

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZŁOŻA NASION RZEPAKU WYZNACZANE W TEŚCIE JEDNOOSIOWEGO ŚCISKANIA¹

M. Stasiak, M. Molenda, R. Rusinek, J. Horabik

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

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

Streszczenie: Badano mechaniczne właściwości złoża nasion rzepaku o czterech poziomach wilgotności (6, 9, 12 i 15%). Gęstość usypną i iloraz naporu złoża wyznaczano metodami zalecanymi przez nową normę Eurocode 1. Szczegółowo analizowano deformację ośrodka w cyklu obciążenie – odciążenie w warunkach jednoosiowego ściskania. Zależność naprężenie – odkształcenie opisano modelem sprężysto – plastycznym sformulowanym przez Sawickiego [11]. Z liniowej części fazy odciążania wyznaczano moduł sprężystości i współczynnik Poissona ośrodka. Stwierdzono, że przyjęty model poprawnie opisuje badany proces a wyznaczone właściwości złoża oraz parametry modelu zależą od wilgotności nasion.

Słowa kluczowe: nasiona rzepaku, iloraz naporu, gęstość usypna, jednoosiowe ściskanie, model mechaniczny.

WSTĘP

Produkcja nasion rzepaku w Polsce, z arealem wynoszącym ok. 500 tys. ha, klasyfikuje nasz kraj na czołowej pozycji w Europie i na świecie [16]. Nasiona rzepaku jako surowiec mają niekwestionowane znaczenie przemysłowe i ekonomiczne ponieważ są podstawowym źródłem oleju jadalnego. Dlatego też bezpieczne przechowywanie i efektywne przetwarzanie tych nasion zyskuje na znaczeniu praktycznym. Niezbędną staje się pełna wiedza na temat zachowania

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

się złoza nasion w czasie zabiegów technologicznych. Nadmierne obciążenia mechaniczne mogą powodować uszkodzenia nasion. W uszkodzonych nasionach zwiększa się aktywność drobnoustrojów, co prowadzi do obniżenia jakości a nawet do zniszczenia surowca [14].

Nasiona rzepaku mają kształt zbliżony do kuli o średnicy 1,5-3 mm i składają się z zewnętrznej okrywy nasiennej, pod którą znajdują się resztki bielma, oraz wnętrza nasienia wypełnionego przez duży zarodek o dwóch nierównomiernych liścieniach, z których zewnętrzny prawie całkowicie obejmuje wewnętrzny [5]. Złoże nasion rzepaku jest materiałem sypkim, którego cechy mechaniczne znacznie odbiegają od własności ciała stałego jak i cieczy. O jego zachowaniu decydują przede wszystkim: sieć geometryczna kontaktów, oddziaływania cierne w punktach kontaktu oraz właściwości pojedynczych nasion. Właściwości mechaniczne złoza nasion rzepaku w przeciwieństwie do materiałów granularnych pochodzenia mineralnego determinuje wilgotność, która wpływa na właściwości okrywy nasiennej i liścieni.

Aktualnie standaryzacja obejmuje coraz więcej metod wyznaczania właściwości materiałów sypkich. Normy Eurocode 1 [4] i modyfikowana obecnie polska norma [9] zalecają wyznaczać doświadczalnie parametry mechaniczne materiałów sypkich w ściśle określonych warunkach odpowiadających obciążeniom eksploatacyjnym. Niektóre z nich wyznaczone są w teście ścinania (w aparacie bezpośredniego ścinania lub w aparacie trójosiowego ściskania), inne zaś w teście jednoosiowego ściskania [8]. W teście jednoosiowego ściskania można wyznaczyć iloraz naporu, gęstość oraz parametry opisujące sprężystą i plastyczną deformację materiału. Moduł sprężystości E oraz współczynnik Poissona ν są podstawowymi parametrami charakteryzującymi sprężystą reakcję materiału na obciążenie.

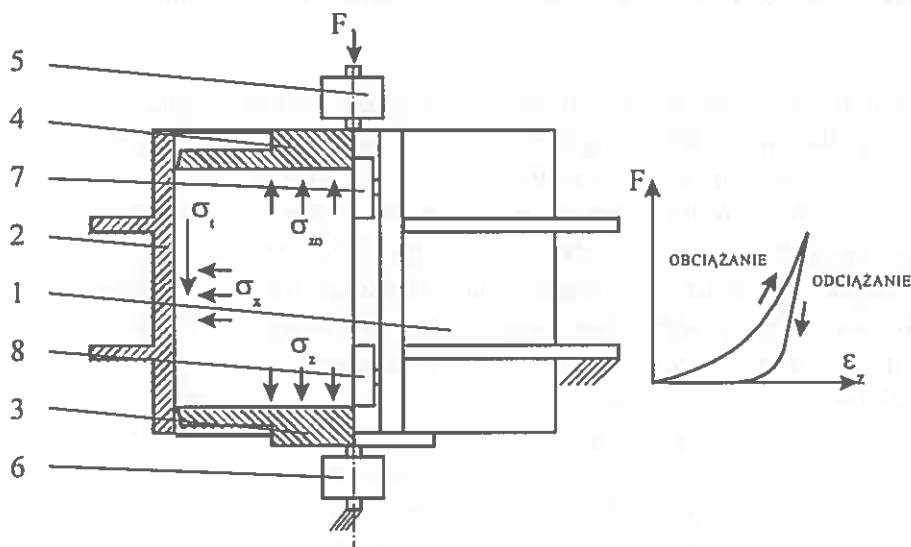
Celem badań było określenie wpływu wilgotności na iloraz naporu, gęstość, moduł sprężystości i współczynnik Poissona złoza nasion rