozkład parcia	
	w silosie oraz rodzaj przepływu	20
3.	PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH	22
	3.1. Metody pomiaru gęstości	22
	3.2. Metody pomiaru współczynnika tarcia zewnętrznego	23
	3.3. Metody pomiaru parametrów wytrzymałości na ścinanie	26
	3.4. Metody pomiaru kąta nasypu	30
	3.5. Metody pomiaru ilorazu naporu	32
	3.6. Metody pomiaru parametrów sprężystości	34
4.	OPIS ZASTOSOWANYCH PROCEDUR POMIAROWYCH	36
	4.1. Podstawowe parametry geometryczne	36
	4.2. Pomiar porowatości	37
	4.3. Pomiar gęstości	37
	4.4. Pomiar współczynnika tarcia zewnętrznego	38
	4.5. Pomiar kąta tarcia zewnętrznego	39
	4.6. Wyznaczanie parametrów wytrzymałości na ścinanie	40
	4.7. Wyznaczanie funkcji płynięcia	44
	4.8. Wyznaczanie ilorazu naporu	45
	4.9. Wyznaczanie parametrów sprężystości	46
5.	KATALOG WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH SYPKICH SUROWCÓW	
	SPOŻYWCZYCH	47
	5.1. Podstawowa charakterystyka	47
	5.2. Gęstość i porowatość	49
	5.3. Współczynnik tarcia zewnętrznego	52

	5.4. Kąt tarcia zewnętrznego	62
	5.5. Kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, indeks płynięcia, kąt nasypu	72
	5.6. Iloraz naporu	76
	5.7. Moduł sprężystości i stała Poissona	78
6.	WNIOSKI	80
7.	PIŚMIENNICTWO	83
8.	STRESZCZENIE	88
9.	SUMMARY	89

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A pole powierzchni przekroju poprzecznego [m²];
- c kohezja [kPa];
- d średni wymiar ziarna ośrodka [m];
- D średnica komory pomiarowej [m];
- E_m moduł sprężystości [MPa];
- $g = 9,81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \text{przyspieszenie ziemskie};$
- H wysokość [m];
- i indeks płynięcia;
- k iloraz naporu poziomego do pionowego;
- k_s iloraz naporu wyznaczany w teście jednoosiowego ściskania;
- k_{φ} iloraz naporu wyliczany na podstawie kąta tarcia wewnętrznego;
- ΔL przemieszczenie [mm];
- p porowatość [%];
- R_t wysokość nierówności [mm];
- w wilgotność [%];
- x, y, z układ współrzędnych [m];
- α kąt nachylenia leja względem pionu [deg];
- β współczynnik określający krzywiznę warunku plastyczności;
- $\gamma = \rho g$ ciężar objętościowy [kN m⁻³];
- δ efektywny kąt tarcia wewnętrznego [deg];
- φ kąt tarcia wewnętrznego [deg];
- φ_w kąt tarcia o materiały konstrukcyjne [deg];
- μ współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne;
- v stała Poissona;
- θ kąt nasypu [deg];
- ρ gęstość [kg·m⁻³];
- ρ_{ko} gęstość właściwa [kg·m⁻³];
- σ_1 , σ_2 , σ_3 naprężenia główne [kPa];
- σ_c wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [kPa];
- σ_n naprężenie normalne [kPa];
- σ_r naprężenie konsolidacji [kPa];
- σ_t wytrzymałość na rozciąganie [kPa];
- σ_{vo} napór pionowy podczas zagęszczania materiału sypkiego [kPa];
- σ_x napór poziomy [kPa];
- σ_z napór pionowy [kPa];
- τ naprężenie styczne [kPa].

DEFINICJE PODSTAWOWYCH POJĘĆ

Kohezja. Naprężenie styczne podczas plastycznej deformacji przy zerowym naprężeniu normalnym. Punkt przecięcia krzywej warunku plastyczności z układem współrzędnych.

Efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ . Kąt nachylenia efektywnego warunku plastyczności względem układu współrzędnych.

Efektywny warunek plastyczności (Effective yield locus - EYL). Linia prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych (σ , τ) i styczna do koła Mohra dla ustalonego płynięcia w stanie krytycznym.

Funkcja płynięcia (Flow function - FF). Zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie od większego naprężenia głównego podczas konsolidacji - $\sigma_c(\sigma_1)$.

Gęstość. Iloraz masy materiału sypkiego do objętości. Gęstość materiału sypkiego w ściśle określonym stanie konsolidacji.

Iloraz naporu k. Iloraz naporu w kierunku poziomym do naporu w kierunku pionowym.

Indeks płynięcia i. Współczynnik kierunkowy stycznej do funkcji płynięcia.

Kąt tarcia wewnętrznego φ . Kąt nachylenia warunku plastyczności względem osi naprężenia normalnego.

Naprężenie konsolidujące σ_i . Większe naprężenie główne koła Mohra stycznego do warunku plastyczności w stanie ustalonego płynięcia.

Porowatość. Stosunek objętości przestrzeni powietrznych do ogólnej objętości materiału sypkiego.

Stan krytyczny. Materiał sypki jest w stanie krytycznym jeśli jego gęstość jest krytyczna ze względu na stan naprężenia, czyli jeśli plastyczne płynięcie odbywa się bez zmiany objętości materiału.

Ustalone plastyczne płynięcie. Plastyczna deformacja w stanie krytycznym. Odbywa się bez deformacji objętościowej.

Warunek plastyczności (Yield locus - YL). Obwiednia kół Mohra dla plastycznego płynięcia materiału.

Warunek plastyczności w stanie ustalonego płynięcia. Obwiednia kół Mohra dla stanów ustalonego płynięcia (może nie przechodzić przez początek układu współrzędnych (σ , τ)).

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c . Większe naprężenie główne koła Mohra stycznego do warunku plastyczności przy mniejszym naprężeniu głównym równym zeru.

1. WSTĘP

Surowce i produkty rolnicze w stanie sypkim występują w wielu operacjach technologicznych w rolnictwie i przemyśle spożywczym. Opracowanie efektywnych metod projektowania procesów technologicznych wymaga dokładnej znajomości właściwości fizycznych obrabianego materiału oraz poprawnego rozumienia oddziaływań zachodzących w relacji z materiałami konstrukcyjnymi. Maszyny, aparaty i urządzenia do obróbki i przetwarzania materiałów sypkich powinny spełniać dwa podstawowe wymagania: zapewniać utrzymanie wysokiej jakości przetwarzanych materiałów oraz prawidłowy i bezpieczny przebieg przeprowadzanych operacji [8,40,80].

Materiały sypkie wyraźnie odróżniają się od typowych stanów skupienia materii: gazu, cieczy i ciała stałego. Często wyrażany jest pogląd, że materiał sypki zachowuje się jak oddzielny stan skupienia. Na poparcie tego poglądu wskazywane są trzy charakterystyczne oddziaływania, typowe dla materiałów sypkich: istnienie tarcia statycznego, niesprężyste zderzenia oraz praktycznie zerowa energia ruchów termicznych w porównaniu do energii potencjalnej pola grawitacyjnego. Niezwykle złożone zachowanie się materiałów sypkich, mieszanina dobrze już zrozumianych a także wciąż jeszcze nie poznanych praw fizycznych rządzących zachowaniem się tych materiałów, nastręcza wiele poważnych problemów praktyce inżynierskiej, która radzić musi sobie na swój własny sposób.

Problemy pojawiające się w praktyce stwarzają pilną potrzebę szukania rozwiązań w sferze techniki i teorii oraz badania relacji stosowanych surowców sypkich z materiałami konstrukcyjnymi. Rosnąca ilość operacji technologicznych z udziałem sypkich surowców spożywczych spowodowała w ostatnich dziesięcioleciach zwiększone zainteresowanie badaniem fizycznych właściwości tych materiałów. Szczególnie dużego znaczenia nabiera doskonalenie metod pomiaru i poprawa dokładności wyznaczania właściwości fizycznych. Mimo znacznego postępu w rozwoju metod pomiarowych wyniki badań prowadzonych w różnych laboratoriach różnią się znacznie między sobą. Istotnym źródłem rozrzutu wyników jest zbyt duża ilość rozpowszechnionych metod pomiarowych oraz brak ujednoliconej procedury pomiarowej. Ponadto częstym źródłem zmienności jest również nie w pełni kontrolowany wpływ takich czynników, jak: wilgotność, gęstość i struktura upakowania oraz historia obciążenia. Normy projektowania zbiorników na materiały sypkie - Eurocode 1 [17] oraz PN-B-03254 [77] zalecają wyznaczać parametry materiałów sypkich dla poszczególnych realizacji technicznych według ściśle określonych procedur pomiarowych. Wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu na dokładne wartości podstawowych właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych, w niniejszym opracowaniu zgromadzono wyniki pomiarów prowadzonych według jednolitych procedur pomiarowych spełniających zalecenia normy Eurocode 1 i uwzględniających specyfikę materiałów pochodzenia biologicznego. Opracowanie niniejsze traktujemy jako pierwszy etap prac zmierzających do utworzenia katalogu właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych. Zamieszczone w nim dane zebrano podczas badań wykonanych w ramach projektu badawczego KBN nr 5P06F 021 17.

Opracowanie składa się z czterech części:

- 1. charakterystyki właściwości fizycznych materiałów sypkich pochodzenia biologicznego obejmującej zwięzłe omówienie wpływu najważniejszych czynników oraz fizyczną interpretację rozważanych zależności,
- przeglądu metod pomiarowych zawierającego krytyczną analizę metod wyznaczania właściwości fizycznych materiałów sypkich, na podstawie której dokonano wyboru metody oraz procedury pomiaru najwłaściwszej do danego zastosowania,
- opisu zastosowanych metod pomiarowych zawierającego propozycje ujednolicenia procedur pomiarowych dostosowanych do zaleceń norm oraz do specyfiki materiałów sypkich pochodzenia biologicznego,
- 4. katalogu właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych o szerokim zakresie rozdrobnienia materiału (1 ziarno zbóż i nasiona roślin uprawnych, 2- kasze i płatki, 3 proszki spożywcze mąka, cukier, mleko w proszku), zawierającego takie właściwości fizyczne, jak: parametry geometryczne, porowatość, gęstość, współczynnik i kąt tarcia o materiały konstrukcyjne, kąt nasypu, kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, indeks płynięcia, iloraz naporu, moduł sprężystości i stała Poissona.

Mamy nadzieję, że niniejsze opracowanie będzie pomocne Czytelnikom poszukującym szczegółowych informacji na temat właściwości fizycznych materiałów sypkich. Nie ma dotychczas zbyt wielu monografii poświęconych tej tematyce. Chcielibyśmy, aby nasz zamiar wypełnienia tej luki, jeżeli nawet okaże się nie do końca udany, to przynajmniej zwróci uwagę na dużą potrzebę powstawania nowych pozycji z tej dziedziny.

2. CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH

2.1. Gęstość

Gęstość materiału sypkiego jest jednym z podstawowych parametrów służących do wyznaczenia naporu materiału sypkiego na konstrukcję silosu. Jest również niezbędna do prawidłowego oszacowania pojemości zbiorników.

Gęstość w stanie zsypnym jest najbardziej rozpowszechnioną miarą gęstości materiałów sypkich. Gęstość w stanie zsypnym masy nasion zmienia się na ogół w dość znacznych granicach zależnie od gatunku i odmiany, wilgotności, warunków uprawy i innych czynników. Dlatego też w wielu opracowaniach na ogół podawane są jedynie przedziały wartości gęstości [11,20,21,34,35]. Gęstość materiału w silosie jest większa od gęstości w stanie zsypnym a ponadto wzrasta w miarę upływu czasu składowania. Wzrostowi gęstości sprzyjają wstrząsy zbiornika. Gęstość materiału sypkiego w zbiorniku zależy od wielu czynników, spośród których najistotniejszymi są: właściwości poszczególnych ziaren, ilość zanieczyszczeń, napór, wilgotność oraz sposób napełniania [8,12,101].

Napełnianie silosu strumieniem rozproszonym zwiększa gęstość o kilka procent w porównaniu z napełnianiem zwartym strumieniem. Stephens i Foster [92] stwierdzili wzrost gęstości od 3 do 5% powyżej gęstości usypnej przy napełnianiu z otworu zasypowego oraz 7% w przypadku napełniania rozproszonego. Versavel i Britton [102] wykazali, że gęstość zależy od wysokości opadania nasion, stopnia zanieczyszczenia oraz szybkości napełniania. Badacze ci odnotowali istotny wzrost gęstości (8-10%) ze wzrostem szybkości napełniania a następnie jej spadek w przypadku bardzo dużej szybkości napełniania. Ze wzrostem wysokości opadania wzrasta energia kinetyczna nasion, co zwiększa gęstość upakowania [69]. Wpływ ten zanika powyżej pewnej wysokości, ze względu na wzrost oporu powietrza podczas swobodnego spadania nasion.

Gęstość materiału sypkiego jest monotonicznie rosnącą, nieliniową funkcją naporu. Do opisu tej zależności najczęściej stosowana jest funkcja potęgowa, wykładnicza bądź logarytmiczna [22]. Drugim istotnym czynnikiem jest wilgotność. Ze wzrostem wilgotności wzrasta objętość nasion oraz ich odkształcalność. Wzrost wilgotności prowadzi do spadku gęstości właściwej nasion. Skutkiem tego ze wzrostem wilgotności maleje gęstość w stanie zsypnym. W przypadku dużych wartości naporu gęstość materiału skonsolidowanego wzrasta ze wzrostem wilgotności na skutek wzrostu odkształcalności ziaren (Rys. 1).



Rys. 1. Gęstość skonsolidowanego złoża ziarna pszenicy jako funkcja wilgotności i naporu normalnego [99].

Fig. 1. The bulk density of consolidated sample of wheat grain as a function of moisture content and pressure [99].

Norma ASAE Standard [1] zaleca, aby gęstość złoża nasion potrzebną do określenia pojemności silosów niezbędnej do zmagazynowania odkreślonej partii materiału wyznaczać dla konkretnej wartości wilgotności na podstawie empirycznych zależności przedstawionych w Tabeli 1. Z kolei norma Eurocode 1 zaleca, aby dla potrzeb obliczania naporu materiału sypkiego stosować ciężar objętościowy ($\gamma = \rho g$) składowanych materiałów (Tab. 2).

Tabela 1. Aproksymacja zależności gęstości ρ nasion od wilgotności w (w = wilgotność w.b. %/100) [1] **Table 1.** Approximation of the the bulk density of seeds ρ as a function of the moisture content w(w = moisture content w.b. %/100) [1]

Nasiona	Gęstość $ ho$ [kg m ⁻³]	Źródło
Wilgotność: 15-40%		
Jęczmień	$\rho = 705, 4 - 1142 \ w + 1950 \ w^2$	Brusewitz [10]
Kukurydza	$\rho = 1086,3 - 2971 \text{ w} + 4810 \text{ w}^2$	~~
Owies	$\rho = 773,0 - 2311 w + 3630 w^2$	~~
Żyto	$\rho = 974,8 - 2052 w + 2850 w^2$	~~
Sorgo	$\rho = 829, 1 - 643 \ w + 660 \ w^2$	~~
Soja	$\rho = 734,5 - 219 w + 70 w^2$	~~
Pszenica	$\rho = 885,3 - 1631 w + 2640 w^2$	
Wilgotność: 3-24%		
Pszenica	$\rho = 774,4-703 w + 18510 w^2 -$	Nelson [71]
	$148960 w^3 + 311600 w^4$	
Wilgotność: 10-35%		
Kukurydza	$\rho = 701,9 + 1676 w -$	~~
	$11598 w^2 + 18240 w^3$	

Wartość gęstości sypkich surowców spożywczych ρ , na podstawie której wyznaczany jest ciężar objętościowy ρ_g zalecany do obliczania naporu, jest znacznie wyższa niż gęstość stosowana do obliczania pojemności zbiorników.

Table 2. Ciężar objętościowy γ skonsolidowanych materiałów sypkich według normy Eurocode 1 [17] **Table 2.** Bulk weight density γ of consolidated granular materials according to the Eurocode 1 standard [17]

Materiał sypki	Ciężar objętościowy złoża materiału sypkiego $\gamma = \rho g \ [kN \cdot m^{-3}]$	
Cukier	9,5	
Jęczmień	8,5	
Kukurydza	8,5	
Mąka	7,0	
Pszenica	9,0	

2.2. Tarcie zewnętrzne

Spośród wielu czynników wpływających na tarcie materiału sypkiego o powierzchnie konstrukcyjne do najważniejszych zaliczyć należy: rodzaj powierzchni, jej szorstkość, napór normalny, drogę poślizgu, prędkość poślizgu, właściwości powierzchniowe materiału sypkiego, wilgotność, orientację ziaren ośrodka względem kierunku poślizgu oraz warunki otoczenia [6,18,25,48,51,58, 85,100,108]. Poszczególne odmiany i gatunki nasion różnią się między sobą pod względem właściwości ciernych. Jedną z przyczyn jest różnica w szorstkości oraz fakturze powierzchni nasion. W przypadku proszków spożywczych (mąka, cukier, mleko w proszku) istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia ma stan rozdrobnienia oraz skład chemiczny. Wymienione czynniki wpływają zarówno na wartość współczynnika tarcia jak również na kształt zależności od innych czynników.

Wśród wymienionych czynników najsilniejszy wpływ ma szorstkość powierzchni. Współczynnik tarcia rośnie ze wzrostem wysokości nierówności. Najszybsze zmiany współczynnika tarcia występują, gdy wysokość nierówności powierzchni trącej zmienia się w zakresie porównywalnym z wysokością nierówności powierzchni ziarna materiału sypkiego, tj. kilka µm. W przypadku ziarna zbóż największy przyrost współczynnika tarcia (od ok. 0,05 do 0,55)

występuje, gdy wysokość nierówności powierzchni trącej zmienia się w zakresie od ok. 0,5 μ m do 10 μ m (Rys. 2). W zakresie wysokości nierówności poniżej 1 μ m decydujący wpływ na wartość współczynnika tarcia mają oddziaływania adhezyjne. Przy wysokości nierówności około 10 μ m współczynnik tarcia stabilizuje się. Wysokość nierówności powierzchni wpływa na względny udział składowej adhezyjnej i deformacyjnej w całkowitym oporze tarcia.



Rys. 2. Średnie wartości oraz 95% przedziały ufności współczynnika tarcia ziarna pszenicy dla pięciu wartości wysokości nierówności powierzchni stalowej [59].

Fig. 2. Mean values with 95% confidence interval of friction coefficient of wheat grain for five levels of height of roughness of steel surface [59].

W przypadku powierzchni gładkich o oporze tarcia decyduje udział składowej adhezyjnej. Z kolei, gdy wysokość nierówności powierzchni trącej przewyższa wysokość nierówności powierzchni materiału sypkiego decydujący jest udział składowej deformacyjnej powstającej na skutek skrawania powierzchni ziaren materiału sypkiego przez twardsze od niej nierówności powierzchni konstrukcyjnej.

W przypadku materiałów pochodzenia roślinnego jako jedno z głównych źródeł zmienności współczynnika tarcia wskazywana jest wilgotność [9,91,93]. Współczynnik tarcia na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności ziarna zbóż, zwłaszcza powyżej wilgotności 13%. Istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia, ma relacja pomiędzy wilgotnością ziarna i wilgotnością względną powietrza. Thompson i Ross [99] stwierdzili występowanie maksimum współczynnika tarcia ziarna pszenicy przy wilgotności ok. 20%. Ze wzrostem wilgotności rośnie odkształcalność ziaren. Ziarna deformują się łatwiej wokół nierówności powierzchni. Ze wzrostem wilgotności maleje również wysokość nierówności powierzchni ziarna. W wyniku złożenia tych oddziaływań rośnie siła niezbędna do zerwania kontaktu ciernego. Przy wzroście wilgotności powyżej 20% pojawia się wolna woda między powierzchniami, która osłabia wytrzymałość powstałego wiązania i współczynnik tarcia zaczyna maleć. Współczynnik tarcia maleje ze wzrostem nacisku normalnego. Spadek współczynnika tarcia ze wzrostem naporu tłumaczony jest mniejszym niż wprost proporcjonalny przyrostem naprężenia w punktach kontaktu ziarna z powierzchnią trącą przy wzroście średniego nacisku normalnego [59,99,106]. W celu wyraźnego rozdzielenia dwóch różnych zakresów nacisku normalnego, w których, z praktycznego punktu widzenia, istotna jest znajomość współczynnika tarcia norma Eurocode 1 [17] zaleca rozróżniać współczynnik tarcia oraz kąt tarcia. Współczynnik tarcia, służący dla obliczania parcia materiału sypkiego, należy wyznaczać przy maksymalnej wartości naporu normalnego na ścianę, jaka występuje w zbiorniku. Natomiast kąt tarcia, służący do określenia warunków tarcia materiału sypkiego o powierzchnię leja wysypowego podczas wypływu, należy wyznaczać przy niskiej wartości naporu normalnego, jaka występuje w bezpośrednim sąsiedztwie otworu wysypowego podczas opróżniania.

Wpływ drogi poślizgu na wartość współczynnika tarcia związany jest ze zmianą zachodzącą na powierzchni trącej. W efekcie długotrwałego tarcia następuje wygładzanie nierówności powierzchni oraz osadzanie się na niej substancji organicznej, np. kutyny w przypadku ziarna zbóż. Zmienia to w sposób istotny stan powierzchni poślizgu prowadząc do bardzo dużej (rzędu 50%) redukcji współczynnika tarcia [61].

Wpływ prędkości poślizgu należy do słabiej poznanych. Brubaker i Pos [9] stwierdzili, że współczynnik tarcia rośnie ze wzrostem prędkości w zakresie małych prędkości poślizgu. Kutzbach i Scherer [43] analizując przebieg procesu tarcia dla różnych materiałów konstrukcyjnych i biologicznych wskazują, że współczynnik tarcia osiąga maksimum przy prędkości około 1-2 m·s⁻¹.

Innym istotnym elementem procesu tarcia jest powstawanie drgań ciernych. Objawiają się one jako nagłe szarpnięcia podczas przemieszczania się materiału sypkiego względem powierzchni. Brubaker i Pos [9] stwierdzili, że siła tarcia z reguły rośnie asymptotycznie do pewnej wartości, przy której pojawiają się drgania cierne. Zjawisko to na ogół zanika powyżej pewnej prędkości poślizgu, zwanej prędkością krytyczną. W przypadku tarcia ziarna pszenicy o blachę stalową ocynkowaną drgania ustają przy prędkości rzędu 10 mm·min⁻¹. Ibrahim [36] wskazuje prędkość poślizgu, czas, wilgotność, kształt kontaktujących się powierzchni, ich teksturę, obecność warstwy powierzchniowej oraz nacisk normalny jako najistotniejsze czynniki decydujące o przebiegu i charakterze drgań ciernych.

Norma Eurocode 1 podaje orientacyjne wartości współczynnika tarcia o stal oraz beton dla pięciu typowych sypkich surowców spożywczych (Tab. 3). W rzeczywistości współczynnik tarcia zmienia się w dużo szerszym zakresie. Norma zaleca więc wyznaczać współczynnik tarcia dla poszczególnych realizacji technicznych według ściśle określonej procedury pomiaru.

Materiał	Współczynnik tarcia o stal	Współczynnik tarcia o beton
Jęczmień	0,35	0,45
Mąka	0,30	0,40
Kukurydza	0,30	0,40
Cukier	0,45	0,55
Pszenica	0,30	0,40

Tabela 3. Współczynnik tarcia sypkich surowców spożywczych według normy Eurocode 1 [17]**Table 3.** Friction coefficient of granular food materials according to the Eurocode 1 standard [17]

2.3. Parametry wytrzymałości materiału sypkiego

Parametry wytrzymałości materiału sypkiego określają warunki, w których zachodzi przejście ze stanu sprężystego lub sztywnego do stanu plastycznego płynięcia. Parametry te służą między innymi do oceny możliwości grawitacyjnego wypływu materiałów sypkich. Na podstawie przebiegu warunku uplastycznienia wyznacza się następujące parametry:

- kąt tarcia wewnętrznego φ ,
- efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ , oraz
- kohezję c.

Zależnie od położenia i kształtu krzywej uplastycznienia materiały sypkie podzielić można na trzy grupy [26]:

1. Bezkohezyjne materiały doskonale sypkie, dla których warunek uplastycznienia reprezentuje prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi. \tag{1}$$

W materiałach tych kąt tarcia wewnętrznego φ równy jest efektywnemu kątowi tarcia wewnętrznego δ .

2. Materiały posiadające pewną kohezję *c*. Warunek uplastycznienia reprezentuje wówczas równanie:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c, \tag{2}$$

a kąt tarcia wewnętrznego φ różni się od efektywnego kąta tarcia δ .

3. Materiały silnie adhezyjne, dla których nieliniowy warunek uplastycznienia można zapisać w postaci np. równania Warren-Spring'a:

$$\left(\frac{\tau}{c}\right)^{\beta} = 1 + \frac{\sigma}{\sigma_{t}},\tag{3}$$

gdzie σ_t jest wytrzymałością na rozciąganie, zaś β określa krzywiznę warunku plastyczności, tzw. indeks ścinania (Rys. 3) [23, 26].

W praktyce, za materiały bezkohezyjne powszechnie przyjmuje się te materiały, dla których kohezja *c* wyznaczana przy naporze normalnym 100 kPa jest mniejsza niż 2 kPa [77]. Drugim kryterium pozwalającym wstępnie ocenić kohezyjność materiału jest stopień rozdrobnienia [82]. Materiały ziarniste (o wielkości ziarna d > 0,5 mm) powszechnie uznaje się za bezkohezyjne.



Rys. 3. Trzy typy materiałów sypkich: 1– bezkohezyjne, 2– kohezyjne, 3– silnie adhezyjne [26]. **Fig. 3.** Three types of granular materiałs: 1– cohesionless, 2– cohesive, 3– strong adhesive [26].

Bardzo użytecznym parametrem materiałów sypkich jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c określająca naprężenie, którego przekroczenie powoduje zniszczenie przesklepienia lub tunelu w leju zbiornika. Im wyższa jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie tym większa musi być średnica otworu wysypowego, aby wypływ materiału przebiegał w sposób niezakłócony. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określa punkt przecięcia z osią naprężenia normalnego σ_n koła Mohra stycznego do krzywej uplastycznienia i przechodzącego przez początek układu współrzędnych. Oznacza to, że do zniszczenia swobodnej powierzchni przesklepienia materiału sypkiego, skonsolidowanego wcześniej naprężeniem σ_1 , potrzebne jest naprężenie σ_c (Rys. 4).



Rys. 4. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c materiału sypkiego poddanego konsolidacji naprężeniem głównym σ_1 [90].

Fig. 4. Unconfined yield strength σ_c of granular material consolidated under the principal stress σ_1 [90].

Zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c od większego naprężenia głównego podczas konsolidacji σ_l nazywana jest funkcją płynięcia *FF* [37]. Funkcja ta charakteryzuje zdolność materiału do swobodnego wypływu ze zbiorników pod wpływem sił grawitacji [90]. Dane eksperymentalne wskazują, że w spotykanym w praktyce zakresie naprężenia konsolidującego funkcja płynięcia jest linią prostą bądź lekko wypukłą krzywą, którą można aproksymować prostą. Współczynnik kierunkowy stycznej do funkcji płynięcia w początkowym jej zakresie nosi nazwę indeksu płynięcia *i*. Jest on bardzo wygodnym parametrem pozwalającym klasyfikować materiały sypkie pod względem ich zdolności do swobodnego płynięcia (Rys. 5).



Rys. 5. Klasyfikacja materiałów sypkich ze względu na indeks płynięcia *i* [37,98]. **Fig. 5.** Classification of granular materials according to flow index *i* [37,98].

Konsolidacja zwiększa znacznie wytrzymałość na ścinanie materiałów sypkich i tym samym zmniejsza ich zdolność do płynięcia [39,47,67,98]. Dlatego w celu uzyskania możliwości przewidywania, czy przepływ materiału będzie mógł być wznowiony po okresie składowania, konieczne jest badanie wpływu czasu na wytrzymałość. W tym celu istotne jest określenie nie tylko doraźnego warunku uplastycznienia (YL), ale i czasowego warunku uplastycznienia (TYL – Time Yield Locus). Z powodu większej kohezji materiału linia TYL będzie usytuowana powyżej linii YL (Rys. 6). Często zachodzi więc potrzeba prowadzenia zarówno testów doraźnych jak i z uwzględnieniem wpływu czasu. W procedurze badań doraźnych usiłuje się odwzorować warunki naprężenia i odkształcenia występujące w fazie przepływu, tj. podczas działania znacznych parć konsolidujących i deformacji plastycznych. Badania wpływu czasu dotyczą natomiast fazy spoczynku, w której materiał jest poddany długotrwałemu działaniu parcia statycznego.



Rys. 6. Doraźny (YL), efektywny (EYL) i zależny od czasu konsolidacji warunek plastyczności (TYL) [37].

Fig. 6. Yield locus (YL), effective yield locus (EYL) and time yield locus (TYL) [37].

Kąt tarcia wewnętrznego zależy od właściwości pojedynczych ziaren ośrodka oraz od struktury upakowania materiału sypkiego [24,79]. W przypadku nasion roślin uprawnych czynnikami modyfikującymi właściwości fizyczne są: wilgotność, gatunek, odmiana, stan dojrzałości oraz warunki uprawy. Gęstość upakowania oraz przestrzenna struktura wzajemnego ułożenia ziaren ośrodka zależy od sposobu formowania złoża materiału, wilgotności, ciśnienia oraz czasu składowania [4,62,63,97].

Wilgotność decyduje zarówno o oporach tarcia pomiędzy ziarnami jak i ich odkształcalności. Wraz ze zmianą wilgotności ziaren zmieniają się zarówno ich właściwości powierzchniowe jak również następuje jakościowa zmiana właściwości mechanicznych [52]. Powietrznie suche ziarno, wykazujące cechy ciała sprężystego, w miarę wzrostu wilgotności zmienia się w ciało lepko-sprężyste a następnie plastyczne. Kąt tarcia wewnętrznego na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności ziarna

[27-29,95]. W szerokim zakresie zmian wilgotności zależność ta jest nieliniowa. W przypadku ziarna o podwyższonej wilgotności kąt tarcia wewnętrznego wzrasta również w miarę upływu czasu konsolidacji.

Powietrznie suche ziarno zbóż na ogół nie posiada kohezji. W złożu suchego ziarna siły kohezji również niewiele wzrastają w miarę upływu czasu konsolidacji. Pojawiają się natomiast przy większej wilgotności materiału i szybko wzrastają w miarę upływu czasu składowania [7]. W skrajnym przypadku siły kohezji mogą prowadzić do zlegania materiału [105]. Jedną z przyczyn jest szybki wzrost pola powierzchni wzajemnego kontaktu ziaren ze wzrostem wilgotności powodujący gwałtowny wzrost sił wiązań powierzchniowych w miarę upływu czasu składowania.

2.4. Iloraz naporu

Iloraz naporu poziomego do pionowego *k* (nazywany też stałą Janssena) jest parametrem używanym powszechnie do obliczania naporu w pionowej części silosu. W materiale sypkim naprężenie w kierunku pionowym powstaje na ogół tylko pod wpływem siły ciężkości ziarna. Ze względu na tarcie naprężenie to jest jedynie częściowo przekazywane w kierunku poziomym, co sprawia, że w stanie spoczynku iloraz naporu jest mniejszy niż 1 [5,60,96,107]. Iloraz naporu nie jest wielkością stałą lecz, podobnie jak kąt tarcia wewnętrznego, zależy od właściwości pojedynczych ziaren ośrodka, gęstości i struktury upakowania, naporu, historii obciążenia oraz wilgotności. Wartości ilorazu naporu zalecane do stosowania przez normy budowlane mieszczą się w przedziale od 0,3 do 0,5 [17].

Wzrost wilgotności powoduje na ogół spadek ilorazu naporu. Przyczyną jest wzrost kąta tarcia wewnętrznego oraz odkształcalności ziaren. Duży wpływ na iloraz naporu ma struktura upakowania ziaren ośrodka zależna między innymi od sposobu napełniania zbiornika [46]. Napełnianie rozproszone powoduje powstanie wyższej gęstości materiału w porównaniu z napełnianiem centrycznym. Powoduje to wzrost kąta tarcia wewnętrznego i spadek ilorazu naporu. Zwarta struktura materiału uzyskana podczas napełniania strumieniem rozproszonym sprawia również, że podczas opróżniania często powstaje przepływ rdzeniowy. Napełnianie centryczne zwartym strumieniem wytwarza luźniejszą strukturę upakowania niż napełnianie rozproszone, a ponadto wprowadza pewną uprzywilejowaną orientację punktów styku ziaren w wyniku powolnego ześlizgiwania się ziaren wzdłuż tworzącej stożka naturalnego usypu. Kąt tarcia wewnętrznego jest mniejszy nie tylko na skutek mniejszej gęstości upakowania, ale również na skutek wytworzenia specyficznej struktury punktów kontaktu ziaren. W wyniku tego iloraz naporu jest wyższy, a podczas opróżniania materiał wykazuje tendencję do przepływu masowego. Iloraz naporu w znacznym stopniu zależy od stanu mobilizacji sił tarcia wewnętrznego i zewnętrznego. W przypadku systematycznego wzrostu obciążania złoża materiału w silosie iloraz naporu wzrasta monotonicznie do pewnej, charakterystycznej dla danego materiału sypkiego, wartości. Naprężenie w kierunku poziomym jest wtedy mniejsze niż w kierunku pionowym. Taki stan naprężenia w złożu materiału sypkiego w zbiorniku nazywamy czynnym. Jest on typowy dla operacji napełniania i składowania. Można wtedy przyjąć, że tarcie o ścianę jest w pełni zmobilizowane, natomiast nie musi być w pełni zmobilizowane tarcie wewnętrzne.

Z kolei podczas opróżniania zbiornika maleje przede wszystkim naprężenie w kierunku pionowym. Na skutek histerezy sprężysto-plastycznej materiału zachodzi redystrybucja stanu naprężenia – naprężenie w kierunku poziomym maleje znacznie wolniej niż w kierunku pionowym. Taki stan naprężenia w złożu materiału sypkiego nazywamy biernym. W biernym stanie naprężenia iloraz naporu jest dużo większy niż w czynnym.

Typowe wartości ilorazu naporu sypkich surowców spożywczych zalecane przez normę Eurocode 1 do stosowania przy projektowaniu silosów na materiały sypkie zamieszczono w Tabeli 4.

Materiał	Iloraz naporu k
Jęczmień	0,55
Mąka	0,40
Kukurydza	0,50
Cukier	0,50
Pszenica	0,55

 Tabela 4. Iloraz naporu sypkich surowców spożywczych według normy Eurocode 1 [17]

 Table 4. Pressure ratio of granular food materials according to the Eurocode 1 standard [17]

2.5. Sprężystość

Magazynowany materiał sypki zagęszcza się pod wpływem własnego ciężaru oraz obciążenia zewnętrznego. Zagęszczenie wzrasta w wyniku zmiany upakowania oraz deformacji ziaren ośrodka. Wypadkowe odkształcenie objętościowe jest sumą odkształcenia odwracalnego, wywołanego sprężystą deformacją ziaren a zatem znikającego po usunięciu obciążenia, oraz odkształcenia nieodwracalnego (plastycznego) - związanego ze zmianą wzajemnego ułożenia ziaren. Sprężystość materiału ma bardzo duży wpływ na parcie przekazywane przez materiał sypki na konstrukcję zbiornika [54,55]. Do rozwiązywania praktycznych zagadnień przyjmowana jest empiryczna zależność modułu sprężystości od ciśnienia najczęściej potęgowa [84], bądź też, dla danego zakresu ciśnienia, stała wartość modułu sprężystości [77]. Moduł sprężystości maleje ze wzrostem wilgotności materiału.

Polska Norma PN-B-03254 [77] zaleca Stosować zmienną wartość modułu sprężystości złoża ziarna, zależną od wielkości silosu, czyli inaczej od zakresu naprężenia w złożu materiału sypkiego (Tab. 5) oraz stałą wartość współczynnika Poissona $v_m = 0,4$.

	Moduł sprężystości ziarna zbóż $E_{\rm m}$ [MPa]	
Średnica silosu D [m]	Wysokość $H = 15 \text{ m}$	Wysokość <i>H</i> = 30 m
≤ 6	7	7
6÷9	10	20
> 9	20	40

Tabela 5. Moduł sprężystości ziarna zbóż według normy PN-B-03254 [77]Table 5. Modulus of elasticity of cereal grains according to the PN-B-03254 standard [77]

2.6. Wpływ parametrów materiału sypkiego na rozkład parcia w silosie oraz rodzaj przepływu

Znajomość dokładnych wartości takich właściwości fizycznych materiałów sypkich, jak: gęstość, kąt tarcia wewnętrznego, kąt tarcia o materiały konstrukcyjne oraz iloraz naporu jest niezbędna do właściwego projektowania urządzeń oraz przewidywania przebiegu wykonywanych operacji technologicznych. Wobec dużego zapotrzebowania na wiarygodne i sprawdzone metody projektowania silosów oraz wartości parametrów magazynowanego materiału w ciągu ostatnich dwudziestu lat wiele organizacji i komitetów podjęło się opracowania bądź nowelizacji odnośnych norm. Przykładem mogą być normy Eurocode 1 [17] oraz PN-B-03254 [77]. Dostrzega się przy tym powszechną tendencję odchodzenia od stosowania katalogowych wartości parametrów mechanicznych materiałów sypkich zalecając bezpośredni ich pomiar dla konkretnej realizacji według ściśle określonych procedur eksperymentalnych.

Przegląd norm dotyczących projektowania silosów na materiały sypkie wskazuje, że do obliczania parcia materiału sypkiego stosowane jest powszechnie równanie Janssena, zgodnie z którym napór w części pionowej silosu jest wykładniczą funkcją wysokości słupa materiału [103]:

$$\sigma_{z} = \frac{\rho g D}{4k\mu} \left(1 - e^{-\frac{4k\mu}{D}z} \right)$$

$$\sigma_{x} = k\sigma_{z}$$
(4)

 $\sigma_t = k\mu\sigma_z$

gdzie: D -średnica silosu [m],

 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^2 - \text{przyspieszenie ziemskie},$

k – iloraz naporu,

- z współrzędna pionowa, wysokość słupa materiału sypkiego [m],
- μ = współczynnik tarcia o powierzchnię ściany,
- ρ gęstość składowanego materiału [kg·m⁻³],
- σ_{i} napór styczny [Pa],
- σ_x napór poziomy [Pa],

 σ_{z} – napór pionowy [Pa].

W powyższym równaniu wszystkie trzy parametry materiałowe (ρ , k, μ) zostały przyjęte jako stałe. W rzeczywistości właściwości te zmieniają się zarówno w obszarze samego zbiornika jak również w miarę upływu czasu. Różne normy zalecają różne procedury postępowania w takiej sytuacji. Przykładowo, norma ASAE Standard EP433 [2] zaleca, aby w przypadku dużej zmienności współczynnika tarcia o ścianę (np. ziarno zbóż) stosować w obliczeniach dwie skrajne jego wartości: maksymalną – występującą na początku użytkowania zbiornika oraz równowagową – występującą po osadzeniu się na ścianie równowagowej warstwy kutyny. Do wyliczenia naporu stycznego norma zaleca stosować maksymalną wartość współczynnika tarcia, zaś do wyliczenia naporu poziomego oraz pionowego na dno - wartość równowagową. Dzięki temu w obliczeniach występują maksymalne wartości wszystkich naporów: pionowego, poziomego oraz stycznego. Podnosi to niewątpliwie bezpieczeństwo i niezawodność działania projektowanych zbiorników. Znajomość parametrów materiału sypkiego jest nieodzowna również przy projektowaniu przepływu materiału w silosie. Przy dużym kącie pochylenia leja silosu względem poziomu i małym kącie tarcia wewnętrznego powstaje przepływ masowy, czyli przepływ równomiernym strumieniem na całym przekroju zbiornika (Rys. 7). Przy dużej wartości kąta tarcia wewnętrznego i małej kąta pochylenia leja powstaje przepływ tunelowy, czyli wąski kanał przepływu wewnątrz nieruchomego materiału. W przypadku pośrednim decydująca jest relacja pomiędzy wartością kąta tarcia wewnętrznego i kąta tarcia o ścianę. Przy dużym kącie pochylenia leja względem poziomu i dużym kącie tarcia o jego powierzchnię, duży kąt tarcia wewnętrznego sprzyja przepływowi masowemu. Natomiast przy małym kącie pochylenia leja i małym kącie tarcia o jego powierzchnię, większy kąt tarcia wewnętrznego sprzyja przepływowi rdzeniowemu. W przypadku skrajnie dużych wartości kąta tarcia wewnętrznego, kohezji oraz kąta tarcia o ścianę dojść może do powstania przesklepienia w leju silosu.



Rys. 7. Granice pomiędzy przepływem masowym i rdzeniowym w leju stożkowym [17]. **Fig. 7.** Limit between mass flow and funnel flow for conical hopper [17].

3. PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH

3.1. Metody pomiaru gęstości

Metoda wyznaczania gęstości w stanie zsypnym (gęstość usypna) polega na pomiarze masy materiału sypkiego nasypanego w ściśle określony sposób do cylindrycznego pojemnika o stałej objętości, zwykle 0,25 lub 1 dm³ [8,75,76]. Sposób przeprowadzania pomiaru gęstości usypnej ziarna zbóż precyzuje norma PN-73/R-74007 [75]. Gęstość w stanie utrzęsionym dostarcza informacji o podatności materiału sypkiego na zagęszczanie w warunkach wstrząsów. Zgodnie z normą pomiar polega na doprowadzeniu znanej masy materiału sypkiego do najmniejszej objętości poprzez zastosowanie drgań o stałej amplitudzie i częstości [76]. Inna metoda pomiaru polega na napełnieniu maksymalną ilością materiału sypkiego stałej objętości również wykorzystując zagęszczający wpływ drgań mechanicznych [14]. Gęstość utrzęsiona ziarna zbóż jest większa od gęstości usypnej o kilka do kilkunastu procent [94]. Zarówno gęstość usypna jak i utrzęsiona typowych materiałów rolniczych różni się na ogół istotnie od rzeczywistej gęstość materiału w silosie [8,12].

Norma Eurocode 1 [17] zaleca, aby do obliczania naporu materiału sypkiego stosować ciężar objętościowy wyznaczany eksperymentalnie w warunkach jednoosiowego ściskania według ściśle określonej procedury. Próbkę materiału umieszcza się w cylindrycznym pojemniku o średnicy *D*, która jest co najmniej 40 razy większa od maksymalnego wymiaru cząstki. Wysokość zagęszczonej próbki *H* powinna zawierać się w przedziale 0,3-0,4*D*. Stosowanie ciężaru objętościowego (ilorazu ciężaru skonsolidowanej próbki do jej objętości) zalecane jest tylko do obliczeń naporu. Gęstość materiału sypkiego wyznaczona zgodnie z powyższymi zaleceniami przy naporze normalnym 100 kPa przyjmuje na ogół wartości pośrednie pomiędzy gęstościami usypną i utrzęsioną.

3.2. Metody pomiaru współczynnika tarcia zewnętrznego

Pomiar współczynnika tarcia materiału sypkiego o powierzchnie konstrukcyjne należy do stosunkowo prostych. Wymaga urządzenia, w którym warstwa materiału sypkiego przemieszcza się względem powierzchni trącej. Rysunek 8 przedstawia typowe schematy układów pomiarowych do wyznaczania współczynnika tarcia. Przy ruchu prostoliniowym powierzchnia trąca ma kształt płaskiej płyty lub taśmy, przy ruchu obrotowym jest to taśma lub walec. Układy z płaską płytą charakteryzują się równomiernym rozkładem prędkości poślizgu. Ograniczeniem jest natomiast maksymalna prędkość i droga poślizgu. Z kolei układy z tarczą obrotową dają łatwość wymiany powierzchni trącej, nieograniczoną drogę tarcia, równomierny nacisk normalny, dużą lecz nierównomierną wzdłuż promienia tarczy prędkość poślizgu.

Dostępne w literaturze dane eksperymentalne wskazują na dużą zmienność współczynnika tarcia [25,51,85,91,93]. Przypuszcza się, że istotny udział w tej zmienności ma duża ilość metod pomiarowych oraz brak ujednolicenia procedury pomiarowej [8,38].







c)











Fig. 8. Schematic diagram of devices for determination of the friction coefficient of granular solids [59].

Norma Eurocode 1 [17] zaleca, aby współczynnik tarcia zewnętrznego wyznaczać w aparacie Jenikego (służącym do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego) zastępując w nim dolną część komory pomiarowej materiałem konstrukcyjnym, dla którego będzie wyznaczany współczynnik tarcia (Rys. 9). Stosunek wysokości próbki do średnicy powinien mieścić się w przedziale 0,15-0,2. Naprężenie normalne powinno być równe maksymalnemu naporowi poziomemu w silosie lub połowie naprężenia odniesienia ($1/2\sigma_r = 50$ kPa). Zaleca się, aby prędkość przemieszczenia była stała i wynosiła około 0,04 mm·s⁻¹. Do obliczania współczynnika tarcia μ należy stosować siłę tarcia o stabilnej wartości występującą przy dużym przemieszczeniu ΔL .



Rys. 9. Schematy procedury wyznaczania współczynnika tarcia o ścianę silosu według normy Eurocode 1 [17].

Fig. 9. Schematic diagram of experimental procedure for determination of the wall friction coefficient according to the Eurocode 1 standard [17].

Kąt tarcia zewnętrznego φ_w - zalecany do stosowania przez normy jako oddzielna, w stosunku do współczynnika tarcia zewnętrznego, miara tarcia materiału sypkiego o powierzchnie konstrukcyjne w zakresie bardzo niskiego naporu normalnego - można wyznaczyć w sposób analogiczny do pomiaru kąta zsypu - poprzez pomiar kąta pochylenia płaskiej powierzchni, przy którym materiał sypki zaczyna się z niej ześlizgiwać (Rys. 8a). Sposób przeprowadzania pomiaru kąta zsypu precyzuje norma PN-74/Z-04002/08 [76]. Wykorzystując aparat uchylny do wyznaczania kąta zsypu, można określić kąt tarcia zewnętrznego w zakresie niewielkich wartości naporu normalnego (rzędu 1 kPa). W celu zwiększenia naporu normalnego powyżej wartości wynikającej z ciężaru własnego warstwy materiału sypkiego, materiał otoczony ramką o pomijalnym ciężarze obciąża się poprzez sztywną pokrywę a następnie zwiększa kąt pochylenia powierzchni względem poziomu rejestrując moment, w którym rozpoczyna się ruch materiału względem powierzchni [66].

3.3. Metody pomiaru parametrów wytrzymałości na ścinanie

Istnieje kilka metod wyznaczania parametrów plastycznego płynięcia materiałów sypkich [57]. Na ogół wywodzą się one z doświadczalnych metod mechaniki gruntów [41,44]. W przypadku luźno upakowanych materiałów sypkich istotnym problemem pomiarowym jest skrócenie drogi ścinania doprowadzającej próbkę do granicznego stanu naprężenia [72,73,87,88].

Aparaty używane do wyznaczania parametrów plastycznego płynięcia na ogół dzieli się na aparaty bezpośredniego i pośredniego ścinania. W aparatach bezpośredniego ścinania strefa ścinania jest wymuszona poślizgiem jednej części aparatu względem drugiej, podczas gdy w aparatach pośredniego ścinania strefa ta powstaje swobodnie, odpowiednio do przyłożonej kombinacji obciążeń. W aparatach bezpośredniego ścinania kierunki naprężeń głównych ulegają obrotowi podczas przejścia od stanu konsolidacji do ścinania.

Aparaty bezpośredniego ścinania podzielić można na aparaty przesuwne i obrotowe. Zaletą aparatów obrotowych jest ich nieograniczona droga ścinania. Wadą jest natomiast nieokreślony, zależny od promienia rozkład naprężeń ścinających. Wielkością mierzoną jest moment *M* obracający ze stałą prędkością kątową pokrywę (aparat skręceniowy) lub pierścień (aparat pierścieniowy). Aby w aparacie pierścieniowym rozkład naprężeń wzdłuż promienia był zbliżony do równomiernego, promienie wewnętrzny i zewnętrzny powinny być duże, zaś szerokość pierścienia, czyli różnica pomiędzy nimi mała. Jednak zbyt wąski pierścień dyskwalifikuje ten aparat do badań materiałów gruboziarnistych.

Z kolei w aparatach pośrednich kierunki naprężeń głównych są ustalone i pozostają stałe podczas pomiaru. Aparaty pośredniego ścinania można podzielić na dwuosiowe i trójosiowe. Aparaty te z uwagi na ich główną zaletę – możliwość realizowania różnych dróg obciążania - należą do najczęściej stosowanych tego typu przyrządów w mechanice gruntów. Jednak ze względu na czasochłonność badań i koszt wyposażenia nie są zbyt często stosowane do pomiaru parametrów płynięcia materiałów sypkich.

W badaniach właściwości mechanicznych materiałów sypkich największe zastosowanie zyskały aparaty: trójosiowego ściskania, bezpośredniego ścinania i aparat pierścieniowy (Rys. 10). Według opinii Schwedesa [89] nie ma uniwersalnej metody ścinania materiałów sypkich, lecz należy dobrać ją stosownie do rozważanego zagadnienia. Wskazuje on przy tym trzy charakterystyczne obszary zastosowań:

 Badania naukowe ukierunkowane na wyznaczenie zależności naprężenieodkształcenie. Najbardziej przydatny w tych badaniach jest ścisły aparat trójosiowy, aparat dwuosiowy oraz aparat czystego ścinania. Wymienione metody są bardzo pracochłonne i wymagają drogiego oprzyrządowania.

- Praktyczne problemy inżynierskie. Najczęstsze zastosowanie znajduje aparat Jenikego oraz aparat pierścieniowy. Natomiast w przypadku aparatów trójosiowego ściskania użyteczny zakres ciśnienia przewyższa zwykle zakres stosowany w technologii materiałów sypkich.
- Porównania jakościowe materiałów sypkich. Największe zastosowanie znajduje aparat skręceniowy ze względu na bardzo krótki czas pomiaru. Obsługa aparatu jest bardzo prosta, trudna jest natomiast ilościowa ocena wyników.

W świetle opinii wielu badaczy można przyjąć, że metodą najbardziej przydatną do określania parametrów plastycznego płynięcia materiałów sypkich jest metoda bezpośredniego ścinania [15,42,89]. Mimo, że ma ona dużo wad, umożliwia określenie parametrów materiałów ziarnistych i proszków z wystarczającą dla praktycznych zastosowań dokładnością [81]. W przypadku materiałów charakteryzujących się dużymi odkształceniami sprężystymi, przekraczającymi zakres drogi ścinania tego aparatu, może się okazać konieczne zastosowanie aparatu pierścieniowego [86].



Rys. 10. Schemat metod pomiaru parametrów plastycznego płynięcia materiałów sypkich:
a) trójosiowego ściskania, b) bezpośredniego ścinania c) ścinania w aparacie pierścieniowym.
Fig. 10. Schematic diagram of methods of determination of yield locus parameters of granular materials:
a) triaxial compression, b)direct shearing, c) shearing in ring shear tester.

Najczęściej zalecaną procedurą wykonywania pomiarów aparatem bezpośredniego ścinania jest procedura opracowana przez Jenikego [37]. W celu skrócenia drogi ścinania konsolidacja próbek obejmuje dwa etapy: wstępną konsolidację pod działaniem obciążenia normalnego σ_r połączoną z wykonaniem trzech obrotów w prawo i lewo o kąt 10° oraz wstępne ścinanie przy tym samym obciążeniu normalnym aż do uzyskania stanu krytycznego, czyli plastycznego płynięcia zachodzącego bez odkształceń objętościowych materiału (Rys. 11 a, b – punkty: A, B, C, C'). Następnie próbka jest odciążana i następuje właściwe ścinanie przy niższym naprężeniu normalnym (punkty: D, E, F). Zgodnie z tą procedurą każdy pomiar pozwala na wyznaczenie tylko dwóch punktów (C i E) leżących na krzywej uplastycznienia (YL). Do określenia kolejnych punktów leżących na tej samej krzywej uplastycznienia, a więc dla tej samej gęstości materiału $\rho(\sigma_r)$, należy dla każdego z nich powtórzyć całą procedurę przy tej samej wartości naprężenia konsolidującego σ_r , lecz innej wartości naprężenia normalnego podczas właściwego ścinania. Powtórzenie całej procedury dla różnych obciążeń konsolidujących daje w rezultacie rodzinę krzywych uplastycznienia. Ponieważ większej gęstości odpowiada większa wytrzymałość - zatem im wyższe obciążenie konsolidujące tym wyżej leży krzywa uplastycznienia.



Rys. 11. Procedura ścinania Jenikego (a, b) oraz procedura wielokrotnego ścinania (c, d) [70]. **Fig. 11.** Jenike's method of shearing (a, b) and the method of repeated shearing (c, d) [70].

Procedura Jenikego jest bardzo czasochłonna. Jeden test pozwala wyznaczyć tylko jeden punkt na krzywej uplastycznienia. Zaproponowana przez Mroza i in. [70] procedura umożliwia wyznaczenie wielu punktów warunku plastyczności podczas jednego pomiaru (Rys. 11 c, d) zachowując wszystkie zalety metodyki

Jenikego. Polega ona na doprowadzeniu próbki najkrótszą możliwą drogą do stanu krytycznego (p. C), w trakcie którego ustala się krytyczna gęstość materiału w obszarze ścinania, a następnie na kilkukrotnym, chwilowym dochodzeniu do wybranych punktów warunku plastyczności (p. E, H, L), przy coraz mniejszym naprężeniu normalnym. Wyznaczanie rodziny warunków plastyczności tą metodą wymaga dużego doświadczenia badacza. Metoda zakłada bowiem niezmienność gęstości materiału w obszarze ścinania podczas kilkukrotnego dochodzenia stanu naprężenia do warunku plastyczności w tej samej próbce, co wymaga zatrzymania procesu ścięcia minimalnie przed osiągnięciem maksimum naprężenia stycznego. Ze względu na ograniczoną drogę ścinania ($\Delta L/D < 0,05$) procedura ta może znaleźć zastosowanie w przypadku badania bardzo drobnych materiałów sypkich, gdy stosunek średnicy komory aparatu do średnicy ziarna ośrodka jest rzędu 10³.

Norma Eurocode 1 [17], a w ślad za nią również norma PN-/B-03254 [77], zaleca, aby parametry wytrzymałości materiału sypkiego: kąt tarcia wewnętrznego φ , efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ oraz kohezję *c*, wyznaczać w aparacie Jenikego według uproszczonej procedury pomiaru obejmującej wstępną konsolidację oraz ścięcie próbki (Rys. 12). Do obliczania parametrów wytrzymałościowych materiału sypkiego powinno być użyte maksymalne naprężenie ścinające τ rozwijające się tuż przed osiągnięciem przemieszczenia poziomego $\Delta L = 0,05D$. Parametry wytrzymałościowe materiału sypkiego należy wyznaczać na podstawie dwóch oddzielnych testów przeprowadzonych zgodnie z powyższą procedurą: jedna próbka konsolidowana i ścinana przy naprężeniu odniesienia σ_r , zaś druga konsolidowana przy naprężeniu odniesienia σ_r , a następnie ścinana przy naprężeniu



Rys. 12. Wyznaczanie parametrów wytrzymałości materiału sypkiego według normy Eurocode 1 [17]. **Fig. 12.** Determination of shear strength parameters according to the Eurocode 1 standard [17].

normalnym $\frac{1}{2}\sigma_r$. Średnica komory ścinania powinna być co najmniej 40 razy większa od maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka a wysokość *H* powinna zawierać się w przedziale 0,3-0,4*D*.

Ta sama norma zaleca jednocześnie test trójosiowego ściskania jako alternatywną metodę wyznaczania parametrów wytrzymałościowych materiału sypkiego, podkreślając, że test ten lepiej niż test bezpośredniego ścinania odzwieciedla warunki oddziaływania zewnętrznego obciążenia na materiał sypki.

3.4. Metody pomiaru kąta nasypu

Pionowy strumień ziaren upadając na płaską, poziomą powierzchnię tworzy pryzmę w kształcie stożka. Kąt nachylenia tworzącej stożka względem poziomu jest uproszczoną miarą tarcia wewnętrznego i określany jest terminem - kąt nasypu θ (PN-74/Z-04002.07 [76]). Kąt nasypu jest zwykle większy od kąta tarcia wewnętrznego. Różnica między nimi wzrasta ze wzrostem sił kohezji, co utrudnia określenie ścisłej relacji pomiędzy tymi kątami [19].

Kąt nasypu jest parametrem tarcia wewnętrznego stosowanym od bardzo dawna. Stąd też powstało wiele metod jego wyznaczania właściwych dla praktycznych zastosowań. Rysunek 13 przedstawia sposoby wyznaczania kąta nasypu wg Teunou i in. [97]. W metodzie opróżniania (Rys. 13a) materiał wysypuje się przez otwór wylotowy w dnie pojemnika. Statyczny kat nasypu θ jest kątem nachylenia tworzącej stożka powstałego pod zbiornikiem, ale też kątem nachylenia tworzącej stożka wklęsłego utworzonego przez materiał pozostały w zbiorniku. Takie dwa pomiary dają jednak różne wyniki, ze względu na oddziaływanie ścian pojemnika oraz wpływ wysokości spadku ziaren tworzących stożek wypukły. Metoda nie może być stosowana do materiałów kohezyjnych, które nie wypływają swobodnie ze zbiornika. Metoda poślizgu (Rys. 13b) polega na stopniowym nachylaniu pojemnika z materiałem aż do osiągnięcia przez dno położenia pionowego. Statyczny kąt nasypu θ jest wówczas odnoszony do poziomu. Wadami tej metody są: wpływ prędkości pochylania i możliwe drgania. Metodę osiadania (Rys. 14c) stosuje się, jeżeli materiał poddany jest naporowi. Zbiornik jest ostrożnie napełniany materiałem, a następnie górna powierzchnia warstwy jest obciąża naporem pionowym. Po osiągnięciu założonej wartości naporu jedna ściana zbiornika jest odsuwana i część materiału zsuwa się. Pozostała swobodna powierzchnia materiału tworzy z poziomem statyczny kąt nasypu θ . Trudno jest zastosować metodę osiadania do proszków kohezyjnych, które zbrylają się pod działaniem naporu. W metodzie napowietrzania (Rys. 13d) próbka materiału

umieszczana jest na perforowanej płytce, przez którą przepuszczany jest strumień powietrza powodujący zsypywanie się materiału. W ten sposób mierzy się dyna-



(g) Metoda zanurzania

Fig. 13. Method of determination of the angle of repose [97].

Rys. 13. Metody wyznaczania kąta nasypu [97].

(h) Metoda nasypywania



miczny kąt nasypu θ_d , którego wartość jest niższa niż mierzona metodami dopuszczającymi działanie naporu pionowego. Metoda obrotowa (Rys. 13e) polega na obracaniu wokół osi poziomej cylindra do połowy napełnionego materiałem sypkim. Dynamiczny kąt nasypu θ_d to kąt, jaki tworzy powierzchnia swobodna obracającego się materiału z poziomem. Metoda ta daje najwyższe wartości θ_d . Wynik pomiaru zależy od prędkości obrotowej oraz ciśnienia i lepkości gazu. W metodzie wibracyjnej (Rys. 13f) materiał podawany jest do zasobnika, którego drgania powodują płynięcie. Taki pomiar daje najniższe wartości θ_d ($\theta_d < \theta$) zależne od intensywności drgań zasobnika. Metoda zanurzania polega na umieszczeniu wewnątrz materiału kołowej płytki opartej na dnie zasobnika (Rys. 13g). W wyniku powolnego opróżniania zasobnika na płytce powstaje stożek pozostałego materiału. Statyczny kąt nasypu θ jest wyznaczany na podstawie wysokości i średnicy stożka. Pomiar tą metodą wymaga znacznej ilości materiału i jest zalecany dla materiałów o wiekszych czastkach oraz ziarna zbóż. W trakcie pomiaru moga wystąpić drgania cierne powodujące zwiększoną zmienność wyników. W metodzie nasypywania na kołowa płytke (Rys. 13h) materiał wypływa przez lejek z ustalonej wysokości hi tworzy na płytce pryzmę stożkową. Statyczny kąt nasypu θ jest mierzony kątomierzem. W odróżnieniu od pozostałych ta metoda może być zastosowana do wszelkich materiałów ziarnistych. Niezbędne jest zastosowanie stałej wartości wysokości h i średnicy płytki oraz stałej lokalizacji osi strumienia materiału. Przedstawione metody pomiarowe nie dają identycznych wyników. Przy wyborze metody w konkretnym przypadku należy kierować się zasadą, że warunki pomiaru powinny możliwie najbliżej odzwierciedlać warunki procesu, którego projektowaniu ma służyć wyznaczany parametr.

3.5. Metody pomiaru ilorazu naporu

Iloraz naporu wyznaczać można ze wzorów teoretycznych, zależności empirycznych oraz metodami eksperymentalnymi. Iloraz naporu wyznaczony ze wzorów wynikających z przyjęcia odpowiednich założeń o uplastycznieniu materiału (uplastycznienie w czynnym stanie naprężenia dla fazy napełniania i magazynowania oraz w stanie biernym dla fazy opróżniania) jest funkcją kąta tarcia wewnętrznego ośrodka, kąta tarcia o ścianę zbiornika oraz geometrii rozważanej warstwy materiału. Zakres wartości wyznaczonego w ten sposób ilorazu naporu jest jednak dużo szerszy niż spotykany w praktyce [15]. Uproszczone zależności empiryczne pozwalają wyznaczyć przybliżoną wartość ilorazu naporu jako funkcję kąta tarcia wewnętrznego [64]. Norma Eurocode 1 [17] zaleca wyliczać ilorazu naporu z następującej zależności:

$$k_{\varphi} = 1, 1(1 - \sin\varphi), \tag{5}$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrznego. Dla typowego zakresu wartości kąta tarcia wewnętrznego iloraz naporu wyliczony z tej zależności odpowiada wartościom wyznaczonym drogą rozważań teoretycznych dla przypadku uplastycznienia materiału przy szorstkiej ścianie w czynnym stanie naprężenia.

Istnieje kilka metod eksperymentalnego wyznaczania ilorazu naporu. Zależnie od przyjętej metody pomiaru wyznaczać można lokalną bądź globalną wartość ilorazu naporu. Iloraz naporu wyznaczać można pośrednio mierząc napór na ściany i dno zbiornika. Pomiar bezpośredni lokalnej wartości ilorazu naporu wymaga zanurzenia w materiale sypkim odpowiednich czujników naporu w celu wyznaczenia lokalnej wartości naprężenia poziomego i pionowego wewnątrz złoża materiału sypkiego [3,50,53,83].

Zaproponowana przez Kwade i in. [45] metoda wyznaczania ilorazu naporu w teście jednoosiowego ściskania w cylindrycznej komorze polega na pomiarze naporu pionowego na dno i pokrywę obciążającą złoże materiału sypkiego oraz naporu poziomego na ścianę komory na pewnej wysokości. Wartość naporu pionowego na wysokości punktu pomiarowego naporu poziomego, niezbędna do wyznaczenia lokalnej wartości ilorazu naporu, wyliczana jest drogą interpolacji z równania Janssena na podstawie wyznaczonego doświadczalnie naporu pionowego na dno i pokrywę dociskową.

Horabik i Molenda [30] wyznaczali iloraz naporu pośrednio, mierząc rozkład naporu pionowego na dno σ_z i pokrywę złoża materiału σ_{zo} oraz średni napór styczny σ_t i normalny na ścianę σ_x w cylindrycznym zbiorniku o średnicy i wysokości równej 0,6 m. Równoczesny pomiar naporu stycznego σ_t i normalnego σ_x na ścianę zbiornika pozwalał wyznaczyć rzeczywistą wartość współczynnika tarcia materiału sypkiego o ścianę odpowiadającą faktycznemu stanowi mobilizacji sił tarcia. Średnią wartość ilorazu naporu wyznaczano rozwiązując numerycznie równanie Janssena dla eksperymentalnych wartości naporu pionowego, gęstości oraz współczynnika tarcia o ścianę.

Norma Eurocode 1 [17] zaleca, aby iloraz naporu dla fazy napełniania i składowania wyznaczać w warunkach jednoosiowego ściskania cylindrycznej próbki materiału sypkiego mierząc napór pionowy przyłożony do płyty dociskowej oraz poziomy wywierany na sztywną ścianę cylindrycznej komory pomiarowej (Rys. 14). Podobnie jak w przypadku aparatu Jenikego, średnica komory *D* powinna być co najmniej 40 razy większa od maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka, a wysokość *H* powinna zawierać się w przedziale 0,3-0,4*D*. Iloraz naporu należy wyznaczać na podstawie współczynnika kierunkowego k_{so} stycznej do zależności $\sigma_x(\sigma_z)$ w procesie obciążania próbki:

$$k_s = 1, 1k_{so} \tag{6}$$

gdzie $k_{so} = \Delta \sigma_x / \Delta \sigma_z$.

Pomiar należy przeprowadzać przy naporze normalnym σ_z równym naporowi odniesienia σ_r lub, dla celów ogólnych 100 kPa, po wykonaniu standardowych obrotów płytą dociskową w celu dodatkowej konsolidacji materiału sypkiego.



Rys. 14. Metoda wyznaczania ilorazu naporu według normy Eurocode 1 [17].Fig. 14. Method for determination of the pressure ratio according to the Eurocode 1 standard [17].

3.6. Metody pomiaru parametrów sprężystości

Moduł sprężystości E_m oraz stałą Poissona v można stosunkowo łatwo wyznaczać w teście jednoosiowego ściskania cylindrycznej próbki materiału sypkiego na podstawie początkowego, liniowego odcinka krzywoliniowej zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_z(\varepsilon_z)$ podczas procesu odciążania materiału (Rys. 15).

W początkowej fazie procesu odciążania materiału występuje jedynie liniowa deformacja sprężysta w kierunku osi z [68,84]:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_m} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu} \right) \tag{7}$$

Relację pomiędzy naprężeniem poziomym σ_x i pionowym σ_z określa zależność:

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{v}{1 - v}.$$
(8)

Znając eksperymentalny przebieg zależności $\sigma_x(\sigma_z)$, stałą Poissona *v* wyznaczyć można na podstawie liniowej aproksymacji początkowego, liniowego odcinka krzywej $\sigma_x(\sigma_z)$ dla procesu odciążania próbki materiału (odcinek BC na Rys. 15) korzystając z zależności (8). W celu wyznaczenia modułu sprężystości E_m eksperymentalny przebieg zależności $\sigma_z(\varepsilon_z)$ w początkowym, liniowym odcinku procesu odciążania (odcinek BC na Rys. 15) aproksymuje się zależnością liniową korzystając ze związku (7) i wyznaczonej wartości stałej Poissona *v*. W praktyce parametry sprężystości oraz iloraz naporu wyznaczyć można podczas tego samego testu jednoosiowego ściskania.



Rys. 15. Metoda wyznaczania stałych sprężystości materiałów sypkich.Fig. 15. Method for determination of elasticity parameters of granular materials.

4. OPIS ZASTOSOWANYCH PROCEDUR POMIAROWYCH

4.1. Podstawowe parametry geometryczne

Podstawowe parametry geometryczne ziarna zbóż i nasion roślin uprawnych (długość, szerokość, grubość) wyznaczano miernikiem optycznym.

Badania składu granulometrycznego proszków spożywczych przeprowadzono w Katedrze Technologii i Aparatury Przemysłu Chemicznego i Spożywczego Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. W przypadku proszków gruboziarnistych oraz płatków rozkład wielkości cząstek wyznaczono przy użyciu standardowego zestawu sit o wymiarach oczek w zakresie od 0,1 mm do 8 mm, zaś w przypadku proszków drobnoziarnistych laserowym miernikiem wielkości cząstek firmy Fritsch typu Analysette 22.

Zastępczą średnicę cząstek na sicie obliczano jako średnią geometryczną wymiarów oczek dwóch sąsiednich sit:

$$d_i = \sqrt{a_i \cdot a_{i+1}} \,. \tag{9}$$

Sumaryczną pozostałość na sicie R (tzw. odsiew) określano sumując udziały masowe materiału na poszczególnych sitach zaczynając od sita o największym wymiarze oczka.

Rozkład wielkości cząstek opisywano równaniem RRSB (Rosina-Rammlera-Sperlinga-Benneta [13]):

$$R = \exp\left[-\left(\frac{d}{d^*}\right)^n\right],\tag{10}$$

gdzie: R - sumaryczna pozostałość na sicie w ułamku masowym,

- d zastępcza średnica cząstek [mm],
- *d*^{*}- średnia statystyczna wymiarów liniowych wszystkich cząstek zawartych w mieszaninie sypkiej [mm],
- *n* współczynnik równomierności uziarnienia.

Logarytmując dwukrotnie równanie (10) uzyskuje się równanie liniowe:

$$\ln\left(\ln R\right) = n\ln d - n\ln d^*,\tag{11}$$

którego parametry d* i n wyznaczyć można metodą regresji liniowej.
4.2. Pomiar porowatości

Porowatość materiału sypkiego wyznaczano piknometrem powietrznym o objętości komory pomiarowej 100 cm³ [104] i dokładności pomiaru $\pm 0,5\%$. Próbki pobierano losowo z dużej objętości materiału zgodnie z przyjętymi zaleceniami [74]. Wilgotność materiału wyznaczano metodą suszarkową [78]. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

4.3. Pomiar gęstości

Gęstość w stanie zsypnym wyznaczano zgodnie z normą PN-73/R-74007 [75]. W przeprowadzonych badaniach stosowano pojemnik o objętości 0,25 dm³. Każdy pomiar wykonano w trzech powtórzeniach.

Do wyznaczania gęstości w stanie utrzęsionym zastosowano metodę zaproponowaną przez Dobrzańskiego i innych [14]. Wyznaczano maksymalną masę materiału sypkiego wypełniającą cylindryczny pojemnik (3) o objętości 0,25 dm³ (Rys. 16). Materiał zagęszczano pod wpływem drgań mechanicznych o częstości 50 Hz i amplitudzie w zakresie od 0,15 do 0,45 mm wzbudzanych przez elektromagnes (1) i przekazywanych za pośrednictwem podstawy (2). Materiał sypki pobierany był z kosza zasypowego (4). Każdy pomiar wykonano w trzech powtórzeniach.





Rys. 16. Urządzenie do określania gęstości utrzęsionej.Fig. 16. A device for determination of the tapped density.

Do wyznaczania gęstości w stanie skonsolidowanym zastosowano metodykę pomiaru zalecaną przez normę Eurocode 1. Średnica komory pomiarowej wynosiła

210 mm. Wewnętrzna powierzchnia ściany bocznej komory pomiarowej była gładka, natomiast dna i płyty górnej szorstka. Wysokość zagęszczonej próbki *H* zawierała się w przedziale 60-80 mm (Rys. 17). Po napełnieniu pojemnika bez wibracji i przykładania jakichkolwiek sił zagęszczających górna powierzchnia próbki była obciążana siłą normalną wytwarzającą napór odniesienia σ_r równy 100 kPa. Wybrana wartość naprężenia odniesienia odpowiada pionowemu naporowi, jaki wytwarza w silosie słup ziarna o wysokości ok. 15 m. Następnie górną płytę aparatu trzykrotnie obracano o kąt 10° w prawo i lewo w celu dodatkowego zagęszczenia materiału. Prędkość przemieszczenia pokrywy komory pomiarowej wynosiła 0,35 mm·min⁻¹. Przemieszczenie mierzono indukcyjnym czujnikiem przemieszczenia o zakresie 50 mm z dokładnością ±0,05 mm. Siłę powodującą zagęszczenie próbki mierzono czujnikiem siły o zakresie 20 kN z dokładnością ±20 N. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.



Rys. 17. Urządzenie do określania ciężaru objętościowego γ [17]. **Fig. 17.** A device for determination of the bulk weight density γ [17].

4.4. Pomiar współczynnika tarcia zewnętrznego

Współczynnik tarcia zewnętrznego wyznaczano zgodnie z metodykę pomiaru zalecaną przez normę Eurocode 1. Średnica komory pomiarowej wynosiła 210 mm, a wysokość warstwy materiału sypkiego 40 mm (Rys. 18). Wewnętrzna powierzchnia ściany bocznej komory pomiarowej była gładka, natomiast płyty górnej szorstka. W celu minimalizacji drgań ciernych pomiary wykonywano przy prędkości przemieszczenia równej 10 mm min⁻¹. Pomiary wykonywano przy pięciu wartościach naporu normalnego σ_n : 20, 30, 40, 50 oraz 60 kPa. Wybrany zakres naporu odpowiada naporowi poziomemu na ścianę silosu, jaki powstaje przy wysokości słupa materiału w zakresie do 15 m i wartości ilorazu naporu

równej 0,5. Określano współczynnik tarcia o blachę nierdzewną oraz blachę stalową ocynkowaną, a w przypadku nasion roślin uprawnych również o beton klasy B30. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.



Rys. 18. Aparat do wyznaczania współczynnika tarcia o ścianę.

Fig. 18. Experimental set for determination of the wall friction coefficient.

4.5. Pomiar kąta tarcia zewnętrznego

Kąt tarcia zewnętrznego wyznaczano wykorzystując aparat uchylny do wyznaczania kąta zsypu (Rys. 19). W celu zwiększenia naporu normalnego powyżej wartości wynikającej z ciężaru własnego warstwy materiału sypkiego, materiał otoczony kwadratową ramką o boku 20 cm obciążano poprzez sztywną pokrywę a następnie zwiększano kąt pochylenia powierzchni względem poziomu rejestrując moment, w którym rozpoczyna się ruch materiału względem powierzchni. Kąt tarcia wyznaczano przy następujących wartościach naporu normalnego: 0,5, 1, 1,5, 2 oraz 2,5 kPa. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.



Rys. 19. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania kąta tarcia o ścianę silosu.

Fig. 19. Scheme of the experimental set for determination of the angle of wall friction.

4.6. Wyznaczanie parametrów wytrzymałości na ścinanie

Pomiary kąta tarcia wewnętrznego φ , efektywnego kąta tarcia wewnętrznego δ i kohezji *c* przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania Jenikego (Rys. 20) zgodnie z uproszczoną pomiaru zalecaną przez normę Eurocode 1. Procedura ta obejmowała:

- wstępną konsolidację materiału sypkiego wsypanego swobodnie do formy (bez wibracji lub innych sił zagęszczających) naprężeniem odniesienia σ_r oraz wykonanie trzech obrotów płytą górną w prawo i lewo o kąt 10° w celu dodatkowej konsolidacji,
- ścięcie próbki obciążonej zalecanym naprężeniem odniesienia σ_r ,
- ścięcie próbki identycznie wstępnie skonsolidowanej a następnie obciążonej połową zastosowanego naprężenia odniesienia σ_r.



Rys. 20. Procedura wyznaczania parametrów wytrzymałości na ścinanie według Eurocode 1 [17]. **Fig. 20.** Procedure of determination of the shear strength parameters according to the Eurocode 1 standard [17].

Pomiary wykonywano w trzech aparatach ścinania o różnej średnicy komory pomiarowej *D*: 60, 120 i 210 mm (Rys. 21-23). Średnicę aparatu dobierano do wielkości ziarna ośrodka tak, aby stosunek tych wielkości był nie mniejszy niż 40. Wewnętrzna powierzchnia ściany bocznej komory pomiarowej była gładka, natomiast dna i płyty górnej szorstka. W przypadku aparatu o średnicy 210 mm prędkość przemieszczenia wynosiła 10 mm/min, a w przypadku pozostałych aparatów 2 mm/min. Naprężenie odniesienia σ_r równe 100 kPa odpowiadało pionowemu naporowi, jaki powstaje w silosie przy wysokości słupa ziarna ok. 15 m. W celu wytworzenia naporu normalnego próbki materiału obciążano grawitacyjnie, a w przypadku aparatu o średnicy komory pomiarowej 210 mm za pomocą siłownika pneumatycznego [31]. W przypadku aparatu o średnicy 210 mm siłę styczną mierzono czujnikiem o zakresie 2 kN z dokładnością ±4N, zaś w przypadku dwóch pozostałych aparatów zakres czujnika wynosił 500 N a dokładność ±1 N. W przypadku ziarna zbóż i nasion roślin uprawnych procedurę pomiaru rozszerzono: dla jednej wartości naprężenia odniesienia σ_r (100 kPa) pomiary wykonywano dla pięciu wartości naprężenia normalnego: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 σ_r oraz σ_r . W przypadku proszków spożywczych pomiary wykonywano dla czterech wartości naprężenia odniesienia σ_r w zakresie od 30 do 100 kPa w celu określenia wpływu naprężenia konsolidacji na wytrzymałość materiału. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.







Rys. 22. Aparat bezpośredniego ścinania Jenikego o średnicy komory pomiarowej 120 mm. **Fig. 22.** Jenike shear tester of 120 mm in the diameter.



Rys. 23. Aparat bezpośredniego ścinania Jenikego o średnicy komory pomiarowej 210 mm. **Fig. 23.** Jenike shear tester of 210 mm in the diameter.

Wartość odkształcenia, przy którym osiągany jest graniczny stan naprężenia zależy od ilorazu wielkości próbki do wielkości ziarna ośrodka, a w przypadku materiałów pochodzenia biologicznego również od wilgotności. Norma Eurocode 1 zaleca, aby iloraz ten był nie mniejszy niż 40 a odkształcenie nie większe niż 5% średnicy próbki. Przy dużej wilgotności sypkich materiałów roślinnych, mimo spełnienia pierwszego warunku, nie zawsze jest możliwe osiągnięcie granicznego stanu naprężeń w zalecanym zakresie przemieszczenia (Rys. 24). W związku z tym chcąc uniknąć nadmiernie dużych rozmiarów komory pomiarowej oraz poszukujac możliwości dostosowania procedury wyznaczania kata tarcia wewnetrznego roślinnych materiałów sypkich do szerszego zakresu wilgotności i wymiaru ziarna, zaproponowano poszerzenie przedziału stosunku $\Delta L/D$, w którym określane jest maksimum naprężenia stycznego z 5 do 10% średnicy próbki. Z analizy własnych wyników badań i wyników badań innych autorów wynika, że w większości przypadków stabilizacja naprężenia stycznego następuje przy wartości $\Delta L/D$ mniejszej niż 10% średnicy próbki. Przyjęcie granicznej wartości 10% pozwala na przeprowadzanie pomiarów kąta tarcia wewnętrznego większości materiałów sypkich pochodzenia roślinnego według



Rys. 24. Przebiegi $\tau(\Delta L/D)$ podczas testu ścinania próbek ziarna pszenicy o wilgotności: a) 11,7%, b) 20% uzyskane przy naprężeniu normalnym σ_n : 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa.

Fig. 24. Relationships $\tau(\Delta L/D)$ during shearing of wheat grain samples of the moisture content of: a) 11.7%, b) 20% determined under the normal pressure σ_n of: 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa. jednolitej procedury w poszerzonym zakresie wilgotności materiału i wymiarów nasion. Zaproponowana modyfikacja procedury pozwala dostosować sformułowaną ogólnie procedurę pomiarową do specyfiki materiałów pochodzenia biologicznego – dużej i zależnej od wilgotności materiału odkształcalności ziaren ośrodka powiększającej znacznie drogę ścinania [56].

Rysunek 25 przedstawia porównanie wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy o wilgotności w zakresie 10-20% otrzymanych dwoma metodami: bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania. Zgodność wyników uzyskano dopiero po odpowiednich modyfikacjach procedur pomiaru: w metodzie bezpośredniego ścinania – po poszerzeniu zakresu przemieszczenia z 5 do 10% średnicy próbki, w metodzie trójosiowego ściskania - po uzyskaniu wstępnej gęstości próbki zbliżonej do gęstości krytycznej [56].



Rys. 25. Porównanie wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy (±95% przedziały ufności) wyznaczonych metodą bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania [56].
Fig. 25. Comparison of values of the angle of internal friction of wheat grain (±95% confidence intervals) determined in the direct shear test and the triaxial compression test [56].

W przypadku materiałów proszkowych, dla których stosunek średnicy komory pomiarowej do wielkości ziarna ośrodka jest rzędu 10³ procedurę Jenikego można zastąpić bardziej efektywną procedurą wielokrotnego ścinania zaproponowaną przez Mroza i innych [70] (Rys. 26).

W przypadku takich materiałów, jak mleko w proszku i mąka ziemniaczana podczas testu ścinania obserwowano regularne oscylacje naprężenia stycznego pojawiające się w chwili, gdy naprężenie zbliżało się do granicy wytrzymałości materiału (Rys. 27). Przyczyną oscylacji są sekwencje dylatacji i zagęszczania materiału w obszarze warstwy ścinania. Zagęszczenie materiału powoduje wzrost wytrzymałości - wzrasta zdolność materiału do przenoszenia naprężenia stycznego. Gdy wytrzymałość ta zostaje wyczerpana zachodzi dylatacja materiału powodująca nagły spadek wytrzymałości. W przypadku występowania oscylacji parametry wytrzymałości wyznaczano dla górnej obwiedni oscylacji.





Fig. 26. Yield locus of wheat flour determined in the Jenike shear tester according to repeated shearing procedure and the Jenike procedure [31].



Rys. 27. Oscylacje naprężenia stycznego podczas testu bezpośredniego ścinania mleka w proszku. **Fig. 27.** Oscillations of the tangent stress during the direct shear test of fine milk sample.

4.7. Wyznaczanie funkcji płynięcia

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c określano na podstawie znajomości kąta tarcia wewnętrznego φ i kohezji c wyznaczając punkt przecięcia koła Mohra, stycznego do warunku plastyczności i przechodzącego przez początek układu współrzędnych, z osią σ_n (Rys. 4). Następnie wyznaczano przebieg funkcji płynięcia *FF* (zależności wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c od większego naprężenia głównego podczas konsolidacji σ_l) oraz określano indeks płynięcia *i* (iloraz wytrzymałości σ_c i naprężenia σ_l).

4.8. Wyznaczanie ilorazu naporu

Iloraz naporu dla fazy napełniania i składowania wyznaczano, zgodnie z opisaną w rozdziale 3.4. procedurą pomiarową zalecaną przez normę Eurocode 1, w warunkach jednoosiowego ściskania cylindrycznej próbki materiału sypkiego mierząc napór pionowy przyłożony do płyty dociskowej oraz poziomy wywierany na sztywną ścianę cylindrycznej komory pomiarowej.

Ściana boczna cylindrycznej komory jednoosiowego ściskania (2) o wysokości 0,17 m i średnicy 0,21 m składała się z dwóch identycznych części złączonych ze sobą wzdłuż tworzącej walca przy pomocy czterech czujników siły (5) o zakresie pomiarowym 5 kN (Rys. 28) [33]. Jedna z połówek ściany bocznej posiadała możliwość ruchu w kierunku poziomym w zakresie odkształceń czujników siły wynikających z naporu materiału sypkiego. Dno (1) i płyta górna (3) komory pomiarowej przenosiły napór pionowy poprzez czujniki siły (4) o zakresie pomiarowym 20 kN. Próbkę materiału obciążano za pośrednictwem maszyny wytrzymałościowej Instron. Zgodnie z zaleceniem normy wewnętrzna powierz-chnia ściany bocznej była gładka, natomiast dna i płyty górnej szorstka.



Rys. 28. Aparat jednoosiowego ściskania: 1 – płyta dolna, 2 – ściana komory, 3 – płyta górna, 4 – czujniki siły (napór pionowy), 5 – czujniki siły (napór poziomy) [33].

Fig. 28. Uniaxial compression chamber: 1 – bottom plate, 2 – wall, 3 – top plate, 4 – load cells (vertical pressure), 5 – load cells (lateral pressure) [33]. Urządzenie umożliwia wyznaczenie średniego naporu poziomego na ścianę komory pomiarowej σ_x , średniego naporu normalnego na dno σ_z oraz średniego naporu normalnego σ_{zo} wywieranego na górną powierzchnię ośrodka przez płytę dociskową. Komorę pomiarową napełniano materiałem sypkim bez zawibrowania i przykładania innych sił zagęszczających. Warstwa materiału miała wysokość 80 mm (H/D = 0,38). Materiał zagęszczano ze stałą prędkością przemieszczenia sztywnej pokrywy aparatu v = 0,35 mm· min⁻¹ do momentu uzyskania pionowego naporu σ_{zo} = 100 kPa odpowiadającego pionowemu naporowi, jaki powstaje w silosie przy wysokości słupa ziarna ok. 15 m. Przy tej wartości obciążenia obracano trzykrotnie pokrywą komory, w prawo i lewo o kąt 10°, po czym materiał ponownie dociążano do wartości naporu σ_{zo} = 100 kPa. Iloraz naporu wyznaczano ze wzoru (6) na podstawie współczynnika kierunkowego k_{so} stycznej do zależności $\sigma_x(\sigma_z)$ w procesie dociążania próbki. Dokładność pomiaru wynosiła ±0,02. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

Podczas pomiarów szczególnie istotne jest zachowanie powtarzalności metody napełniania komory pomiarowej. Zalecane przez normę standardowe obroty pokrywy aparatu nie niwelują bowiem zróżnicowania wartości ilorazu wynikającego z różnej struktury upakowania materiału, jaka powstaje przy różnych metodach napełniania.

Jako drugą, pośrednią metodę wyznaczania ilorazu naporu zastosowano zalecaną przez normę Eurocode 1 zależność (5) wykorzystującą empiryczny związek pomiędzy ilorazem naporu i kątem tarcia wewnętrznego.

4.9. Wyznaczanie parametrów sprężystości

Moduł sprężystości E_m oraz stałą Poissona v wyznaczano ze wzorów (7) i (8) na podstawie początkowego, liniowego odcinka zależności $\sigma_z(\varepsilon_z)$ oraz $\sigma_x(\sigma_z)$ podczas procesu odciążania próbki materiału sypkiego poddanego testowi jednoosiowego ściskania zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 3.6. (Rys. 15). Pomiary wykonywano w aparacie jednoosiowego ściskania o średnicy 210 mm stosowanym do wyznaczania ilorazu naporu [65]. Prędkość przemieszczenia wynosiła 0,35 mm min⁻¹. Materiał zagęszczano do momentu uzyskania naprężenia pionowego σ_z równego 100 kPa, po czym rozpoczynano proces odciążania. W przyjętej procedurze pominięto stosowane w badaniach ilorazu naporu standardowe obroty płytą górną aparatu w celu dodatkowego zagęszczenia i ujednorodnienia struktury materiału. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

5. KATALOG WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH SYPKICH SUROWCÓW SPOŻYWCZYCH

5.1. Podstawowa charakterystyka

Tabela 6. Średnie wartości wymiarów ziarna, masy 1000 ziaren i ciężaru właściwego**Table 6.** Mean values of grain dimensions, the mass of 1000 grains and the specific gravity

Materiał	Wilgotność [%]	Długość a [mm]	Szerokość b [mm]	Grubość c [mm]	Masa 1000 nasion [g]	Ciężar właściwy [kN·m ⁻³]
Pszenica Begra	10	6,7	3,2	2,9	40,5	13,8
Żyto Amilo	10	7,3	2,3	2,2	20,5	12,3
Jęczmień Rudnik	10	8,4	3,6	2,8	45,2	13,2
Kukurydza Mieszko	10	9,4	8,2	5,1	295	13,7
Owies Borowiak	10	11,5	3,1	2,6	35,6	13,7
Pszenżyto Fidelio	10	7,2	2,9	2,6	29,4	13,5

 Tabela 7. Średnie wartości wymiarów nasion, masy 1000 nasion i ciężaru właściwego

 Table 7. Mean values of seeds dimensions, the mass of 1000 seeds and the specific gravity

	and the second se					
Materiał	Wilgotność [%]	Długość <i>a</i> [mm]	Szerokość <i>b</i> [mm]	Grubość c [mm]	Masa 1000 nasion [g]	Ciężar właściwy [kN∙m ⁻³]
Rzepak Licosmos	6	1,8	1,7	1,7	3,5	11,1
Amarantus Rawa	8	0,85	0,85	0,85	0,76	14,8
Gorczyca biała Borowska	9	2,5	2,3	2,3	8,6	12,3
Groch Piast	10	7,9	7,2	6,7	300	14,3
Gryka Kora	10	6,1	3,6	3,5	29,3	14,5
Soczewica Tina	8	5,6	2,3	2,3	49,8	14,8
Soja Aldana	8	8,2	6,6	5,6	185	13,0



Rys. 29. Rozkłady wielkości cząstek proszków spożywczych. Fig. 29. Size distributions of food powders.

rabela 6. Parametry rownania KKSB opisującego rozkład wielkości cząstek proszków spozywczych
Table 8. Parameters of the RRSB equation describing size distribution of food powders

Materiał	Wilgotność [%]	Średnia statystyczna wymiarów liniowych wszystkich cząstek d [*] [mm]	Współczynnik równomierności i uziarnienia n	Współczynnik korelacji Pearsona [%]
Mąka krupczatka	13,4	0,147	1,673	98,8
Semolina	12,7	0,176	1,332	98,0
Kasza manna	13,6	0,683	0,480	94,0
Kasza jęczmienna	13,2	2,849	3,807	98,0
Płatki owsiane	11,0	4,499	1,577	99,7
Cukier puder	0,4	0,061	1,171	99,9
Cukier kryształ	0,4	1,070	3,348	98,7
Skrobia ziemniaczana	18,2	0,033	2,737	99,8
Mleko w proszku	4,4	1,252	1,276	98,1
Sól warzona	0,2	0,553	4,132	96,9
Śruta kukurydziana	11,7	1,050	1,391	99,1
Śruta sojowa	8,5	1,827	1,688	99,3

5.2. Gęstość i porowatość

Tabela 9. Średnie wartości (±odch. st.) gęstości w stanie skonsolidowanym ρ_1 , usypnej ρ_2 i utrzęsionej ρ_3 oraz porowatości *p* ziarna zbóż o wilgotności w zakresie 10-20%

Table.	9.	Mean	values	(±St.	Dev.)	of	compacted	density	ρ_1 ,	uncompacted	density ρ_2 ,	tapped
density	ρ_3	and po	prosity p	of ce	real gra	ins	at the moist	ture conte	ent o	f 10-20%		

Materiał	Wilgotność [%]	Gęstość w stanie skonsolid. ρ _I [kg·m ⁻³]	Gęstość usypna ρ₂ [kg·m ⁻³]	Gęstość utrzęsiona $ ho_3$ [kg·m ⁻³]	Porowatość p [%]
	10	779 ± 2	773 ± 3	871 ± 4	49,8
Degenies	12,5	799 ± 9	765 ± 3	861 ± 7	48,8
Pszenica	15	784 ± 2	694 ± 4	860 ± 10	50,9
Degra	17,5	778 ± 5	705 ± 4	868 ± 9	52,8
	20	790 ± 5	713 ± 5	823 ± 11	54,3
	10	754 ± 9	698 ± 5	793 ± 6	51,4
Ż	12,5	772 ± 8	688 ± 5	805 ± 7	49,8
Zyto	15	786 ± 1	677 ± 4	787 ± 8	50,7
Amilo	17,5	785 ± 4	682 ± 5	801 ± 3	48,6
	20	803 ± 1	684 ± 4	808 ± 10	49,2
	10	787 ± 3	686 ± 3	780 ± 3	50,9
Inorminé	12,5	785 ± 2	689 ± 2	806 ± 2	49,6
Dudnik	15	781 ± 2	680 ± 5	801 ± 3	50,1
Rudnik	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	675 ± 4	794 ± 3	50,5	
	20	780 ± 7	667 ± 3	783 ± 9	52,8
	10	826 ± 10	742 ± 3	873 ± 6	45,0
17.1	12,5	847 ± 3	728 ± 3	878 ± 4	45,0
Kukuryaza	15	844 ± 9	698 ± 3	829 ± 2	45,6
Mieszko	17,5	825 ± 15	672 ± 2	845 ± 4	47,5
	20	834 ± 10	663 ± 2	800 ± 1	48,6
	10	646 ± 9	557 ± 2	632 ± 12	60,8
Omine	12,5	647 ± 3	574 ± 2	650 ± 8	59,5
Derewist	15	656 ± 8	547 ± 2	624 ± 12	61,0
Borowiak	17,5	704 ± 10	528 ± 2	632 ± 4	62,4
	20	698 ± 7	527 ± 3	639 ± 10	62,5

10	711 ± 2	615 ± 5	684 ± 3	55,5
12,5	744 ± 11	618 ± 7	698 ± 12	53,0
15	739 ± 11	605 ± 6	689 ± 5	54,2
17,5	774 ± 10	591 ± 4	691 ± 7	55,6
20	781 ± 3	571 ± 4	665 ± 12	57,0
	10 12,5 15 17,5 20	10 711 ± 2 12,5 744 ± 11 15 739 ± 11 17,5 774 ± 10 20 781 ± 3	10 711 ± 2 615 ± 5 12,5 744 ± 11 618 ± 7 15 739 ± 11 605 ± 6 17,5 774 ± 10 591 ± 4 20 781 ± 3 571 ± 4	10 711 ± 2 615 ± 5 684 ± 3 12,5 744 ± 11 618 ± 7 698 ± 12 15 739 ± 11 605 ± 6 689 ± 5 17,5 774 ± 10 591 ± 4 691 ± 7 20 781 ± 3 571 ± 4 665 ± 12

Tabela 10. Średnie wartości (±odch. st.) gęstości w stanie skonsolidowanym ρ_1 , usypnej ρ_2 i utrzęsionej ρ_3 oraz porowatości *p* nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-16% **Table 10.** Mean values (±St. Dev.) of compacted density ρ_1 , uncompacted density ρ_2 , tapped density ρ_3 and porosity *p* of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-16%

Materiał	Wilgotność [%]	Gęstość w stanie skonsolid. $\rho_1 [\text{kg·m}^{-3}]$	Gęstość usypna ρ₂ [kg·m⁻³]	Gęstość utrzęsiona $ ho_3$ [kg·m ⁻³]	Porowatość p [%]
	6	712 ± 5	645 ± 5	756 ± 4	41,8
Rzepak	9	740 ± 4	661 ± 2	761 ± 6	41,5
Licosmos	12	788 ± 5	655 ± 3	760 ± 6	40,2
	16	800 ± 5	644 ± 2	760 ± 5	41,9

Tabela 11. Średnie wartości (±odch. st.) gęstości w stanie skonsolidowanym ρ_1 , usypnej ρ_2 i utrzęsionej ρ_3 oraz porowatości *p* nasion wybranych rośli uprawnych

Table 11. Mean values (\pm St. Dev.) of compacted density ρ_1 , uncompacted density ρ_2 , tapped density ρ_3 and porosity *p* of selected seeds

Materiał	Wilgotność [%]	Gęstość skonsolid. ρ₁ [kg·m ⁻³]	Gęstość usypna ρ₂ [kg·m ⁻³]	Gęstość utrzęsiona $ ho_3$ [kg·m ⁻³]	Porowatość p [%]
Amarantus, Rawa	8	883 ± 3	823 ± 3	934 ± 4	45,1
Gorczyca biała, Borowska	9	799 ± 2	707 ± 2	824 ± 2	42,3
Groch, Piast	10	869 ± 5	810 ± 3	929 ± 7	43,2
Gryka, Kora	10	686 ± 2	654 ± 2	773 ± 2	55,2
Soczewica, Tina	8	840 ± 3	783 ± 2	931 ± 9	47,1
Soja, Aldana	8	795 ± 5	739 ± 3	869 ± 4	45,2

Tabela 12. Średnie wartości (±odch. st.) gęstości w stanie skonsolidowanym ρ_1 , usypnej ρ_2 i utrzęsionej ρ_3 oraz porowatości p wybranych surowców spożywczych

Materiał	Wilgotność [%]	Gęstość skonsolid. $ ho_1$ [kg m ⁻³]	Gęstość usypna $ ho_2 [{ m kg m}^{-3}]$	Gęstość utrzęsiona $ ho_3$ [kg m ⁻³]	Porowatość p [%]
Mąka tortowa	12,7	717 ± 4	612 ± 2	767 ± 7	67,6
Mąka krupczatka	13,4	758 ± 3	647 ± 1	790 ± 7	61,7
Semolina	12,7	705 ± 7	652 ± 2	785 ± 7	57,7
Kasza manna	13,6	767 ±3	738 ± 2	866 ± 10	51,0
Kasza jęczmienna	13,2	802 ± 3	702 ± 2	874 ± 9	52,7
Płatki owsiane	11,0	490 ± 14	444 ± 1	557 ± 4	71,5
Cukier puder	0,4	757 ± 4	726 ± 2	957 ± 9	64,5
Cukier kryształ	0,4	895 ± 7	858 ± 2	1070 ± 7	49,2
Skrobia ziemniaczana	18,2	725 ± 7	685 ± 1	762 ± 7	66,0
Mleko w proszku	4,4	604 ± 1	577 ± 2	701 ± 4	67,9
Mleko granulowane	7,9	419 ± 1	378 ± 2	413 ± 7	83,4
Sól warzona	0,2	1326 ± 1	1087 ± 3	1531 ± 11	41,7
Śruta kukurydziana	11,7	769 ± 1	614 ± 2	755 ± 7	60,4
Śruta sojowa	8,5	816 ± 1	656 ± 4	848 ± 6	63,1

Table 12. Mean values (\pm St. Dev.) of compacted density ρ_1 , uncompacted density ρ_2 , tapped density ρ_3 and porosity *p* of selected food powders

5.3. Współczynnik tarcia zewnętrznego

Tabela 13. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa.

Table 13. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of wheat grain variety Begra at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

	Napór	Współczy	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ					
Wilgotność [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30				
	20	$0,189 \pm 0,003$	$0,174 \pm 0,010$	$0,541 \pm 0,014$				
	30	$0,160 \pm 0,002$	$0,183 \pm 0,004$	$0,497 \pm 0,020$				
10	40	$0,152 \pm 0,004$	$0,\!170\pm0,\!003$	$0,496 \pm 0,007$				
	50	$0,159 \pm 0,006$	$0,\!169\pm0,\!002$	$0,476 \pm 0,010$				
	60	$0,160 \pm 0,004$	$0,165 \pm 0,003$	$0,468 \pm 0,005$				
	20	$0,186 \pm 0,001$	$0,178 \pm 0,004$	$0,502 \pm 0,009$				
	30	$0,163 \pm 0,006$	$0,186 \pm 0,003$	$0,524 \pm 0,007$				
12,5	40	$0,156 \pm 0,004$	$0,173 \pm 0,003$	$0,\!510\pm0,\!018$				
	50	$0,170 \pm 0,005$	$0,173 \pm 0,005$	$0,480 \pm 0,009$				
	60	$0,163 \pm 0,002$	$0,171 \pm 0,001$	$0,\!489\pm0,\!006$				
	20	$0,191 \pm 0,007$	$0,209 \pm 0,001$	$0,540 \pm 0,030$				
	30	$0,189 \pm 0,008$	$0,201 \pm 0,001$	$0,605 \pm 0,018$				
15	40	$0,174 \pm 0,012$	$0,184 \pm 0,002$	$0,546 \pm 0,023$				
	50	$0,212 \pm 0,002$	$0,139 \pm 0,001$	0,529 ±0,009				
	60	$0,182 \pm 0,003$	$0,165 \pm 0,004$	$0,519\pm0,007$				
	20	$0,249 \pm 0,011$	$0,204 \pm 0,005$	$0,571 \pm 0,035$				
	30	$0,217 \pm 0,004$	$0,180 \pm 0,001$	$0,\!574\pm0,\!014$				
17,5	40	$0,220 \pm 0,009$	$0,169 \pm 0,003$	$0,593 \pm 0,003$				
	50	$0,252 \pm 0,009$	$0,161 \pm 0,002$	$0,605 \pm 0,008$				
	60	$0,287 \pm 0,020$	$0,143 \pm 0,004$	$0,602 \pm 0,004$				
	20	$0,340 \pm 0,028$	$0,245 \pm 0,014$	$0,562 \pm 0,009$				
	30	$0,321 \pm 0,023$	$0,274 \pm 0,028$	$0,\!587\pm0,\!021$				
20	40	$0,277 \pm 0,022$	$0,224 \pm 0,020$	$0,598 \pm 0,009$				
	50	$0,\!277\pm0,\!012$	$0,201 \pm 0,018$	$0,580 \pm 0,006$				
	60	$0,279 \pm 0,016$	$0,191 \pm 0,008$	$0{,}595\pm0{,}010$				

Tabela 14. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna żyta odmiany Amilo o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 14. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of rye grain variety Amilo at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ					
Wilgotnosc [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30			
	20	$0,205 \pm 0,004$	$0,155 \pm 0,005$	$0,349 \pm 0,002$			
	30	$0,195 \pm 0,009$	$0,169 \pm 0,001$	$0,354 \pm 0,007$			
10	40	$0,219 \pm 0,013$	$0,175 \pm 0,014$	$0,349 \pm 0,006$			
	50	$0,214 \pm 0,013$	$0,143 \pm 0,001$	$0,337 \pm 0,007$			
	60	$0,218 \pm 0,011$	$0,150 \pm 0,003$	$0,337 \pm 0,004$			
	20	$0,219 \pm 0,026$	$0,178 \pm 0,002$	$0,448 \pm 0,012$			
	30	$0,256 \pm 0,010$	$0,172 \pm 0,013$	$0,420 \pm 0,016$			
12,5	40	$0,273 \pm 0,004$	$0,188\pm0,009$	$0,391 \pm 0,005$			
	50	$0,284 \pm 0,001$	$0,195 \pm 0,006$	$0,358\pm0,019$			
	60	$0,285 \pm 0,001$	$0,209 \pm 0,003$	$0,369 \pm 0,002$			
-	20	$0,196 \pm 0,002$	$0,171 \pm 0,008$	$0,427 \pm 0,017$			
	30	$0,217 \pm 0,010$	$0,164 \pm 0,004$	$0,399 \pm 0,006$			
15	40	$0,242 \pm 0,012$	$0,175 \pm 0,001$	$0,382 \pm 0,008$			
	50	$0,230 \pm 0,012$	$0,142 \pm 0,006$	0,406 ±0,007			
	60	$0,246 \pm 0,001$	$0,148 \pm 0,001$	$0,400 \pm 0,007$			
	20	$0,219 \pm 0,006$	$0,197 \pm 0,013$	$0,602 \pm 0,008$			
	30	$0,247 \pm 0,009$	$0,171 \pm 0,014$	$0,\!574\pm0,\!009$			
17,5	40	$0,261 \pm 0,004$	$0,170 \pm 0,003$	$0,\!559\pm0,\!004$			
	50	$0,258 \pm 0,012$	$0,159\pm0,005$	$0,539 \pm 0,015$			
	60	$0,225 \pm 0,021$	$0,156 \pm 0,001$	$0,502 \pm 0,003$			
	20	$0,277 \pm 0,023$	$0,235 \pm 0,007$	$0,453 \pm 0,016$			
	30	$0,286 \pm 0,001$	$0,234 \pm 0,002$	$0,451 \pm 0,009$			
20	40	$0,293 \pm 0,014$	$0,213 \pm 0,002$	$0,442 \pm 0,008$			
	50	$0,290 \pm 0,008$	$0,211 \pm 0,001$	$0,487 \pm 0,013$			
	60	$0,255 \pm 0,015$	$0,211 \pm 0,001$	$0,514 \pm 0,009$			

Tabela 15. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna jęczmienia odmiany Rudnik o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 15. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of barley grain variety Rudnik at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ			
Wilgotnosc [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,176 \pm 0,006$	$0,217 \pm 0,014$	0,487 ± 0,013	
	30	$0,163 \pm 0,008$	$0,193 \pm 0,009$	$0,468 \pm 0,007$	
10	40	$0,157 \pm 0,002$	$0,173 \pm 0,010$	$0,451 \pm 0,012$	
	50	$0,160 \pm 0,006$	$0,171 \pm 0,003$	$0,444 \pm 0,004$	
	60	$0,150 \pm 0,005$	$0,171 \pm 0,007$	$0,\!426 \pm 0,\!004$	
	20	$0,152 \pm 0,002$	$0,153 \pm 0,005$	$0,478 \pm 0,018$	
	30	$0,148 \pm 0,001$	$0,145 \pm 0,006$	$0,483 \pm 0,011$	
12,5	40	$0,\!149\pm0,\!001$	$0,146 \pm 0,001$	$0,\!483 \pm 0,\!011$	
	50	$0,157 \pm 0,004$	$0,139 \pm 0,003$	$0,496 \pm 0,004$	
	60	$0,163 \pm 0,001$	$0,144 \pm 0,001$	$0,\!480 \pm 0,\!010$	
	20	$0,143 \pm 0,005$	$0,166 \pm 0,020$	0,537 ± 0,022	
	30	$0,139 \pm 0,009$	$0,152 \pm 0,009$	$0,547 \pm 0,012$	
15	40	$0,133 \pm 0,003$	$0,160 \pm 0,009$	$0{,}518\pm0{,}011$	
	50	0,131 ±0,003	$0,147 \pm 0,009$	0,522 ±0,002	
	60	$0,131 \pm 0,001$	$0,142 \pm 0,003$	$0,\!490 \pm 0,\!014$	
	20	$0,166 \pm 0,015$	0,169 ± 0,001	$0,507 \pm 0,021$	
	30	$0,141 \pm 0,006$	$0,156 \pm 0,004$	$0,540 \pm 0,012$	
17,5	40	$0,146 \pm 0,016$	$0,144 \pm 0,005$	$0,554 \pm 0,012$	
	50	$0,145 \pm 0,005$	$0,145 \pm 0,005$	$0,520 \pm 0,009$	
	60	$0,162 \pm 0,006$	$0,155 \pm 0,010$	$0,543 \pm 0,007$	
	20	$0,245 \pm 0,006$	$0,200 \pm 0,014$	0,549 ± 0,014	
	30	$0,230 \pm 0,017$	$0,\!185\pm0,\!013$	$0,566 \pm 0,012$	
20	40	$0,220 \pm 0,013$	$0,184 \pm 0,009$	$0,594 \pm 0,007$	
	50	$0,\!215\pm0,\!008$	$0,176 \pm 0,008$	$0,561 \pm 0,014$	
	60	$0,225 \pm 0,009$	$0,176 \pm 0,012$	$0,582 \pm 0,005$	

Tabela 16. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna kukurydzy odmiany Mieszko o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 16. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of corn grain variety Mieszko at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ			
Wilgotność [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,161 \pm 0,006$	$0,157 \pm 0,008$	$0,352 \pm 0,007$	
	30	$0,157\pm0,008$	$0,140 \pm 0,008$	$0,\!349\pm0,\!004$	
10	40	$0,170 \pm 0,008$	$0,145 \pm 0,007$	$0,352 \pm 0,007$	
	50	$0,155 \pm 0,003$	$0,146 \pm 0,007$	$0,352 \pm 0,003$	
	60	$0,172 \pm 0,007$	$0,136 \pm 0,003$	$0,346 \pm 0,003$	
	20	$0,144 \pm 0,001$	$0,128 \pm 0,011$	$0,528 \pm 0,013$	
	30	$0,136 \pm 0,001$	$0,125 \pm 0,003$	$0,519 \pm 0,011$	
12,5	40	$0,134 \pm 0,001$	$0,124 \pm 0,002$	$0,511 \pm 0,005$	
	50	$0,138 \pm 0,001$	$0,137 \pm 0,009$	$0,\!549\pm0,\!007$	
	60	$0,143 \pm 0,004$	$0,136 \pm 0,007$	$0,\!580\pm0,\!010$	
	20	$0,214 \pm 0,011$	$0,136 \pm 0,007$	$0,629 \pm 0,007$	
	30	$0,171 \pm 0,009$	$0,131 \pm 0,003$	$0,615 \pm 0,015$	
15	40	$0,163 \pm 0,008$	$0,\!128\pm0,\!004$	$0,607 \pm 0,013$	
	50	$0,151 \pm 0,001$	$0,127 \pm 0,001$	0,593 ±0,005	
	60	$0,147 \pm 0,004$	$0,117 \pm 0,005$	$0,584 \pm 0,010$	
	20	$0,221 \pm 0,003$	$0,141 \pm 0,002$	0,626 ± 0,019	
	30	$0,178 \pm 0,005$	$0,132 \pm 0,002$	$0,611 \pm 0,006$	
17,5	40	$0,167 \pm 0,002$	$0,131 \pm 0,001$	$0,601 \pm 0,011$	
	50	$0,153 \pm 0,002$	$0,\!129\pm0,\!002$	$0,610 \pm 0,006$	
	60	$0,150 \pm 0,004$	$0,122 \pm 0,003$	$0,597\pm0,008$	
	20	$0,242 \pm 0,012$	$0,149 \pm 0,011$	$0,670 \pm 0,017$	
	30	$0,243 \pm 0,003$	$0,\!157\pm0,\!008$	$0,644 \pm 0,020$	
20	40	$0,239 \pm 0,001$	$0,164 \pm 0,006$	$0,658 \pm 0,018$	
	50	$0,225 \pm 0,001$	$0,172 \pm 0,004$	$0,625 \pm 0,002$	
	60	$0,208 \pm 0,016$	$0,173 \pm 0,008$	$0,594 \pm 0,049$	

Tabela 17. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna owsa odmiany Borowiak o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 17. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of oat grain variety Borowiak at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

11711	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ			
Wilgotnosc [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,158 \pm 0,004$	$0,195 \pm 0,014$	$0,345 \pm 0,005$	
	30	$0,\!150\pm0,\!001$	$0,200 \pm 0,008$	$0,328\pm0,001$	
10	40	$0,147 \pm 0,004$	$0,\!180\pm0,\!004$	$0,324 \pm 0,002$	
	50	$0,148 \pm 0,003$	$0,\!180\pm0,\!002$	$0,327\pm0,001$	
	60	$0,149 \pm 0,004$	$0,176 \pm 0,003$	$0,343 \pm 0,009$	
	20	$0,160 \pm 0,007$	$0,\!199\pm0,\!018$	$0,304 \pm 0,006$	
	30	$0,152 \pm 0,002$	$0,\!203\pm0,\!012$	$0,294 \pm 0,004$	
12,5	40	$0,151 \pm 0,007$	$0,182 \pm 0,007$	$0,310 \pm 0,011$	
	50	$0,150 \pm 0,002$	$0,\!182\pm0,\!003$	$0,342 \pm 0,008$	
	60	$0,153 \pm 0,006$	$0,179 \pm 0,006$	$0,360 \pm 0,009$	
	20	$0,181 \pm 0,009$	$0,167 \pm 0,008$	0,363 ± 0,019	
	30	$0,180 \pm 0,003$	$0,161 \pm 0,009$	$0,\!389\pm0,\!012$	
15	40	$0,168 \pm 0,005$	$0,163 \pm 0,005$	$0,415 \pm 0,002$	
	50	$0,161 \pm 0,004$	$0,162 \pm 0,009$	$0,409 \pm 0,023$	
	60	$0,159 \pm 0,003$	$0,158 \pm 0,004$	$0,\!427\pm0,\!016$	
	20	$0,181 \pm 0,007$	$0,160 \pm 0,008$	$0,483 \pm 0,016$	
	30	$0,179 \pm 0,012$	$0,172 \pm 0,005$	$0,514 \pm 0,008$	
17,5	40	$0,187\pm0,004$	$0,161 \pm 0,002$	$0,526 \pm 0,010$	
	50	$0,170 \pm 0,006$	$0,157 \pm 0,001$	$0{,}512\pm0{,}012$	
	60	$0,161 \pm 0,011$	$0,161 \pm 0,002$	0,476 ± 0,001	
	20	$0,151 \pm 0,021$	$0,160 \pm 0,004$	0,479 ± 0,016	
	30	$0,137 \pm 0,007$	$0,157 \pm 0,016$	$0,508 \pm 0,002$	
20	40	$0,155 \pm 0,009$	$0,146 \pm 0,004$	$0,518 \pm 0,008$	
	50	$0,141 \pm 0,008$	$0,147 \pm 0,005$	$0,498 \pm 0,007$	
	60	$0,151 \pm 0,002$	$0,136 \pm 0,006$	$0,511 \pm 0,007$	

Tabela 18. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna pszenżyta odmiany Fidelio o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 18. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of triticale grain variety Fidelio at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

11 M	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ			
Wilgotnosc [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,181 \pm 0,018$	$0,249 \pm 0,009$	0,473 ± 0,031	
	30	$0,180 \pm 0,002$	$0,237 \pm 0,017$	$0,448 \pm 0,007$	
10	40	$0,189 \pm 0,005$	$0,236 \pm 0,004$	$0,439 \pm 0,006$	
	50	$0,173 \pm 0,007$	$0,215 \pm 0,005$	$0,\!439\pm0,\!010$	
	60	$0,176 \pm 0,013$	$0,198\pm0,001$	$0,\!427\pm0,\!008$	
	20	$0,223 \pm 0,019$	$0,167 \pm 0,014$	$0,344 \pm 0,005$	
	30	$0,244 \pm 0,016$	$0,\!189\pm0,\!005$	$0,401 \pm 0,020$	
12,5	40	$0,245 \pm 0,026$	$0,\!190\pm0,\!009$	$0,416 \pm 0,014$	
	50	$0,247 \pm 0,030$	$0,\!184\pm0,\!007$	$0,413 \pm 0,016$	
	60	$0,281 \pm 0,013$	$0,200 \pm 0,007$	$0,407 \pm 0,010$	
	20	$0,296 \pm 0,015$	$0,214 \pm 0,018$	$0,522 \pm 0,014$	
	30	$0,322 \pm 0,005$	$0,214 \pm 0,003$	$0,547 \pm 0,022$	
15	40	$0,300 \pm 0,021$	$0,240 \pm 0,023$	$0,559 \pm 0,009$	
	50	$0,306 \pm 0,010$	$0,225 \pm 0,002$	0,561 ±0,008	
	60	$0,281 \pm 0,004$	$0,265 \pm 0,026$	$0,521 \pm 0,018$	
	20	$0,297 \pm 0,015$	$0,240 \pm 0,002$	$0,587 \pm 0,021$	
	30	$0,318 \pm 0,005$	$0,240 \pm 0,001$	$0,592 \pm 0,016$	
17,5	40	$0,305 \pm 0,008$	$0,270 \pm 0,003$	$0,572 \pm 0,011$	
	50	$0,304 \pm 0,005$	$0,290 \pm 0,003$	$0,584 \pm 0,008$	
	60	$0,297 \pm 0,007$	$0,250 \pm 0,001$	$0,579 \pm 0,004$	
	20	$0,358 \pm 0,023$	$0,281 \pm 0,006$	$0,623 \pm 0,010$	
	30	$0,366 \pm 0,017$	$0,306 \pm 0,022$	$0,605 \pm 0,015$	
20	40	$0,333 \pm 0,013$	$0,308 \pm 0,021$	$0,592 \pm 0,015$	
	50	$0,350 \pm 0,004$	$0,350 \pm 0,006$	$0,605 \pm 0,023$	
	60	$0,237 \pm 0,013$	$0,323 \pm 0,015$	$0,619 \pm 0,030$	

Tabela 19. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-15% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 19. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-15% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 20-60 kPa

XX7'1 / // F0/7	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ			
Wilgotnosc [%]	normalny [kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,173 \pm 0,009$	$0,191 \pm 0,011$	$0,353 \pm 0,004$	
	30	$0,157 \pm 0,006$	$0,185 \pm 0,004$	$0,355 \pm 0,008$	
6	40	$0,148 \pm 0,005$	$0,171 \pm 0,009$	$0,351 \pm 0,004$	
	50	$0,148 \pm 0,004$	$0,161 \pm 0,003$	$0,359\pm0,004$	
	60	$0,142 \pm 0,005$	$0,163 \pm 0,006$	$0,352 \pm 0,005$	
	20	$0,165 \pm 0,007$	$0,\!173\pm0,\!014$	$0,357 \pm 0,008$	
	30	$0,151 \pm 0,004$	$0,164 \pm 0,001$	$0,\!346\pm0,\!012$	
9	40	$0,153 \pm 0,005$	$0,150 \pm 0,009$	$0,342 \pm 0,016$	
	50	$0,163 \pm 0,004$	$0,148 \pm 0,004$	$0,\!349\pm0,\!023$	
	60	$0,157 \pm 0,006$	$0,152 \pm 0,006$	$0,363 \pm 0,005$	
	20	$0,106 \pm 0,002$	$0,133 \pm 0,026$	$0,366 \pm 0,002$	
	30	$0,106 \pm 0,001$	$0,121 \pm 0,003$	$0,383 \pm 0,008$	
12	40	$0,106 \pm 0,004$	$0,102 \pm 0,002$	$0,404 \pm 0,010$	
	50	$0,114 \pm 0,002$	$0,096 \pm 0,002$	0,405 ±0,009	
	60	$0,123 \pm 0,009$	$0,087 \pm 0,003$	$0,416 \pm 0,003$	
	20	$0,219 \pm 0,022$	$0,120 \pm 0,006$	$0,400 \pm 0,002$	
	30	$0,174 \pm 0,003$	$0,113 \pm 0,001$	$0,425 \pm 0,006$	
15	40	$0,170 \pm 0,005$	$0,111 \pm 0,001$	$0,448 \pm 0,005$	
	50	$0,174 \pm 0,002$	$0,113 \pm 0,005$	$0,459 \pm 0,006$	
	60	$0,173 \pm 0,003$	$0,125 \pm 0,013$	$0,463 \pm 0,009$	

Tabela 20. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion wybranych roślin uprawnych o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa

Table 20.	. Mean	values	(±St.	Dev.)	of the	friction	coefficient	μof	selected	seeds	against	stainless
steel, galv	anized	steel an	d con	crete I	330 det	ermined	at the norma	al pre	ssure of 2	20-60	kPa	

Materiał	Napór	Napór Współczynnik tarcia zewnętrznego µ			
Wilgotność [%]	lkPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	20	$0,119 \pm 0,004$	$0,136 \pm 0,007$	$0,378 \pm 0,001$	
Amarantus	30	$0,115 \pm 0,001$	$0,125 \pm 0,007$	$0,370 \pm 0,006$	
Rawa	40	$0,111 \pm 0,001$	$0,128 \pm 0,010$	$0,378 \pm 0,009$	
8	50	$0,107 \pm 0,001$	$0,120 \pm 0,005$	$0,371 \pm 0,008$	
U C	60	$0,108 \pm 0,003$	$0,109 \pm 0,002$	$0,372 \pm 0,003$	
	20	$0,134 \pm 0,003$	$0,108 \pm 0,004$	$0,352 \pm 0,008$	
Gorczyca biała	30	$0,128 \pm 0,009$	$0,100 \pm 0,002$	$0,353 \pm 0,007$	
Borowska	40	$0,132 \pm 0,008$	$0,098 \pm 0,006$	$0,354 \pm 0,012$	
9	50	$0,125 \pm 0,008$	$0,097 \pm 0,002$	$0,340 \pm 0,007$	
-	60	$0,123 \pm 0,009$	$0,097 \pm 0,003$	$0,315 \pm 0,012$	
	20	$0,146 \pm 0,013$	$0,138 \pm 0,023$	$0,292 \pm 0,006$	
Groch	30	$0,135 \pm 0,007$	$0,121 \pm 0,003$	$0,318 \pm 0,001$	
Piast	40	$0,147 \pm 0,016$	$0,120 \pm 0,006$	$0,323 \pm 0,005$	
10	50	$0,153 \pm 0,015$	$0,123 \pm 0,013$	0,331 ±0,006	
10	60	$0,136 \pm 0,009$	$0,123 \pm 0,006$	$0,337 \pm 0,002$	
	20	$0,156 \pm 0,009$	$0,177 \pm 0,002$	0,379 ± 0,011	
Gryka	30	$0,154 \pm 0,002$	$0,150 \pm 0,004$	$0,385 \pm 0,011$	
Kora	40	$0,158 \pm 0,003$	$0,150 \pm 0,003$	$0,372 \pm 0,006$	
10	50	$0,157 \pm 0,001$	$0,149 \pm 0,004$	0,369 ±0,006	
10	60	$0,161 \pm 0,005$	$0,149 \pm 0,002$	$0,371 \pm 0,008$	
	20	$0,160 \pm 0,015$	$0,160 \pm 0,007$	$0,258 \pm 0,014$	
Soczewica	30	$0,160 \pm 0,013$	$0,142 \pm 0,012$	$0,267 \pm 0,012$	
Tina	40	$0,141 \pm 0,012$	$0,142 \pm 0,010$	$0,263 \pm 0,005$	
8	50	$0,140 \pm 0,005$	$0,131 \pm 0,003$	$0,259 \pm 0,002$	
°	60	$0,135 \pm 0,005$	$0,136 \pm 0,007$	$0,263 \pm 0,006$	
	20	$0,147 \pm 0,003$	$0,165 \pm 0,024$	$0,405 \pm 0,012$	
Soja	30	$0,169 \pm 0,010$	$0,202 \pm 0,008$	$0,413 \pm 0,014$	
Aldana	40	$0,175 \pm 0,002$	$0,178 \pm 0,011$	$0,412 \pm 0,012$	
8	50	$0,170 \pm 0,023$	$0,162 \pm 0,010$	$0,424 \pm 0,010$	
	60	$0,169 \pm 0,017$	$0,\!198\pm0,\!019$	$0,434 \pm 0,011$	

Materiał	Napór normalny	Współczynnik tarci	rcia zewnętrznego µ Blacha stalowa ocynkowana	
Wilgotność [%]	[kPa]	Blacha nierdzewna		
	20	$0,172 \pm 0,019$	$0,238 \pm 0,009$	
Maka tortowa	30	$0,159 \pm 0,020$	$0,267 \pm 0,013$	
-	40	$0,143 \pm 0,002$	$0,260 \pm 0,012$	
12,7	50	$0,146 \pm 0,001$	$0,247 \pm 0,015$	
	60	$0,152 \pm 0,002$	$0,244 \pm 0,007$	
	20	$0,167 \pm 0,001$	$0,203 \pm 0,027$	
Maka krupczatka	30	$0,161 \pm 0,002$	$0,204 \pm 0,002$	
	40	$0,162 \pm 0,004$	$0,215 \pm 0,007$	
13,4	50	$0,160 \pm 0,004$	$0,231 \pm 0,008$	
	60	$0,159 \pm 0,002$	$0,231 \pm 0,006$	
	20	$0,102 \pm 0,003$	$0,088 \pm 0,001$	
Semolina	30	$0,099 \pm 0,001$	$0,082 \pm 0,003$	
	40	$0,107 \pm 0,008$	$0,085 \pm 0,002$	
12,7	50	$0,123 \pm 0,005$	$0,087 \pm 0,003$	
	60	$0,100 \pm 0,005$	$0,098 \pm 0,007$	
	20	$0,180 \pm 0,007$	$0,219 \pm 0,040$	
Kasza manna	30	$0,188 \pm 0,008$	$0,169 \pm 0,011$	
	40	$0,170 \pm 0,013$	$0,150 \pm 0,010$	
13,6	50	$0,182 \pm 0,005$	$0,155 \pm 0,013$	
	60	$0,172 \pm 0,006$	$0,154 \pm 0,003$	
	20	$0,324 \pm 0,020$	$0,276 \pm 0,032$	
Kasza jęczmienna	30	$0,284 \pm 0,011$	$0,220 \pm 0,019$	
	40	$0,240 \pm 0,011$	$0,180 \pm 0,010$	
13,2	50	$0,211 \pm 0,008$	$0,164 \pm 0,001$	
	60	$0,\!192\pm0,\!004$	$0,139\pm0,003$	
	20	$0,119 \pm 0,006$	$0,132 \pm 0,012$	
Płatki owsiane	30	$0,123 \pm 0,007$	$0,131 \pm 0,004$	
	40	$0,124 \pm 0,005$	$0,121 \pm 0,001$	
11,0	50	$0,111 \pm 0,009$	$0,117 \pm 0,008$	
	60	$0,112 \pm 0,002$	$0,121 \pm 0,001$	

Tabela 21. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ wybranych surowców spożywczych o blachę nierdzewną oraz ocynkowaną wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa **Table 21.** Mean values (±St. Dev.) of the friction coefficient μ of selected food powders against stainless steel and galvanized steel determined at the normal pressure of 20-60 kPa

cd. Tabeli 21.

	20	$0,174 \pm 0,032$	$0,201 \pm 0,013$
Cukier puder	30	$0,233 \pm 0,018$	$0,260 \pm 0,008$
	40	$0,257 \pm 0,010$	$0,284 \pm 0,013$
0,4	50	$0,269 \pm 0,005$	$0,294 \pm 0,014$
	60	$0,298 \pm 0,011$	$0,\!292\pm0,\!008$
	20	$0,180 \pm 0,013$	$0,157 \pm 0,014$
Cukier kryształ	30	$0,236 \pm 0,025$	$0,188 \pm 0,018$
	40	$0,277 \pm 0,012$	$0,213 \pm 0,005$
0,4	50	$0,274 \pm 0,022$	$0,224 \pm 0,033$
	60	$0,314 \pm 0,016$	$0,270 \pm 0,035$
	20	$0,205 \pm 0,016$	$0,324 \pm 0,029$
Skrobia ziemniaczana	30	$0,252 \pm 0,009$	$0,365 \pm 0,009$
	40	$0,277 \pm 0,004$	$0,399 \pm 0,012$
18,2	50	$0,287 \pm 0,007$	$0,385 \pm 0,004$
	60	$0,304 \pm 0,016$	$0,374 \pm 0,017$
	20	$0,174 \pm 0,008$	$0,173 \pm 0,009$
Mleko w proszku	30	$0,188 \pm 0,003$	$0,181 \pm 0,002$
	40	$0,197 \pm 0,006$	$0,180 \pm 0,002$
4,4	50	$0,185 \pm 0,003$	$0,183 \pm 0,002$
	60	$0,189 \pm 0,003$	$0,187 \pm 0,007$
	20	$0,147 \pm 0,003$	$0,151 \pm 0,001$
Mleko granulowane	30	$0,156 \pm 0,002$	$0,151 \pm 0,001$
	40	$0,163 \pm 0,003$	$0,161 \pm 0,005$
7,9	50	$0,168 \pm 0,002$	$0,168 \pm 0,002$
	60	$0,175 \pm 0,004$	$0,175 \pm 0,004$
	20	$0,257 \pm 0,009$	$0,341 \pm 0,013$
Sól warzona	30	$0,246 \pm 0,007$	$0,345 \pm 0,012$
	40	$0,234 \pm 0,005$	$0,345 \pm 0,008$
0,2	50	$0,226 \pm 0,001$	$0,318 \pm 0,011$
	60	$0,228 \pm 0,009$	$0,335 \pm 0,016$
	20	$0,176 \pm 0,003$	$0,116 \pm 0,009$
Śruta kukurydziana	30	$0,159 \pm 0,002$	$0,110 \pm 0,002$
	40	$0,135 \pm 0,007$	$0,116 \pm 0,004$
11,7	50	$0,134 \pm 0,009$	$0,118 \pm 0,002$
	60	$0,140 \pm 0,013$	$0,122 \pm 0,001$
Marker (Annalysis - Annalysis - Affiliation	20	$0,152 \pm 0,007$	$0,108 \pm 0,005$
Śruta sojowa	30	0.141 ± 0.003	0.107 ± 0.005
orana sojowa	40	0.139 ± 0.007	0.091 ± 0.002
8.5	50	$0,129 \pm 0,007$	0.093 ± 0.001
-,-	60	$0,120 \pm 0,010$	$0,095 \pm 0,001$
	60	$0,117 \pm 0,006$	$0,092 \pm 0,002$

5.4. Kąt tarcia zewnętrznego

Tabele w poniższym rozdziale zawierają wartości współczynnika tarcia materiału sypkiego μ o blachę nierdzewną, blachę stalową ocynkowaną oraz beton klasy B30 wyliczone na podstawie kąta tarcia zewnętrznego $\mu = tg\phi_w$ wyznaczonego w zakresie naporu normalnego 0,5 - 2,5 kPa.

Tabela 22. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 22. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of wheat grain variety Begra at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne			
wilgothose [%]	[kPa]	Blacha	Blacha stalowa	D (D20	
	~ *	nierdzewna	ocynkowana	Beton B30	
	0,5	$0,282 \pm 0,005$	$0,32 \pm 0,005$	$0,422 \pm 0,010$	
	1,0	$0,275 \pm 0,007$	$0,30 \pm 0,008$	$0,388 \pm 0,012$	
10	1,5	$0,249 \pm 0,002$	$0,27 \pm 0,004$	$0,425 \pm 0,015$	
	2,1	$0,260 \pm 0,004$	$0,26 \pm 0,003$	$0,399 \pm 0,013$	
	2,5	$0,257 \pm 0,003$	$0,23 \pm 0,011$	$0,409 \pm 0,022$	
	0,5	$0,265 \pm 0,010$	$0,34 \pm 0,007$	0,379 ± 0,006	
	1,0	$0,248 \pm 0,009$	$0,31 \pm 0,011$	$0,438 \pm 0,012$	
12,5	1,5	$0,269 \pm 0,008$	$0,28 \pm 0,008$	$0,408 \pm 0,015$	
	2,1	$0,259 \pm 0,010$	$0,27 \pm 0,004$	$0,458 \pm 0,016$	
	2,5	$0,262 \pm 0,009$	$0,26 \pm 0,006$	$0,434 \pm 0,010$	
	0,5	$0,335 \pm 0,003$	$0,34 \pm 0,013$	0,476 ± 0,011	
	1,0	$0,310 \pm 0,003$	$0,33 \pm 0,003$	$0,458 \pm 0,006$	
15	1,5	$0,280 \pm 0,003$	$0,31 \pm 0,013$	$0,441 \pm 0,026$	
	2,1	0,287 ±0,004	$0,29 \pm 0,003$	$0,476 \pm 0,011$	
	2,5	$0,292 \pm 0,008$	$0,26 \pm 0,021$	$0,462 \pm 0,013$	
	0,5	$0,383 \pm 0,003$	$0,42 \pm 0,016$	$0,479 \pm 0,012$	
	1,0	$0,344 \pm 0,004$	$0,41 \pm 0,019$	$0,494 \pm 0,013$	
17,5	1,5	$0,323 \pm 0,005$	$0,42 \pm 0,022$	$0,472 \pm 0,006$	
	2,1	$0,326 \pm 0,001$	$0,37 \pm 0,016$	$0,527 \pm 0,006$	
	2,5	$0,313 \pm 0,007$	$0,35 \pm 0,017$	$0,494 \pm 0,013$	
	0,5	$0,414 \pm 0,003$	$0,44 \pm 0,007$	$0,536 \pm 0,050$	
	1,0	$0,375 \pm 0,009$	$0,42 \pm 0,003$	$0,546 \pm 0,007$	
20	1,5	$0,346 \pm 0,004$	$0,41 \pm 0,007$	$0,483 \pm 0,006$	
	2,1	$0,341 \pm 0,009$	$0,40 \pm 0,009$	$0,527 \pm 0,006$	
	2,5	$0,335 \pm 0,012$	$0,34 \pm 0,026$	$0,508 \pm 0,011$	

Tabela 23. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna żyta odmiany Amilo o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa.

Table 23. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of rye grain variety Amilo at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

Wilcotrość [9/]	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne			
w figothose [%]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	0,5	$0,230 \pm 0,004$	$0,196 \pm 0,005$	$0,369 \pm 0,020$	
	1,0	$0,227 \pm 0,010$	$0,196 \pm 0,005$	$0,366 \pm 0,019$	
10	1,5	$0,235 \pm 0,005$	$0,196 \pm 0,005$	$0,363 \pm 0,014$	
	2,1	$0,213 \pm 0,005$	$0,194 \pm 0,005$	$0,329 \pm 0,018$	
	2,5	$0,224 \pm 0,001$	$0,\!199\pm0,\!008$	$0,338 \pm 0,009$	
	0,5	$0,244 \pm 0,005$	$0,255 \pm 0,005$	$0,360 \pm 0,014$	
	1,0	$0,255 \pm 0,005$	$0,241 \pm 0,001$	$0,332 \pm 0,019$	
12,5	1,5	$0,264 \pm 0,005$	$0,241 \pm 0,001$	$0,341 \pm 0,019$	
	2,1	$0,270 \pm 0,005$	$0,235 \pm 0,005$	$0,360 \pm 0,039$	
	2,5	$0,284 \pm 0,001$	$0,221 \pm 0,005$	$0,388 \pm 0,006$	
	0,5	$0,258 \pm 0,009$	$0,221 \pm 0,005$	$0,411 \pm 0,006$	
	1,0	$0,273 \pm 0,005$	$0,216 \pm 0,008$	$0,350 \pm 0,011$	
15	1,5	$0,\!287\pm0,\!010$	$0,219 \pm 0,005$	$0,379 \pm 0,006$	
	2,1	$0,287 \pm 0,010$	$0,224 \pm 0,001$	$0,287 \pm 0,020$	
	2,5	$0,287 \pm 0,005$	$0,213 \pm 0,005$	$0,252 \pm 0,010$	
	0,5	$0,276 \pm 0,009$	$0,255 \pm 0,005$	$0,428 \pm 0,012$	
	1,0	$0,278 \pm 0,005$	$0,255 \pm 0,005$	$0,428 \pm 0,015$	
17,5	1,5	$0,278 \pm 0,010$	$0,250 \pm 0,001$	$0,434 \pm 0,000$	
	2,1	$0,290 \pm 0,005$	$0,241 \pm 0,001$	$0,376 \pm 0,010$	
	2,5	$0,290 \pm 0,005$	$0,235 \pm 0,005$	$0,360 \pm 0,011$	
	0,5	$0,341 \pm 0,011$	$0,273 \pm 0,005$	$0,372 \pm 0,005$	
	1,0	$0,363 \pm 0,005$	$0,287 \pm 0,005$	$0,401 \pm 0,015$	
20	1,5	$0,379 \pm 0,006$	$0,284 \pm 0,001$	$0,354 \pm 0,011$	
	2,1	$0,388 \pm 0,006$	$0,281 \pm 0,013$	$0,345 \pm 0,030$	
	2,5	$0,374 \pm 0,003$	$0,287 \pm 0,010$	$0,357 \pm 0,009$	

.

Tabela 24. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna jęczmienia odmiany Rudnik o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 24. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of barley grain variety Rudnik at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

W/:1	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne			
w ligotnose [%]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	0,5	$0,257 \pm 0,002$	$0,252 \pm 0,003$	$0,\!428 \pm 0,\!015$	
	1,0	$0,242 \pm 0,009$	$0,244 \pm 0,006$	$0,\!402\pm0,\!008$	
10	1,5	$0,241 \pm 0,012$	$0,237 \pm 0,010$	$0,405 \pm 0,018$	
	2,1	$0,234 \pm 0,009$	$0,225 \pm 0,004$	$0,383 \pm 0,007$	
	2,5	$0,\!226\pm0,\!005$	$0,228 \pm 0,007$	$0,408 \pm 0,006$	
	0,5	$0,\!280\pm0,\!008$	$0,269 \pm 0,003$	$0,347 \pm 0,019$	
	1,0	$0,245 \pm 0,010$	$0,266 \pm 0,002$	$0,335 \pm 0,014$	
12,5	1,5	$0,239 \pm 0,010$	$0,259 \pm 0,005$	$0,351 \pm 0,019$	
	2,1	$0,\!239\pm0,\!008$	$0,248 \pm 0,007$	$0,\!258\pm0,\!001$	
	2,5	$0,\!252\pm0,\!005$	$0,233 \pm 0,021$	$0,273 \pm 0,022$	
	0,5	$0,258 \pm 0,006$	$0,273 \pm 0,005$	$0,382 \pm 0,015$	
	1,0	$0,\!256\pm0,\!009$	$0,264 \pm 0,004$	$0,401 \pm 0,009$	
15	1,5	$0,241 \pm 0,007$	$0,250 \pm 0,003$	$0,323 \pm 0,014$	
	2,1	$0,234 \pm 0,014$	$0,247 \pm 0,012$	$0,293 \pm 0,024$	
	2,5	$0,232 \pm 0,004$	$0,246 \pm 0,012$	$0,317\pm0,032$	
	0,5	$0,278 \pm 0,010$	$0,325 \pm 0,012$	$0,368 \pm 0,020$	
	1,0	$0,267 \pm 0,002$	$0,267 \pm 0,007$	$0,338 \pm 0,001$	
17,5	1,5	$0,256 \pm 0,007$	$0,247 \pm 0,010$	$0,320 \pm 0,009$	
	2,1	$0,\!240\pm0,\!005$	$0,256 \pm 0,018$	$0,332 \pm 0,005$	
	2,5	$0,238 \pm 0,004$	$0,240 \pm 0,008$	$0,\!302\pm0,\!015$	
	0,5	$0,279 \pm 0,012$	$0,352 \pm 0,004$	$0,414 \pm 0,010$	
	1,0	$0,266 \pm 0,006$	$0,298 \pm 0,009$	$0,438 \pm 0,006$	
20	1,5	$0,252 \pm 0,012$	$0,\!281\pm0,\!019$	$0,428 \pm 0,006$	
	2,1	$0,251 \pm 0,015$	$0,273 \pm 0,013$	$0,386 \pm 0,035$	
	2,5	$0,245 \pm 0,011$	$0,283 \pm 0,008$	$0,369 \pm 0,024$	

Tabela 25. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna kukurydzy odmiany Mieszko o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 25. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of corn grain variety Mieszko at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

Wilgotność [%]	Napór normalny [kPa]	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne		
		Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30
	0,5	$0,292 \pm 0,001$	$0,273 \pm 0,007$	$0,402 \pm 0,002$
	1,0	$0,294 \pm 0,003$	$0,259 \pm 0,008$	$0,326 \pm 0,022$
10	1,5	$0,\!289\pm0,\!007$	$0,258 \pm 0,005$	$0,376 \pm 0,030$
	2,1	$0,269 \pm 0,003$	$0,234 \pm 0,002$	$0,393 \pm 0,014$
	2,5	$0,246 \pm 0,006$	$0,232 \pm 0,007$	$0,382 \pm 0,020$
	0,5	$0,262 \pm 0,014$	$0,290 \pm 0,005$	$0,369 \pm 0,005$
	1,0	$0,261 \pm 0,016$	$0,249 \pm 0,007$	$0,369\pm0,027$
12,5	1,5	$0,259 \pm 0,015$	$0,265 \pm 0,007$	$0,441 \pm 0,021$
	2,1	$0,253 \pm 0,013$	$0,251 \pm 0,006$	$0,398 \pm 0,011$
	2,5	$0,\!249\pm0,\!010$	$0,260 \pm 0,005$	$0,385 \pm 0,010$
	0,5	$0,267 \pm 0,015$	$0,248 \pm 0,011$	$0,408 \pm 0,006$
	1,0	$0,259 \pm 0,006$	$0,245 \pm 0,009$	$0,\!418 \pm 0,\!011$
15	1,5	$0,252 \pm 0,006$	$0,245 \pm 0,009$	$0,431 \pm 0,023$
	2,1	$0,245 \pm 0,010$	$0,244 \pm 0,013$	$0,405 \pm 0,020$
	2,5	$0,\!242\pm0,\!014$	$0,238 \pm 0,006$	$0,332 \pm 0,005$
	0,5	$0,253 \pm 0,011$	$0,263 \pm 0,016$	$0,476 \pm 0,028$
	1,0	$0,268 \pm 0,005$	$0,266 \pm 0,007$	$0,501 \pm 0,025$
17,5	1,5	$0,255 \pm 0,019$	$0,252 \pm 0,005$	$0,469 \pm 0,016$
	2,1	$0,255 \pm 0,012$	$0,252 \pm 0,006$	$0,509 \pm 0,039$
	2,5	$0,235 \pm 0,007$	$0,251 \pm 0,013$	$0,497 \pm 0,011$
20	0,5	$0,303 \pm 0,010$	$0,284 \pm 0,008$	$0,501 \pm 0,013$
	1,0	$0,268 \pm 0,012$	$0,269 \pm 0,012$	$0,\!479\pm0,\!012$
	1,5	$0,265 \pm 0,018$	$0,260 \pm 0,010$	$0,494 \pm 0,013$
	2,1	$0,254 \pm 0,023$	$0,254 \pm 0,009$	$0,577 \pm 0,001$
	2,5	$0,253 \pm 0,009$	$0,256 \pm 0,019$	$0,554 \pm 0,023$

Tabela 26. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna owsa odmiany Borowiak o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 26. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of oat grain variety Borowiak at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

Wilcom off [0/]	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne			
wingothose [76]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	0,5	$0,268 \pm 0,004$	$0,271 \pm 0,010$	$0,359 \pm 0,015$	
	1,0	$0,260 \pm 0,006$	$0,253 \pm 0,001$	$0,359 \pm 0,003$	
10	1,5	$0,246 \pm 0,006$	$0,255 \pm 0,007$	$0,356 \pm 0,002$	
	2,1	$0,\!237\pm0,\!004$	$0,246 \pm 0,007$	$0,\!380\pm0,\!021$	
	2,5	$0,237 \pm 0,006$	$0,237 \pm 0,006$	$0,353 \pm 0,039$	
	0,5	$0,257 \pm 0,001$	$0,262 \pm 0,003$	0,404 ±0,001	
	1,0	$0,251 \pm 0,001$	$0,260 \pm 0,002$	0,404 ±0,001	
12,5	1,5	$0,247 \pm 0,011$	$0,247 \pm 0,001$	0,369 ±0,001	
	2,1	$0,252 \pm 0,008$	$0,241 \pm 0,001$	0,347 ±0,001	
	2,5	$0,245 \pm 0,005$	$0,236 \pm 0,006$	$0,\!372\pm0,\!006$	
	0,5	$0,264 \pm 0,009$	$0,260 \pm 0,005$	$0,335 \pm 0,005$	
	1,0	$0,259 \pm 0,005$	$0,253 \pm 0,004$	$0,335 \pm 0,011$	
15	1,5	$0,250 \pm 0,006$	$0,241 \pm 0,007$	$0,344\pm0,005$	
	2,1	$0,250 \pm 0,009$	$0,235 \pm 0,002$	$0,314\pm0,005$	
	2,5	$0,235 \pm 0,003$	$0,231 \pm 0,006$	$0,296 \pm 0,005$	
	0,5	$0,267 \pm 0,002$	$0,265 \pm 0,004$	$0,357 \pm 0,009$	
	1,0	$0,262 \pm 0,004$	$0,262 \pm 0,006$	$0,369 \pm 0,005$	
17,5	1,5	$0,243 \pm 0,010$	$0,246 \pm 0,004$	$0,372 \pm 0,005$	
	2,1	$0,240 \pm 0,009$	$0,239 \pm 0,005$	$0,350 \pm 0,005$	
	2,5	$0,235 \pm 0,014$	$0,230 \pm 0,010$	$0,357 \pm 0,016$	
	0,5	$0,276 \pm 0,004$	$0,269 \pm 0,002$	0,388 ± 0,011	
	1,0	$0,251 \pm 0,006$	$0,247 \pm 0,008$	$0,376 \pm 0,010$	
20	1,5	$0,235 \pm 0,004$	$0,242 \pm 0,004$	$0,392 \pm 0,015$	
	2,1	$0,244 \pm 0,005$	$0,234 \pm 0,005$	$0,\!428 \pm 0,\!006$	
	2,5	$0,233 \pm 0,005$	$0,229 \pm 0,006$	$0,434 \pm 0,001$	

Tabela 27. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ ziarna pszenżyta odmiany Fidelio o wilgotności w zakresie 10-20% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 27. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of triticale grain variety Fidelio at the moisture content of 10-20% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

W/:1 to - 55 50/7	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne			
wilgomose [%]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30	
	0,5	$0,252 \pm 0,005$	$0,216 \pm 0,008$	$0,354 \pm 0,005$	
	1,0	$0,261 \pm 0,005$	$0,224 \pm 0,001$	$0,317 \pm 0,010$	
10	1,5	$0,273 \pm 0,005$	$0,219 \pm 0,005$	$0,369 \pm 0,020$	
	2,1	$0,281 \pm 0,005$	$0,210 \pm 0,005$	$0,366 \pm 0,025$	
	2,5	$0,\!278\pm0,\!005$	$0,213 \pm 0,005$	$0,325 \pm 0,029$	
	0,5	$0,255 \pm 0,005$	$0,227 \pm 0,005$	$0,387 \pm 0,003$	
12.5	1,0	$0,\!258\pm0,\!009$	$0,230 \pm 0,005$	$0,385 \pm 0,026$	
12,5	1,5	$0,\!252\pm0,\!005$	$0,213 \pm 0,005$	$0,388 \pm 0,011$	
	2,1	$0,\!252\pm0,\!005$	$0,221 \pm 0,005$	$0,373 \pm 0,028$	
	2,5	$0,238 \pm 0,005$	0,219 ± 0,010	$0,382 \pm 0,006$	
	0,5	$0,293 \pm 0,009$	$0,243 \pm 0,004$	$0,428 \pm 0,015$	
	1,0	$0,311 \pm 0,001$	$0,230 \pm 0,005$	$0,385 \pm 0,019$	
15	1,5	$0,314 \pm 0,005$	$0,238 \pm 0,005$	$0,\!428\pm0,\!015$	
	2,1	$0,308 \pm 0,005$	$0,238 \pm 0,005$	$0,\!434 \pm 0,\!010$	
	2,5	$0,293 \pm 0,009$	$0,247 \pm 0,005$	$0,408 \pm 0,006$	
	0,5	$0,388 \pm 0,006$	$0,311 \pm 0,000$	$0,472 \pm 0,012$	
17,5	1,0	$0,361 \pm 0,012$	$0,314 \pm 0,005$	$0,472 \pm 0,012$	
	1,5	$0,344 \pm 0,005$	$0,320 \pm 0,009$	$0,435 \pm 0,017$	
	2,1	$0,360 \pm 0,005$	$0,329 \pm 0,001$	$0,455 \pm 0,010$	
	2,5	$0,369 \pm 0,005$	0,317 ± 0,010	$0,445 \pm 0,010$	
	0,5	$0,445 \pm 0,020$	$0,411 \pm 0,006$	$0,525 \pm 0,006$	
20	1,0	$0,\!458\pm0,\!016$	$0,392 \pm 0,006$	$0,527 \pm 0,006$	
20	1,5	$0,487 \pm 0,001$	$0,418 \pm 0,006$	$0,519 \pm 0,011$	
	2,1	$0,472 \pm 0,012$	$0,401 \pm 0,006$	$0,479 \pm 0,006$	
	2,5	$0,451 \pm 0,006$	$0,395 \pm 0,001$	$0,472 \pm 0,006$	

Tabela 28. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-15% o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 28. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-15% against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

Wilcotność [0/]	Napór normalny	Współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne		
wingotnose [76]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30
	0,5	$0,279 \pm 0,007$	$0,245 \pm 0,008$	$0,351 \pm 0,023$
	1,0	$0,234 \pm 0,006$	$0,242 \pm 0,006$	$0,336 \pm 0,018$
6	1,5	$0,237 \pm 0,007$	$0,231 \pm 0,012$	$0,294 \pm 0,002$
	2,1	$0,240 \pm 0,006$	$0,232 \pm 0,005$	$0,276 \pm 0,017$
	2,5	$0,237\pm0,008$	$0,\!220\pm0,\!007$	$0,289 \pm 0,004$
	0,5	$0,279 \pm 0,007$	$0,245 \pm 0,010$	$0,357 \pm 0,040$
	1,0	$0,275 \pm 0,007$	$0,237 \pm 0,011$	$0,\!314\pm0,\!014$
9	1,5	$0,270 \pm 0,002$	$0,227 \pm 0,004$	$0,335\pm0,028$
	2,1	$0,267 \pm 0,012$	$0,223 \pm 0,005$	$0,302 \pm 0,009$
	2,5	$0,254 \pm 0,002$	$0,211 \pm 0,021$	$0,302 \pm 0,009$
	0,5	$0,300 \pm 0,018$	$0,240 \pm 0,007$	$0,308 \pm 0,005$
	1,0	$0,301 \pm 0,019$	$0,243 \pm 0,004$	$0,332 \pm 0,005$
12	1,5	$0,289 \pm 0,021$	$0,239 \pm 0,009$	$0,335 \pm 0,005$
	2,1	0,287 ±0,015	$0,228 \pm 0,005$	$0,308 \pm 0,005$
	2,5	$0,298 \pm 0,004$	$0,217 \pm 0,002$	$0,335 \pm 0,005$
15	0,5	$0,292 \pm 0,010$	$0,240 \pm 0,006$	$0,332 \pm 0,005$
	1,0	$0,\!278\pm0,\!012$	$0,235 \pm 0,014$	$0,314 \pm 0,005$
	1,5	$0,271 \pm 0,017$	$0,237 \pm 0,008$	$0,317 \pm 0,005$
	2,1	$0,264 \pm 0,008$	$0,228 \pm 0,008$	$0,317 \pm 0,005$
	2,5	$0,274 \pm 0,011$	$0,215 \pm 0,003$	$0,335 \pm 0,011$

Tabela 29. Średnie wartości (\pm odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion wybranych roślin uprawnych o wilgotności kondycjonalnej o blachę nierdzewną, ocynkowaną oraz beton B30 wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa

Table 29. Mean values (\pm St. Dev.) of the friction coefficient μ of selected seeds at the storage moisture content against stainless steel, galvanized steel and concrete B30 determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

Materiał	Napór	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ		
Wilgotność [%]	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	Beton B30
	0,5	$0,271 \pm 0,006$	$0,271 \pm 0,005$	$0,411 \pm 0,006$
Amarantus	1,0	$0,262 \pm 0,002$	$0,243 \pm 0,005$	$0,350 \pm 0,011$
Rawa	1,5	$0,242 \pm 0,003$	$0,224 \pm 0,006$	$0,379 \pm 0,006$
8	2,1	$0,237 \pm 0,013$	$0,224 \pm 0,005$	0,287 ±0,020
0	2,5	$0,224 \pm 0,004$	$0,226 \pm 0,003$	$0,252 \pm 0,010$
	0,5	$0,252 \pm 0,003$	$0,257 \pm 0,004$	$0,372 \pm 0,005$
Gorczyca biała	1,0	$0,244 \pm 0,006$	$0,241 \pm 0,003$	$0,401 \pm 0,015$
Borowska	1,5	$0,237 \pm 0,010$	$0,239 \pm 0,005$	$0,354 \pm 0,011$
0	2,1	$0,225 \pm 0,010$	$0,230 \pm 0,006$	$0,345 \pm 0,030$
,	2,5	$0,228 \pm 0,007$	$0,225 \pm 0,003$	$0,357 \pm 0,009$
	0,5	$0,257 \pm 0,007$	$0,258 \pm 0,007$	$0,428 \pm 0,012$
Groch	1,0	$0,251 \pm 0,003$	$0,246 \pm 0,006$	$0,\!428 \pm 0,\!015$
Plast	1,5	$0,236 \pm 0,001$	$0,240 \pm 0,004$	$0,434 \pm 0,001$
10	2,1	$0,232 \pm 0,003$	$0,236 \pm 0,005$	$0,376 \pm 0,010$
10	2,5	$0,229 \pm 0,006$	$0,236 \pm 0,007$	$0,360 \pm 0,011$
<u> </u>	0,5	$0,231 \pm 0,005$	$0,245 \pm 0,006$	$0,369 \pm 0,020$
Gryka	1,0	$0,225 \pm 0,005$	$0,232 \pm 0,002$	$0,366 \pm 0,019$
Kora	1,5	$0,217 \pm 0,003$	$0,228 \pm 0,005$	$0,363 \pm 0,014$
10	2,1	$0,226 \pm 0,002$	$0,222 \pm 0,005$	$0,329 \pm 0,018$
10	2,5	$0,220 \pm 0,004$	$0,227 \pm 0,006$	$0,338 \pm 0,009$
	0,5	$0,252 \pm 0,005$	$0,278 \pm 0,005$	$0,273 \pm 0,005$
Soczewica	1,0	$0,241 \pm 0,001$	$0,267 \pm 0,001$	$0,299 \pm 0,005$
Tina	1,5	$0,247 \pm 0,005$	$0,281 \pm 0,005$	$0,302 \pm 0,001$
8	2,1	$0,250 \pm 0,001$	$0,276 \pm 0,001$	$0,338 \pm 0,009$
0	2,5	$0,250 \pm 0,001$	$0,276 \pm 0,001$	$0,344 \pm 0,005$
	0,5	$0,223 \pm 0,007$	$0,270 \pm 0,013$	$0,354 \pm 0,005$
Soja	1,0	$0,233 \pm 0,008$	$0,252 \pm 0,010$	$0,347 \pm 0,016$
Aldana	1,5	$0,230 \pm 0,005$	$0,241 \pm 0,001$	$0,354 \pm 0,005$
8	2,1	$0,235 \pm 0,005$	$0,230 \pm 0,005$	$0,366 \pm 0,001$
0	2,5	0.247 ± 0.005	0.230 ± 0.005	0.369 ± 0.005

Matarial	Napór normalny	Współczynnik tarcia zewnętrznego μ		
Ivrateria	[kPa]	Blacha nierdzewna	Blacha stalowa ocynkowana	
	0,5	$0,268 \pm 0,009$	$0,252 \pm 0,005$	
Mąka tortowa	1,0	$0,237 \pm 0,005$	$0,222 \pm 0,009$	
	1,5	$0,222 \pm 0,000$	$0,216 \pm 0,005$	
12,7	2,1	$0,206 \pm 0,005$	$0,222 \pm 0,000$	
	2,5	$0,197 \pm 0,005$	$0,206 \pm 0,005$	
	0,5	$0,194 \pm 0,000$	$0,197 \pm 0,005$	
Mąka krupczatka	1,0	$0,197 \pm 0,005$	$0,194 \pm 0,009$	
	1,5	$0,188 \pm 0,005$	$0,176 \pm 0,000$	
13,4	2,1	$0,185 \pm 0,000$	$0,179 \pm 0,005$	
	2,5	$0,194 \pm 0,000$	$0,170 \pm 0,005$	
	0,5	$0,259 \pm 0,009$	$0,293 \pm 0,005$	
Semolina	1,0	$0,234 \pm 0,005$	$0,271 \pm 0,005$	
	1,5	$0,225 \pm 0,005$	$0,240 \pm 0,009$	
12,7	2,1	$0,222 \pm 0,000$	$0,219 \pm 0,005$	
	2,5	$0,213 \pm 0,000$	$0,231 \pm 0,000$	
	0,5	$0,222 \pm 0,000$	$0,265 \pm 0,005$	
Kasza manna	1,0	$0,213 \pm 0,009$	$0,240 \pm 0,000$	
	1,5	$0,222 \pm 0,000$	$0,237 \pm 0,005$	
13,6	2,1	$0,222 \pm 0,000$	$0,210 \pm 0,005$	
	2,5	$0,210 \pm 0,005$	$0,210 \pm 0,005$	
	0,5	$0,222 \pm 0,009$	$0,284 \pm 0,005$	
Kasza jęczmienna	1,0	$0,216 \pm 0,005$	$0,252 \pm 0,005$	
	1,5	$0,234 \pm 0,005$	$0,284 \pm 0,011$	
13,2	2,1	$0,213 \pm 0,000$	$0,262 \pm 0,005$	
	2,5	$0,210 \pm 0,005$	$0,243 \pm 0,005$	
	0,5	$0,237 \pm 0,005$	$0,252 \pm 0,005$	
Płatki owsiane	1,0	$0,203 \pm 0,009$	$0,234 \pm 0,005$	
	1,5	$0,206 \pm 0,005$	$0,219 \pm 0,005$	
11,0	2,1	$0,194 \pm 0,000$	$0,206 \pm 0,005$	
	2,5	$0,197 \pm 0,005$	$0,200 \pm 0,005$	

Tabela 30. Średnie wartości (±odch. st.) współczynnika tarcia μ wybranych surowców spożywczych o blachę nierdzewną oraz ocynkowaną wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 0,5-2,5 kPa **Table 30.** Mean values (±St. Dev.) of the friction coefficient μ of selected food powders against stainless steel and galvanized steel determined at the normal pressure of 0,5-2,5 kPa

cd. Tabeli 30.			
	0,5	$0,303 \pm 0,005$	$0,364 \pm 0,000$
Cukier puder	1,0	$0,287 \pm 0,009$	$0,322 \pm 0,005$
	1,5	$0,277 \pm 0,000$	$0,325 \pm 0,000$
0,4	2,1	$0,252 \pm 0,005$	$0,338 \pm 0,005$
	2,5	$0,252 \pm 0,005$	$0,348 \pm 0,005$
	0,5	$0,249 \pm 0,000$	$0,284 \pm 0,005$
Cukier kryształ	1,0	$0,252 \pm 0,005$	$0,265 \pm 0,005$
	1,5	$0,249 \pm 0,000$	$0,293 \pm 0,005$
0,4	2,1	$0,240 \pm 0,000$	$0,280 \pm 0,011$
	2,5	$0,225 \pm 0,005$	$0,293 \pm 0,005$
	0,5	$0,284 \pm 0,005$	$0,381 \pm 0,005$
Skrobia ziemniaczana	1,0	$0,287 \pm 0,016$	$0,384 \pm 0,017$
	1,5	$0,265 \pm 0,005$	$0,411 \pm 0,012$
18,2	2,1	$0,252 \pm 0,005$	$0,407 \pm 0,005$
	2,5	$0,246 \pm 0,005$	$0,449 \pm 0,006$
	0,5	$0,249 \pm 0,009$	$0,335 \pm 0,009$
Mleko w proszku	1,0	$0,222 \pm 0,009$	$0,303 \pm 0,014$
	1,5	$0,206 \pm 0,005$	$0,296 \pm 0,009$
4,4	2,1	$0,188 \pm 0,005$	$0,287 \pm 0,000$
	2,5	$0,188 \pm 0,005$	$0,290 \pm 0,005$
	0,5	$0,210 \pm 0,005$	$0,265 \pm 0,019$
Mleko granulowane	1,0	$0,194 \pm 0,000$	$0,228 \pm 0,005$
-	1,5	$0,185 \pm 0,000$	$0,216 \pm 0,053$
7,9	2,1	$0,167 \pm 0,000$	$0,200 \pm 0,005$
	2,5	$0,158 \pm 0,000$	$0,185 \pm 0,000$
	0,5	$0,246 \pm 0,005$	$0,280 \pm 0,005$
Sól warzona	1,0	$0,234 \pm 0,005$	$0,274 \pm 0,014$
	1,5	$0,231 \pm 0,000$	$0,280 \pm 0,011$
0,2	2,1	$0,231 \pm 0,000$	$0,287 \pm 0,000$
	2,5	$0,234 \pm 0,005$	$0,293 \pm 0,005$
	0,5	$0,188 \pm 0,005$	$0,222 \pm 0,009$
Śruta kukurydziana	1,0	$0,200 \pm 0,005$	$0,222 \pm 0,009$
	1,5	$0,194 \pm 0,009$	$0,240 \pm 0,000$
11,7	2,1	$0,194 \pm 0,000$	$0,213 \pm 0,000$
	2,5	$0,191 \pm 0,005$	$0,216 \pm 0,005$
	0,5	$0,213 \pm 0,000$	$0,213 \pm 0,000$
Śruta sojowa	1,0	$0,194 \pm 0,000$	$0,194 \pm 0,000$
	1,5	$0,182 \pm 0,005$	$0,182 \pm 0,005$
8,5	2,1	$0,158 \pm 0,000$	$0,158 \pm 0,000$
	2,5	$0,161 \pm 0,005$	$0,161 \pm 0,005$

5.5. Kąt tarcia wewnętrznego, kohezja, indeks płynięcia, kąt nasypu

Tabela 31. Średnie wartości (±odch. st.) kąta tarcia wewnętrznego φ , kohezji *c* oraz kąta nasypu θ ziarna zbóż o wilgotności w zakresie 10-20%

Table 31. Mean values (\pm St. Dev.) of the angle of internal friction φ , the cohesion *c* and the angle of natural repose θ of cereal grains at the moisture content of 10-20%

Materiał	Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego φ[deg]	Kohezja c [kPa]	Kąt nasypu $ heta$ [deg]
	10	$25,7 \pm 0,3$	$0,9 \pm 0,5$	$24,3 \pm 0,5$
Degenies	12,5	$26,2 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,5$	$29,0 \pm 0,7$
Pagro	15	$27,0 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,7$	$33,3 \pm 0,6$
Degla	17,5	$33,0 \pm 1,0$	$5,1 \pm 0,5$	$37,6 \pm 0,5$
	20	$35,5 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,9$	$35,4 \pm 0,4$
	10	$23,0 \pm 1,0$	$6,2 \pm 1,4$	$29,0 \pm 0,6$
Żuto	12,5	$24,4 \pm 1,1$	$6,6 \pm 1,5$	$27,1 \pm 0,5$
Zyto	15	$25,1 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,7$	$31,4 \pm 0,2$
Amno	17,5	$28,4 \pm 1,2$	$3,2 \pm 1,4$	$29,9 \pm 0,3$
	20	$28,0 \pm 1,0$	$7,7 \pm 1,4$	$30,3 \pm 0,2$
	10	$27,8 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,6$	$26,8\pm0,7$
Inorminé	12,5	$28,5 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,8$	$28,9\pm0,7$
Dudnik	15	$31,2 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,4$	$29,5 \pm 0,7$
Rudilik	17,5	$30,6 \pm 1,0$	$2,9 \pm 0,5$	$30,5 \pm 0,8$
	20	$33,2 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,7$	$32,1 \pm 0,8$
	10	$26,7 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,9$	$23,5 \pm 0,4$
Kultumidaa	12,5	$31,7 \pm 0,5$	$6,1 \pm 0,9$	$33,8 \pm 0,2$
Miagriko	15	$32,0 \pm 1,4$	$5,6 \pm 1,8$	$30,6 \pm 0,3$
MICSZKO	17,5	$33,4 \pm 0,8$	$5,9 \pm 1,1$	$34,2 \pm 0,5$
	20	33,6 ± 1,5	$8,8 \pm 1,6$	$31,9 \pm 0,6$
	10	$22,1 \pm 1,1$	$0,4 \pm 1,4$	$28,4 \pm 0,4$
Owige	12,5	$22,4 \pm 0,9$	$1,1 \pm 1,3$	$28,7 \pm 1,0$
Dorowiek	15	$24,0 \pm 0,5$	$2,2 \pm 0,6$	$31,3 \pm 0,5$
DOLOWIAK	17,5	$23,9 \pm 1,0$	$4,0 \pm 1,1$	$32,8 \pm 0,5$
	20	$26,4 \pm 1,7$	$6,5 \pm 2,0$	$34,7 \pm 0,4$
	10	$23,6 \pm 0,7$	$5,7 \pm 1,0$	$29,9 \pm 0,4$
Pszenżyto	12,5	$23,0 \pm 1,2$	$9,4 \pm 1,6$	$28,4 \pm 0,2$
Fidelio	15	$25,3 \pm 1,1$	$12,1 \pm 1,3$	$30,5 \pm 0,1$
	17,5	$28,8 \pm 1,2$	$10,7 \pm 1,5$	$35,4 \pm 0,2$
	20	$28,4 \pm 1,2$	$11,1 \pm 1,8$	$38,3 \pm 0,2$
Tabela 32. Średnie wartości (\pm odch. st.) kąta tarcia wewnętrznego φ , kohezji c oraz kąta nasypu θ nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-16%

Materiał	Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego φ[deg]	Kohezja c [kPa]	Kąt nasypu θ [deg]
	6	$24,7\pm0,5$	$1,3 \pm 0,7$	$25,3\pm0,8$
	9	30,6 ± 0,4	$2,1\pm0,5$	$23,2\pm0,9$
Rzepak Licosmos	12	$31,7\pm0,7$	$7,5\pm0,9$	$25,5\pm0,9$
2400541105	14	$34,8\pm0,7$	$7,7\pm0,9$	$24,5\pm0,9$
	16	33,2 ± 0,9	$12,5 \pm 1,2$	$29,1\pm0,7$

Table 32. Mean values (\pm St. Dev.) of the angle of internal friction φ , the cohesion *c* and the angle of natural repose θ of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-16%

Tabela 33. Średnie wartości (±odch. st.) kąta tarcia wewnętrznego φ , kohezji *c* oraz kąta nasypu θ nasion wybranych roślin uprawnych

Table 33. Mean values (\pm St. Dev.) of the angle of internal friction φ , the cohesion *c* and the angle of natural repose θ of selected seeds

Materiał	Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego φ[deg]	Kohezja c [kPa]	Kąt nasypu $ heta$ [deg]
Amarantus, Rawa	8	$21,3 \pm 0,8$	$2,0 \pm 0,5$	$26,2 \pm 0,5$
Gorczyca biała, Borowska	9	$24,7\pm0,\!4$	$2,2\pm0,9$	$25,6 \pm 0,5$
Groch, Piast	10	$27,3\pm0,6$	$1,6 \pm 0,4$	$21,5 \pm 0,6$
Gryka, Kora	10	$22,0 \pm 0,8$	$1,6 \pm 0,7$	$28,2\pm0,5$
Soczewica, Tina	8	$14,3 \pm 0,4$	$2,1\pm0,6$	$24,6\pm0,7$
Soja, Aldana	8	30,1 ± 0,9	$1,8 \pm 1,0$	$32,5 \pm 0,5$

Tabela 34. Średnie wartości (±odch. st.) efektywnego kąta tarcia wewnętrznego δ , kąta tarcia wewnętrznego φ , kohezji *c*, indeksu płynięcia *i* oraz kąta nasypu θ wybranych produktów spożywczych wyznaczane przy naporze konsolidacji w zakresie 30-100 kPa

Table 34. Mean values (\pm St. Dev.) of the effective angle of internal friction δ , the angle of internal friction φ , the cohesion *c*, the flow index *i* and the angle of natural repose θ of selected food powders determined at the consolidation pressure of 30-100 kPa

Materiał Wilgotność [%]	Naprężenie konsolid. σ _r [kPa]	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ [deg]	Kąt tarcia wewnętrznego φ[deg]	Kohezja c [kPa]	Indeks płynięcia <i>i</i>	Kąt nasypu θ [deg]
Mąka tortowa	30	$30,4 \pm 2,7$	$26,5 \pm 1,0$	$2,7 \pm 0,4$	0,15	
450	60	$30,7 \pm 1,4$	$29,0 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,4$	0,07	444107
	80	$31,8 \pm 2,8$	$30,8 \pm 1,0$	$1,8 \pm 1,1$	0,04	$44,4 \pm 0,7$
12,7	100	$31,0 \pm 5,0$	$30,4 \pm 1,8$	$1,3\pm2,5$	0,02	
Mąka	30	$28,3 \pm 2,4$	$25,9 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,4$	0,09	
krupczatka	60	$27,6 \pm 1,8$	$26,1\pm0,7$	$2,0 \pm 0,6$	0,06	$40,0\pm0,7$
	80	$27,9 \pm 1,5$	$27,1\pm0,6$	$1,5 \pm 0,6$	0,03	
13,4	100	$26,8\pm2,1$	$25,5\pm0,8$	$2,8 \pm 1,2$	0,05	
Carrolling	30	$34,1 \pm 4,4$	$31,3 \pm 1,1$	$2,0 \pm 1,1$	0,10	
Semolina	60	$33,0 \pm 3,0$	$32,0 \pm 0,7$	$1,5 \pm 0,9$	0,04	22.0 1 1.0
10.7	80	$33,9 \pm 1,7$	$33,7 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,7$	0,01	$33,0 \pm 1,0$
12,7	100	$33,3 \pm 3,5$	$32,8\pm0,8$	$1,3 \pm 1,7$	0,02	
V	30	$28,9 \pm 2,1$	$25,8 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,3$	0,11	
Kasza manna	60	$30,9 \pm 3,2$	$29,9 \pm 1,1$	$1,3 \pm 0,4$	0,04	22 4 1 1 2
12 (80	$29,8 \pm 2,6$	27,6 ±0,8	$3,9 \pm 1,1$	0,08	$33,4 \pm 1,3$
13,6	100	$30,2\pm0,7$	27,8 ±0,2	$5,2\pm0,4$	0,08	
Kasza	30	33,3 ± 3,8	$33,0 \pm 1,3$	$0,2 \pm 0,5$	0,01	
jęczmienna	60	$33,4 \pm 2,2$	$31,0 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,6$	0,09	221114
	80	$29,7 \pm 3,1$	$26,6 \pm 1,1$	$5,9 \pm 1,4$	0,11	$32,1 \pm 1,4$
13,2	100	$31,5 \pm 3,3$	$29,0 \pm 1,7$	$10,5\pm0,5$	0,10	
Płatki	30	$22,0 \pm 3,5$	$20,8 \pm 1,0$	$0,7 \pm 0,6$	0,04	
owsiane	60	$19,4 \pm 2,2$	$18,8 \pm 1,2$	$0,7 \pm 0,3$	0,02	25 0 1 1 1
	80	$21,5 \pm 2,3$	$19,8 \pm 0,9$	$2,7 \pm 1,1$	0,06	$55,2 \pm 1,1$
11,0	100	$21,4\pm2,5$	$19,2\pm0,9$	$2,8 \pm 1,5$	0,05	
Cultan audan	30	34,2 ± 3,6	$31,0 \pm 0,7$	$5,4 \pm 0,5$	0,12	
Cukier puder	60	$34,1 \pm 3,2$	$32,5 \pm 0,8$	$5,3 \pm 0,9$	0,06	407107
0.4	80	$32,5 \pm 3,9$	$28,7 \pm 2,6$	$7,0 \pm 3,2$	0,14	$48,7 \pm 0,7$
0,4	100	$36,9 \pm 2,5$	$34,6\pm0,6$	$6,2 \pm 1,6$	0,09	

cd. Tabeli 34.

					and the second design of the s	
Cukier	30	$33,1 \pm 7,5$	$27,8 \pm 2,1$	$3,6 \pm 1,1$	0,09	
kryształ	60	$34,0 \pm 7,9$	$31,5 \pm 1,9$	3,6 ± 2,3	0,09	250100
	80	$34,6 \pm 6,9$	$33,1 \pm 1,9$	$3,2 \pm 1,4$	0,06	$25,9 \pm 0,9$
0,4	100	$34,7 \pm 3,7$	$33,2\pm6,0$	$3,9\pm1,2$	0,06	
Skrobia	30	39,8 ± 2	39,3 ± 0,7	0,4 ± 0,3	0,02	
ziemniaczana	60	$39,4 \pm 4$	$37,5 \pm 1,5$	$2,3 \pm 1,2$	0,07	40.5 ± 0.9
	80	$37,5 \pm 3$	$35,2 \pm 1,0$	$5,5 \pm 1,1$	0,10	49,3 ± 0,8
18,2	100	$35,0 \pm 2$	$35,8\pm0,8$	$4,9\pm11$	0,08	
Mleko	30	35,5 ± 3	34,2 ± 1,1	$0,7 \pm 0,5$	0,05	
w proszku	60	$35,8 \pm 6$	34,6 ± 3,4	$1,6 \pm 0,3$	0,06	41 1 + 0.9
	80	$35,8 \pm 1$	$32,6 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,3$	0,12	$41,1 \pm 0,8$
4,4	100	$37,6 \pm 4$	$35,7\pm1,4$	$4,9 \pm 1,9$	0,11	
Mleko	30	$40,8 \pm 4,5$	37,8 ± 1,5	$2,2 \pm 0,4$	0,11	
granulowane	60	$38,0 \pm 2,2$	$32,7 \pm 0,6$	$7,4 \pm 0,6$	0,20	26.2 ± 1.0
	80	$37,2 \pm 6,7$	$31,5 \pm 2,2$	$11,9 \pm 2,5$	0,21	$30,2 \pm 1,0$
7,9	100	35,0 ± 3	$30,8\pm0,6$	$10,0\pm0,9$	0,16	
Sál worzona	30	$34,4 \pm 7,1$	33,0 ± 1,7	0,9±0,3	0,05	
Sol warzona	60	$32,9 \pm 3,5$	$31,9\pm0,9$	$1,5 \pm 1,0$	0,04	27.4 ± 0.6
0.2	80	$35,0 \pm 3,5$	$33,9 \pm 0,9$	$2,2 \pm 1,4$	0,04	27,4 ± 0,0
0,2	100	$33,3 \pm 3,2$	$32,6\pm0,8$	$1,6 \pm 1,5$	0,03	
Śruta	30	33,6 ± 3,9	$27,7 \pm 1,9$	4,1 ± 1,0	0,10	
kukurydziana	60	$31,8 \pm 8,8$	$29,9 \pm 2,3$	$2,6 \pm 2,5$	0,07	206 + 10
	80	$33,3 \pm 3,2$	$32,1 \pm 0,8$	$2,3 \pm 1,2$	0,04	$50,0 \pm 1,0$
11,7	100	$33,4 \pm 0,7$	$31,2\pm0,3$	$5,3\pm0,7$	0,08	
Émite esterio	30	36,6 ± 2,8	32,4 ± 0,6	$2,9 \pm 0,4$	0,15	
Sruta sojowa	60	$33,9 \pm 4,4$	$31,6 \pm 1,1$	$3,4 \pm 1,2$	0,09	41.7 ± 0.7
05	80	$34,8 \pm 3,8$	$33,7\pm0,9$	$2,2 \pm 1,4$	0,04	41,/ ± 0,/
0,3	100	$33,8 \pm 1,4$	$31,3 \pm 0,4$	$6,2 \pm 0,7$	0,10	

5.6. Iloraz naporu

Tabela 35. Średnie wartości (±odch. st.) ilorazu naporu k_s i k_{φ} oraz kąta tarcia wewnętrznego φ ziarna zbóż o wilgotności w zakresie 10-20%

Table 35. Mean values (\pm St. Dev.) of the pressure ratio k_s and k_{φ} and the angle of internal friction φ of cereal grains at the moisture content of 10-20%

Materiał	Wilgotność [%]	k_s	k_{arphi}	φ [deg]
	10	$0,44 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,01$	25,7 ± 0,3
Dezonico	12,5	$0,38 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$	$26,2 \pm 0,4$
Pszenica	15	$0,34 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,01$	$27,0\pm0,5$
Begra	17,5	$0,31\pm0,02$	$0,50\pm0,02$	$33,0 \pm 1,0$
	20	$0,35 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$	$35,5 \pm 0,5$
	10	$0,52 \pm 0,01$	$0,67 \pm 0,02$	$23,0 \pm 1,0$
Żuto	12,5	$0,51 \pm 0,04$	$0,64 \pm 0,02$	$24,4 \pm 1,1$
Zyto	15	$0,47 \pm 0,06$	$0,63 \pm 0,02$	$25,1 \pm 0,5$
Amilo	17,5	$0,37 \pm 0,04$	$0,58\pm0,02$	$28,4 \pm 1,2$
	20	$0,32 \pm 0,05$	$0,58\pm0,02$	$28,0 \pm 1,0$
	10	$0,45 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,01$	$27,8 \pm 0,4$
T	12,5-	$0,47 \pm 0,03$	$0,57\pm0,01$	$28,5 \pm 0,5$
Jęczmien	15	$0,43 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,01$	$31,2 \pm 0,3$
Rudnik	17,5	$0,45 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,02$	$30,6 \pm 1,0$
	20	$0,39 \pm 0,03$	$0,50\pm0,01$	$33,2 \pm 0,5$
	10	$0,\!48 \pm 0,\!04$	$0,60 \pm 0,01$	$26,7 \pm 0,6$
	12,5	$0,40 \pm 0,03$	$0,52 \pm 0,01$	$31,7 \pm 0,5$
Kukuryaza	15	$0,36 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,02$	$32,0 \pm 1,4$
Mieszko	17,5	$0,34 \pm 0,03$	$0,50 \pm 0,02$	$33,4 \pm 0,8$
	20	$0,30 \pm 0,05$	$0,49 \pm 0,03$	$33,6 \pm 1,5$
	10	$0,49 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,02$	$22,1 \pm 1,1$
0	12,5	$0,44 \pm 0,04$	$0,68 \pm 0,02$	$22,4 \pm 0,9$
Owies	15	$0,45 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,01$	$24,0 \pm 0,5$
Borowiak	17,5	$0,40 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,02$	$23,9 \pm 1,0$
	20	$0,41 \pm 0,06$	$0,61 \pm 0,03$	$26,4 \pm 1,7$
	10	$0,49 \pm 0,03$	$0,66 \pm 0,02$	$23,6 \pm 0,7$
Pszenżyto	12,5	$0,51 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,02$	$23,0 \pm 1,2$
Fidelio	15	$0,52 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,02$	$25,3 \pm 1,1$
	17,5	$0,39 \pm 0,03$	$0,57\pm0,02$	$28,8 \pm 1,2$
	20	$0,38 \pm 0,06$	$0,58 \pm 0,02$	$28,4 \pm 1,2$

Tabela 36. Średnie wartości (\pm odch. st.) ilorazu naporu: k_s i k_{φ} oraz kąta tarcia wewnętrznego φ nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-15%

Table 36. Mean values (\pm St. Dev.) of the pressure ratio k_s and k_{φ} and the angle of internal friction φ of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-15%

Materiał	Wilgotność [%]	k_s	k_{arphi}	φ [deg]
	6	$0,46 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,02$	$24,7 \pm 0,5$
Rzepak	9	$0,28 \pm 0,04$	$0,54 \pm 0,01$	$30,6 \pm 0,4$
Licosmos	12	$0,27 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,01$	$31,7 \pm 0,7$
	15	$0,24 \pm 0,02$	$0,\!47 \pm 0,\!01$	$34,8 \pm 0,7$

Tabela 37. Średnie wartości (±odch. st.) ilorazu naporu: k_s i k_{φ} oraz kąta tarcia wewnętrznego φ nasion wybranych roślin uprawnych

Table 37. Mean values (\pm St. Dev.) of the pressure ratio k_s and k_{φ} and the angle of internal friction φ of selected seeds

Materiał	Wilgotność [%]	ks	k_{arphi}	φ [deg]
Amarantus, Rawa	8	$0,62 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,02$	$21,3 \pm 0,8$
Gorczyca biała, Borowska	9	$0,43 \pm 0,01$	$0,64 \pm 0,01$	$24,7 \pm 0,4$
Groch, Piast	10	$0,53 \pm 0,01$	$0,59 \pm 0,01$	$27,3 \pm 0,6$
Gryka, Kora	10	$0,59 \pm 0,02$	$0,\!68 \pm 0,\!02$	$22,0 \pm 0,8$
Soczewica, Tina	8	$0,56 \pm 0,01$	$0,82 \pm 0,02$	$14,3 \pm 0,4$
Soja, Aldana	8	$0,37\pm0,02$	$0,55 \pm 0,01$	$30,1 \pm 0,9$

Tabela 38. Średnie wartości (±odch. st.) ilorazu naporu: k_s i k_{φ} oraz kąta tarcia wewnętrznego φ wybranych produktów spożywczych

Table 38. Mean values (\pm St. Dev.) of the pressure ratio k_s and k_{φ} and the angle of internal friction φ of selected food powders

Materiał	Wilgotność [%]	ks	k_{arphi}	φ [deg]
Mąka tortowa	12,7	$0,26 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,02$	$29,2 \pm 1,0$
Mąka krupczatka	13,4	$0,37 \pm 0,02$	$0,62\pm0,02$	$26,1 \pm 0,8$
Semolina	12,7	$0,38 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,02$	$32,4 \pm 1,0$
Kasza manna	13,6	$0,37 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,02$	$27,8 \pm 1,0$
Kasza jęczmienna	13,2	$0,36 \pm 0,02$	$0,55\pm0,02$	$30,0 \pm 1,0$
Płatki owsiane	11,0	$0,40 \pm 0,01$	$0,72\pm0,02$	$20,0 \pm 1,0$
Cukier puder	0,4	$0,31 \pm 0,02$	$0,52\pm0,02$	$31,7 \pm 1,0$
Cukier kryształ	0,4	$0,47 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,04$	$31,4 \pm 2,0$
Skrobia ziemniaczana	18,2	$0,47 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,02$	37,0 ± 1,0
Mleko w proszku	4,4	$0,40 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,03$	$34,3 \pm 1,5$
Mleko granulowane	7,9	$0,34 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,03$	$33,2 \pm 1,5$
Sól warzona	0,2	$0,31 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,03$	$32,8 \pm 1,5$
Śruta kukurydziana	11,7	$0,45 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,02$	$30,2 \pm 1,1$
Śruta sojowa	8,5	$0,53 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,03$	$32,2 \pm 1,6$

5.7. Moduł sprężystości i stała Poissona

Tabela 39. Średnie wartości (±odch. st.) modułu sprężystości E_m oraz stałej Poissona v ziarna zbóż o wilgotności w zakresie 10-20%

Table 39. Mean values (\pm St. Dev.) of the elasticity modulus E_m and the Poisson's ratio v of cereal grains at the moisture content of 10-20%

Matarial	Wilgotność	Moduł sprężystości	Stała Poissona
Ivialentai	[%]	E_m [MPa]	ν
	10	$22,4 \pm 4,6$	$0,22 \pm 0,01$
Damaniaa	12,5	$22,2 \pm 4,4$	$0,18 \pm 0,02$
Pszenica	15	$19,3 \pm 2,5$	$0,20 \pm 0,03$
Begra	17,5	$17,2 \pm 3,6$	$0,20 \pm 0,01$
	20	$11,1 \pm 1,1$	$0,19\pm0,01$
	10	$23,6 \pm 2,3$	$0,19 \pm 0,01$
7.4.	12,5	$20,9 \pm 1,2$	$0,20 \pm 0,01$
Zyto	15	$20,2 \pm 1,9$	$0,21 \pm 0,01$
Amilo	17,5	$20,0 \pm 1,8$	$0,21 \pm 0,01$
	20	$15,1 \pm 1,5$	$0,21 \pm 0,01$
	10	$14,2 \pm 1,6$	$0,19 \pm 0,01$
T	12,5	$14,0 \pm 1,8$	$0,16 \pm 0,01$
Jęczmien	15	$13,8 \pm 1,1$	$0,15 \pm 0,01$
Rudnik	17,5	$12,3 \pm 0,8$	$0,17 \pm 0,01$
	20	$10,4 \pm 2,4$	$0,19\pm0,01$
	10	$26,2 \pm 3,2$	$0,20 \pm 0,01$
Kulumdaa	12,5	$19,3 \pm 2,7$	$0,20 \pm 0,01$
Kukurydza	15	$15,9 \pm 0,9$	$0,20 \pm 0,02$
MIESZKO	17,5	$15,5 \pm 2,6$	$0,19 \pm 0,02$
	20	$12,3 \pm 1,4$	$0,20 \pm 0,02$
	10	$17,8 \pm 2,8$	$0,18 \pm 0,01$
Outin	12,5	$16,0 \pm 3,2$	$0,20 \pm 0,01$
Dwies	15	$13,2 \pm 3,1$	$0,17\pm0,01$
Borowiak	17,5	$10,7 \pm 2,4$	$0,17 \pm 0,01$
	20	$10,4 \pm 1,9$	$0,15 \pm 0,01$
	10	$20,4 \pm 2,6$	$0,20 \pm 0,02$
Denning	12,5	$18,5 \pm 1,6$	$0,22 \pm 0,01$
Fidelie	15	$18,4 \pm 1,4$	$0,20 \pm 0,01$
Fidello	17,5	$14,7 \pm 1,8$	$0,21 \pm 0,03$
	20	$9,2 \pm 0,9$	$0,21 \pm 0,01$

Tabela 40. Średnie wartości (±odch. st.) modułu sprężystości E_m oraz stałej Poissona v nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności w zakresie 6-16%

Table 40. Mean values (\pm St. Dev.) of the elasticity modulus E_m and the Poisson's ratio v of rape seeds variety Licosmos at the moisture content of 6-16%

Materiał	Wilgotność [%]	Moduł sprężystości <i>E_m</i> [MPa]	Stała Poissona V	
	6	9,0±0,6	$0,24 \pm 0,03$	
Rzepak	9	$8,7\pm0,8$	$0,17\pm0,02$	
Licosmos	12	$7,1 \pm 0,6$	$0,16\pm0,01$	
	16	$6,6 \pm 0,9$	$0,10 \pm 0,01$	

Tabela 41. Średnie wartości (\pm odch. st.) modułu sprężystości E_m oraz stałej Poissona ν nasion wybranych roślin uprawnych

Table 41. Mean values (\pm St. Dev.) of the elasticity modulus E_m and the Poisson's ratio v of selected seeds

Materiał	Wilgotność [%]	Moduł sprężystości <i>E_m</i> [MPa]	Stała Poissona V
Amarantus, Rawa	8	$30,8 \pm 1,8$	$0,27 \pm 0,02$
Gorczyca biała, Borowska	9	$13,1 \pm 0,5$	$0,24 \pm 0,01$
Groch, Piast	10	$16,8 \pm 2,1$	$0,26 \pm 0,03$
Gryka, Kora	10	$20,6 \pm 2,3$	$0,20 \pm 0,02$
Soczewica, Tina	8	$16,3 \pm 0,7$	$0,24 \pm 0,01$
Soja, Aldana	8	32,6 ± 1,4	$0,15 \pm 0,02$

Tabela 42. Średnie wartości (\pm odch. st.) modułu sprężystości E_m oraz stałej Poissona ν wybranych surowców spożywczych

Table 42. Mean	values (±St.	Dev.) of the	elasticity	modulus	E_m and	the Poisson	's ratio	v of se	elected
food powders									

Materiał	Wilgotność [%]	Moduł sprężystości <i>E_m</i> [MPa]	Stała Poissona v
Mąka tortowa	12,7	$18,5 \pm 0,7$	$0,16 \pm 0,01$
Mąka krupczatka	13,4	$16,5 \pm 1,5$	$0,19\pm0,02$
Semolina	12,7	$15,3 \pm 0,5$	$0,20\pm0,01$
Kasza manna	13,6	$18,9 \pm 0,5$	$0,21 \pm 0,01$
Kasza jęczmienna	13,2	$14,9 \pm 1,2$	$0,23 \pm 0,03$
Płatki owsiane	11,0	$7,7 \pm 1,2$	$0,23 \pm 0,01$
Cukier puder	0,4	$28,2 \pm 4,8$	$0,20 \pm 0,01$
Cukier kryształ	0,4	$30,8 \pm 1,6$	$0,21 \pm 0,01$
Skrobia ziemniaczana	18,2	$21,7 \pm 1,3$	$0,24 \pm 0,01$
Mleko w proszku	4,4	$22,1 \pm 1,1$	$0,18\pm0,01$
Mleko granulowane	7,9	$18,4 \pm 0,8$	$0,17\pm0,01$
Sól warzona	0,2	$31,9 \pm 2,3$	$0,23 \pm 0,04$
Śruta kukurydziana	11,7	$12,1 \pm 1,1$	$0,21 \pm 0,01$
Śruta sojowa	8,5	$10,0 \pm 2,1$	$0,26 \pm 0,02$

6. WNIOSKI

Niniejsze opracowanie jest próbą usystematyzowania i skatalogowania szeregu właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych istotnych w procesach składowania, przemieszczania i przetwarzania. Szczególna uwagę zwrócono na wpływ dwóch czynników: wilgotności - w przypadku ziarna zbóż oraz naporu konsolidacji - w przypadku proszków spożywczych. W badaniach zastosowano jednolitą metodykę pomiarów, dostosowaną do zaleceń aktualnych norm oraz do specyfiki badanych materiałów. Analiza wyników badań własnych oraz porównanie z wynikami badań innych autorów i wartościami parametrów materiałowych zalecanymi do stosowania przez aktualne normy pozwoliły sformułować następujące wnioski ogólne a także wnioski szczegółowe dotyczące poszczególnych grup materiałów:

- Charakterystyczną cechą materiałów sypkich pochodzenia roślinnego jest duża odkształcalność ziaren ośrodka oraz silna zależność właściwości fizycznych od wilgotności. W przypadku materiałów pochodzenia roślinnego wilgotność wnika do wnętrza ziaren, co prowadzić może również do jakościowej zmiany właściwości fizycznych.
- 2. Eksperymentalne metody wyznaczania parametrów fizycznych materiałów sypkich pochodzenia roślinnego powinny uwzględniać dużą odkształcalność ziaren oraz długą drogę dochodzenia do warunków ustalonego płynięcia.
- Poszerzenie zakresu przemieszczenia w metodzie bezpośredniego ścinania z zalecanych przez normę Eurocode 1 5% średnicy próbki do 10% pozwala na pomiar kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż w zakresie wilgotności do 20%, a rzepaku do 16%.
- 4. W przypadku materiałów proszkowych (o stosunku średnicy aparatu Jenikego do średnicy ziarna ośrodka rzędu 1000) istnieje możliwość stosowania zaproponowanej przez Mroza i in. [70] procedury wielokrotnego ścinania do wyznaczania parametrów plastycznego płynięcia. Procedura ta pozwala uzyskać wyniki podobne jak oryginalna procedura Jenikego przy znacznie mniejszej pracochłonności testu.
- 5. Gęstość złoża ziarna zbóż i nasion rzepaku określana zgodnie z zaleceniami normy Eurocode 1 przy naporze normalnym 100 kPa na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności w przeciwieństwie do gęstości utrzęsionej i usypnej, które zmieniają się w dużo bardziej ograniczonym zakresie. Spośród trzech wyznaczanych gęstości najniższą wartość ma gęstość usypna a najwyższą utrzęsiona.
- 6. Kąt tarcia o powierzchnie konstrukcyjne zależy od właściwości powierzchni trącej (rodzaj powierzchni, szorstkość), warunków tarcia (nacisk normalny, droga poślizgu, prędkość poślizgu), właściwości powierzchniowych ziaren materiału sypkiego (wilgotność, gatunek, odmiana, stan rozdrobnienia), udziału substancji pośredniczącej (kutyna) oraz warunków otoczenia. W przypadku wszystkich badanych materiałów sypkich współczynnik tarcia malał ze wzrostem nacisku normalnego. Zalecany przez normę Eurocode 1 umowny podział na współczynnik tarcia (służący do obliczania parcia materiału sypkiego) wyznaczany przy maksymalnej wartości naporu normalnego oraz kąt tarcia (służący do określenia warunków tarcia o powierzchnię leja wysypowego podczas wypływu) wyznaczany przy najniższym możliwym naporze normalnym znajduje pełne uzasadnienie w obserwowanym silnym wpływie naporu normalnego na wartość współczynnika tarcia.

- 7. Kąt tarcia wewnętrznego materiałów sypkich zależy od właściwości pojedynczych ziaren ośrodka oraz od struktury złoża materiału. W przypadku nasion roślin uprawnych czynnikami modyfikującymi właściwości ziaren są: wilgotność, gatunek, odmiana, stan dojrzałości oraz warunki uprawy. Czynnikami modyfikującymi gęstość upakowania oraz strukturę wzajemnego ułożenia ziaren są: sposób formowania złoża materiału, wilgotność, ciśnienie oraz czas składowania. Kąt tarcia wewnętrznego wzrasta ze wzrostem wilgotności nasion.
- 8. W przypadku testów bezpośredniego ścinania wykonywanych na takich materiałach, jak: mleko w proszku, mleko granulowane czy skrobia ziemniaczana obserwowano silne wibracje naprężenia stycznego. Amplituda drgań stanowiła 30 do 45% maksymalnej wartości naprężenia stycznego i była wprost proporcjonalna do naprężenia normalnego, a częstość drgań malała ze wzrostem naprężenia. Jako przyczynę drgań wskazuje się dylatację i wzmocnienie materiału występujące naprzemian w chwilowych obszarach warstwy ścinania podczas powolnej deformacji materiału.
- 9. Powszechnie przyjętą miarą sypkości materiału jest zaproponowana przez Jenikego funkcja płynięcia. Sypkość materiału zależy m.in. od wielkości ziaren ośrodka. Materiały o wymiarze ziarna rzędu kilku mm powszechnie uznaje się za bezkohezyjne swobodnie płynące (i < 0,1). W miarę zmniejszania wymiaru ziarna materiał staje się coraz bardziej kohezyjny stawiający opory podczas przepływu. W przypadku mąki, cukru pudru bądź mleka w proszku indeks płynięcia *i* wynosi około 0,2.
- 10. Iloraz naporu, podobnie jak kąt tarcia wewnętrznego, zależy od właściwości pojedynczych ziaren ośrodka (właściwości powierzchniowe, kształt, spreżystość) oraz gestości i struktury upakowania złoża materiału, a ponadto od stanu naprężenia i historii obciążenia wpływających na stan mobilizacji sił tarcia wewnetrznego i zewnetrznego. Ze wzrostem wilgotności ziarna rosna siły tarcia oraz spójności, co w konsekwencji powoduje spadek ilorazu naporu. Wartości ilorazu naporu wyznaczone na podstawie zalecanej przez normę Eurocode 1 zależności empirycznej są istotnie większe od eksperymentalnych i odpowiadają przypadkowi uplastycznienia przy szorstkiej ścianie w czynnym stanie naprężenia. Wartości ilorazu naporu zalecane do używania przez normę PN-B-03254 pomiędzy wartościami eksperymentalnymi zawieraia sie i wyznaczonymi na podstawie kąta tarcia wewnętrznego.

11. Moduł sprężystości złoża ziarna zbóż wyznaczany w teście jednoosiowego ściskania przy naporze normalnym 100 kPa maleje od około 20 MPa do około 10 MPa przy wzroście wilgotności ziarna w zakresie 10-20%, natomiast stała Poissona zmienia się w bardzo ograniczonym zakresie i przyjmuje wartości w zakresie od 0,15 do 0,22. W przypadku nasion rzepaku moduł maleje od 9 MPa do 6 MPa przy wzroście wilgotności od 6 do 16%, zaś stała Poissona przyjmuje podobne wartości jak w przypadku ziarna zbóż.

7. PIŚMIENNICTWO

- 1. ASAE Standards, D241.4: Density, specific gravity, and mass-moisture relationships of grain for storage. St. Joseph, MI, ASAE, 1999.
- 2. ASAE Standards, EP433: Loads exerted by free-flowing grain on bins. St. Joseph, MI, ASAE, 1999.
- Atewologun A.O., Riskowski G.L.: Experimental determination of Janssen's stress ratio by four methods for soybeans under static conditions. Trans. of the ASAE, 34(5), 2193-2197, 1991.
- Balassy Z., Bochyński W., Horabik J., Molenda M.: Triaxial and direct shear tests on mass of seeds of wheat. Proceedings of the 4th International Conference "Physical properties of Agricultural Materials", 31-36, Rostock, 1989.
- 5. **Birks A.H.:** The definition of two extreme types of bulk solids and their effect of stress distribution in the vertical section of silos. Powder Handling and Processing, 3(2), 141-146, 1991.
- Blight G.E.: Silo wall friction and wall roughness. Powder Handling and Processing, 2(3), 235-238, 1990.
- Blight G.E.: Effect of moisture on properties of grain stored in silos. Bulk Solids Handling, 15(2), 209-213, 1995.
- 8. Britton M.G., Moysey E.B.: Grain properties in the proposed new engineering practice on bin loads. ASAE Paper No. 86-4502, St. Joseph, MI, 1986.
- 9. Brubaker J.E., Pos J.: Determining static coefficients of friction of grain on structural surfaces. Trans. of the ASAE, 8(1), 53-55, 1965.
- Brusewitz G.H.: Density of rewetted high moisture grains. Transactions of the ASAE, 18(5), 935-938, 1975.
- 11. Byszewski i in. (pod redakcją): Waźniejsze właściwości roślin wiążące się z pracą maszyn rolniczych. PWN, Warszawa 1975.
- Chang S.C., Converse H.H., Martin C.R.: Bulk properties of grain as affected by selfpropelled rotational type grain spreaders. Trans. of the ASAE, 26(5), 1543-1550, 1983.
- 13. DIN 66145: Darstellung von Korn-(Teilchen-) grössenvertellungen. 1976.
- Dobrzański B., Horabik J., Molenda M.: Vibratory method for bulk density estimation. Powder Handling Processing, 6(1), 67-70, 1994.
- Drescher A.: Analytical methods in bin-load analysis. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokio 1991.

- Dyduch M., Kamiński M., Łapko A., Runkiewicz L.: Nowelizacja normy PN-89/B-03262 "Żelbetowe zbiorniki na materiały sypkie i kiszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie". XI Konferencja "Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze", 65-69, Świeradów Zdrój, 2000.
- Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4. Actions in silos and tanks. DD ENV 1991-4, 1996.
- Frontczak J., Metzger T.: Określenie zależności współczynnika tarcia wewnętrznego od modułu Younga ziarna kukurydzy o różnej wilgotności. ZPPNR, z. 320, 81-88, 1987.
- Frontczak J., Metzger T.: Określenie kąta usypu ziarna wybranych eksperymentalnych mieszań-ców kukurydzy. ZPPNR, z. 320, 89-95, 1987.
- 20. Grochowicz J.: Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion. PWRiL, Warszawa 1971.
- 21. Grzesiuk S., Kulka K.: Fizjologia i biochemia nasion. PWRiL, Warszawa 1981.
- Gu Z.H., Arnold P.C., McLean A.G.: Consolidation related density and permeability models for bulk solids. Powder Technology, 72, 39-44, 1992.
- Hill J.M. and Wu Y.-H.: Plastic flows of granular materials of shear index n-II. Plane and axially symmetric problems for n=2. J. Mech. Phys. Solids, 41(1), 95-115, 1993.
- 24. **Hesse, T., Hoffmann O.H.:** Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 27(6), 205-213, 1977.
- Hoffmann O.-H.: Neuere grundlagen der mechanik körniger Haufwerke. Grundl. der Landtechnik, 25(2), 48-59, 1975.
- 26. Hong G-H., Watanabe K.: Powder bed tester. An instrument for measuring the powder yield locus. Powder Handling and Processing, 2(2), 137-143, 1990.
- Horabik J., Molenda M.: Force and contact area of wheat grain in friction. J. Agric. Eng. Res., 41(1), 33-42, 1988.
- 28. Horabik J., Molenda M.: Effects of moisture content on friction of wheat grain at a single contact area. Powder Handling and Processing, 1,(3), 277-279, 1989.
- Horabik J., Molenda M.: Opory tarcia i naprężenia w strefie kontaktu ziarniaka pszenicy z płaską powierzchnią. *Annales* UMCS, 163-176, 1991/1992.
- Horabik J. Molenda M.: Wyznaczanie ilorazu poziomego do pionowego naporu w cylindrycznej warstwie ośrodka sypkiego. Materiały X SZKOŁY "Fizyka z elementami agrofizyki", 145-146, Lublin, 1998.
- Horabik J., Grochowicz M.: Wyznaczanie parametrów plastycznego płynięcia sypkich surowców spożywczych. Acta Agrophysica, 37, 29-38, 2000.
- 32. Horabik J.: Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania. *Acta Agrophysica*, 54, 2001.
- Horabik J., Rusinek R.: Pressure ratio of cereal grains determined in uniaxial compression test. International Agrophysics, 16(1), 23-28, 2002.
- 34. Jankowski S.: Surowce mączne i kaszowe. Ziarno zbóż, gryki i grochu. WNT, Warszawa 1988.
- 35. Jurga R.: Przetwórstwo zbóż. Cz. 1, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1994.
- Ibrahim R.A.: Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos. Part I: Mechanics and friction. Applied Mechanics Review, 47(7), 209-226, 1994.

- 37. Jenike A.W.: Storage and flow of solids. Bull. 123, Eng. Expt. Sta., Utah State Univ., 1964.
- Jofriet J.C., Negi S.: Indirect testing of friction using model farm silos. Canadian Agricultural Engineering, 25(1), 89-93, 1983.
- Kalman H., Goder D., Grant E.: Flowability and caking as a result of various processes. XI Konfe-rencja ,,Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze", 9-16, Świeradów Zdrój, 2000.
- Kamiński M., Zubrzycki M.: Żelbetowe silosy na zboże. Badania i projektowanie. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 41, Wrocław 1985.
- 41. Kezdi A.: Handbook of soil mechanics. Akademia Kiado, Budapest, 1974.
- Kobielak S.: Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach. Prace Nauk. Inst. Bud. PWr., nr 59, Wrocław 1990.
- Kutzbach H.D., Scherer R.: Das Reibverhalten von Kornerfruchten Eine Schriftumsubesicht. Grungl. der Landtechnik, 6, 213-219, 1977.
- Kuipers H., Kroesbergen B.: The significance of moisture content, pore space, method of sample preparation and type of shear annulus used on laboratory torsional shear testing of soils. Journal of Terramechanics, 3(4), 17-28, 1966.
- 45. 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.
- Kwade A., Schulze D., Schwedes J.: Determination of the stress ratio in uniaxial compression test - Part 2. Powder Handling and Processing, 6(2), 199-203, 1994.
- Lancelot L., Shahrour I.: Mechanical behaviour of a chemical powder at low stress levels. Influence of Temperature and Humidity. Powder Handling and Processing, 6(3), 303-308, 1994.
- Laskowski J., Skonecki S.: Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of cereal grains. International Agrophysics, 13(4), 477-486, 1999.
- 49. Laskowski J., Skonecki S.: Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego pszenicy o różnej wilgotności i stopniu rozdrobnienia. Acta Agrophysica, 46, 95-104, 2001.
- 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.
- Lawton P.J.: Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials. J. Agric. Eng. Res., 25(1), 75-86, 1980.
- 52. Lityński M.: Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN, Warszawa 1982.
- Lohnes R.A.: Lateral stress ratios for particulate materials. Powder Handling and Processig, 5(4), 331-335, 1993.
- Lapko A.: Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, nr 71, Białystok 1989.
- Lapko A., Prusiel J.A.: Investigation on thermal effects in reinforced concrete cylindrical silo structures.Proc. of the 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. Vol. 1, 4.25-4.30, 2000.
- Łukaszuk J., Horabik J.: Wyznaczanie kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich. Acta Agrophysica, 65, 1-94, 2002.

- 57. Manbeck H.B., Nelson G.L.: Methods and instrumentation for evaluating stress strain behavior of wheat en masse. Trans. of the ASAE, 15(5), 919-923, 1972.
- McLean A.G.: Empirical description of wall friction angle variations. Powder Handling and Processing, 1(2), 151-156, 1989.
- 59. Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.: Tarcie ziarna pszenicy. Acta Agrophysica, 4, 1995.
- Molenda M., Horabik J., Ross I.J.: Loads in model grain bins as affected by filling methods. Trans. of the ASAE, 36(3), 915-919, 1993.
- Molenda M., Horabik J., Ross I.J.: Wear-in effects on loads and flow in a smooth-wall bin. Trans. of the ASAE, 39(1), 225-231, 1996.
- Molenda M., Horabik J., Ross I.J.: Effect of filling method on load distribution in model grain bins. Trans. of the ASAE, 39(1), 219-224, 1996.
- Molenda M., J. Horabik, Ross I.J.: Stress and deformation of wheat in direct shear test. International Agrophysics, 12(2), 115-118, 1998.
- Molenda M., Horabik J.: Lateral to vertical pressure ratio in a model grain silo. Proceedings of the Seminar "Operations on granular materials", Lublin 28.05.1998, 31-39.
- 65. Molenda M., Stasiak M.: Determination of elastic constants of cereal grain in uniaxial compression. International Agrophysics, 16(1), 61-65, 2002.
- 66. Molenda M., Thompson S.A., Ross I.J.: Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces. J. agric. Engng Res., 77(2), 209-219, 2000.
- 67. Molerus O.: Theory of yield of cohesive powders. Powder Technology, 12, 259-275, 1975.
- Morland L.W., Sawicki A., Milne P.C.: Uni-axial compaction of a granular material. J. Mech. Phys. Solids, 41(11), 1755-1779, 1993.
- Moysey E.B.: The effect of grain spreaders on grain friction and bin wall pressures. J. Agric. Engng. Res., 30, 149-156, 1984.
- Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.: Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT, 54, 1973.
- Nelson S.O.: Moisture-dependent kernel-and bulk-density relationships for wheat and corn. Transactions of the ASAE 23(1), 139-143, 1980.
- 72. **Peschl I.A.S.Z.:** Equipment for the measurement of mechanical properties of bulk materials. Powder Handling and Processing, 1(1), 73-81, 1989.
- Peschl I.A.S.Z.: Measurement and evaluation of mechanical properties of powders. Powder Handling and Processing, 1(2), 135-141, 1989.
- 74. Polska Norma PN-70/R-74010: Ziarno zbóż i nasiona strączkowe jadalne. Pobieranie próbek.
- 75. Polska Norma PN-73/R-74007: Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości.
- Polska Norma PN-74/Z-04002: Ochrona czystości powietrza. Badania fizycznych własności pyłów. 01. Oznaczanie bezwzględnej gęstości pyłów. 02. Oznaczanie gęstości pozornych oraz statycznych porowatości warstwy pyłu. 07. Oznaczanie kąta nasypu pyłu. 08. Oznaczanie kąta zsypu pyłu.
- 77. Polska Norma PN-B-03254-2002: Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

- Polska Norma PN-91/A-74010: Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczanie wilgotności (rutynowa metoda odwoławcza).
- 79. Procter D.C., Barton R.R.: Measurements of the angle of interparticle friction. Geotechnique, 24(4), 581-604. 1974.
- Praca zbiorowa: Magazynowanie ziarna zbóż, nasion strączkowych i oleistych. WNT, Warszawa 1975.
- Rademacher F.J.C., Haaker G.: Possible deviations in the determination of bulk-solid characteristics caused by the loading mechanism of the Jenike shear cell. VDI Forschungsheft, 629, 1-32, 1985.
- 82. **Reimbert M., Reimbert A.:** Determination of the mechanical properties of cohesive and non-cohesive powdered materials. Buld Solids Handing, 1(1), 37-41, 1981.
- Saul R.A.: Measurement of grain pressures on bin walls and floors. Agricultural Engineering, 34(4), 1953, 231-234.
- 84. Sawicki A., Świdziński W.: Cyclic compaction of soils, grains and powders. Powder Technology, 85, 97-104, 1995.
- Scherer R. Kutzbach H.D.: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grundl. der Landtechnik, 28(1), 6-12, 1978.
- 86. Schulze D.: Flowability and time consolidation measurements using a ring shear tester. Powder Handling and Processing, 8(3), 221-226, 1996.
- 87. Schwedes J.: Fließverhalten von Shüttgütern in Bunkeren. Verlag Chemie, 1970.
- Schwedes J.: Shearing behaviour of slightly compressed cohesive granular materials. Powder Technology, 11, 59-67, 1975.
- Schwedes J.: Evolution of bulk solids technology since 1974. Bulk Solids Handling, 3(1), 143-147, 1983.
- Schwedes J.: Flow properties of bulk solids and their use in solving industrial problems. XI Konferencja "Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze", 25-39, Świeradów Zdrój, 2000.
- 91. Snyder L.H., Roller W.L., Hall G.E.: Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Trans. of the ASAE, 10(3), 411-419, 1967.
- 92. Stephens L.E., Foster G.H.: Grain bulk properties as affected by mechanical grain spreaders. Trans. of the ASAE, 19(2), 354-358, 1976.
- 93. Stewart B.R., Hossain Q.A., Kunze O.R.: Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces. Trans. of the ASAE, 12(4), 415-418, 1969.
- Ślaska-Grzywna B.: Metoda wyznaczania granicznych wartości zagęszczenia materiałów sypkich. Praca doktorska. Akademia Rolnicza w Lublinie, 1995.
- Ślipek Z. Kaczorowski J., Frączek J: Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR, Kraków, 1999.
- Tejchman J., Niedostatkiewicz M.: Napór materiałów sypkich na ściany podczas quasistatycznego przepływu w silosach. XI Konferencja "Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze", 209-219, Świeradów Zdrój, 2000.

- Teunou E., Vasseur J. Krawczyk M.: Measurement and interpretation of bulk solids angle of repose for industrial process design. Powder Handling and Processing, 7(3), 219-227, 1995.
- Teunou E., Vasseur J.: Time flow function: means to estimate water effect on dissoluble bulk materials flow. Powder Handling and Processing, 8(2), 111-116, 1996.
- Thompson S.A., Ross I.J.: Compressibility and frictional coefficient of wheat. Trans. of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.
- 100. Thompson S.A., Bucklin R.A., Batich C.D., Ross I.J.: Variation in the apparent coefficient of friction of wheat on galvanized steel. Trans. of the ASAE, 31(5), 1518-1524, 1988.
- 101. Tomczyk S.: Magazyny ziarna i innych nasion. PWRiL, Warszawa 1970.
- Versavel P.A., Britton M.G.: In-bin bulk density of grain. Paper No. 84-4004, ASAE, St. Joseph, MI, 1984.
- 103. Wilms H.: Criteria for evaluation of silo design codes. Bulk Solids Handling, 11(1), 55-61, 1991.
- 104. Woźniak W.: Wpływ czynników agrofizycznych na zmienność porowatości masy ziarna zbóż. ZPPNR, z. 316, 257-278, 1987.
- 105. Zenkow R.L.: Mechanika nasypnych gruzow. Izdatielstwo Maszinostrojenie. Moskwa 1964.
- 106. Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.: Model for frictional behavior of wheat on structural materials. Trans. of the ASAE, 31(3), 898-903, 1988.
- 107. Zhang, Q., Britton M.G. and Jaremek R.: Discharge loads in smooth and corrugated walled model bins for wheat, barley and canola. ASAE Paper No. 914063. St. Joseph, MI, 1991.
- 108. Zhang J., Kushwaha R.L.: Effect of relative humidity and temperature on grain-metal friction. ASAE Paper No. 91-6051. St. Joseph, MI, 1991.

8. STRESZCZENIE

Praca składa się z czterech części: 1) omówienia wpływu najważniejszych czynników na podstawowe właściwości fizyczne materiałów sypkich pochodzenia biologicznego, 2) przeglądu eksperymentalnych metod wyznaczania właściwości fizycznych materiałów sypkich, 3) opisu zastosowanych metod pomiarowych, 4) katalogu właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych o szerokim zakresie rozdrobnienia materiału: od ziarna zbóż i nasion roślin uprawnych do mąki i cukru. Katalog zawiera takie właściwości fizyczne, jak: cechy geometryczne, porowatość, gęstość, współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne, kąt tarcia o materiały konstrukcyjne, kąt tarcia i o materiały konstrukcyjne, kąt tarcia i stałą Poissona. W przypadku ziarna zbóż uwzględniono wpływ wilgotności, zaś w przypadku proszków spożywczych wpływ naprężenia konsolidacji.

Słowa kluczowe: materiały sypkie, proszki spożywcze, właściwości fizyczne.

9. SUMMARY

PHYSICAL PROPERTIES OF GRANULAR FOOD MATERIALS DRAFT OF CATALOGUE

The paper consists of four parts: 1) description of the influence of the most important parameters on the basic mechanical properties of granular solids of biological origin, 2) review of the experimental methods of determination of the physical properties, 3) description of the applied methods, and 4) catalogue of the physical properties of food powders and granular materials of a wide range of grain size: from cereal grains to flour and sugar. The catalogue contains following properties of granular solids: geometrical parameters, the porosity, the bulk density, the coefficient and the angle of wall friction, the angle of natural repose, the angle of internal friction, the cohesion, the flow index, the lateral to vertical pressure ratio, the modulus of elasticity and the Poisson's ratio. In the case of cereal grains the influence of the moisture content was considered and in the case of food powders the influence of the consolidation pressure.

Keywords: granular materials, food powders, mechanical properties.

Adresy Autorów:

Józef Horabik Marek Molenda Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polska Akademia Nauk ul. Doświadczalna 4 P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27 tel. (0-81) 74-450-61, fax (0-81) 74-450-67 e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl mmolenda@demeter.ipan.lublin.pl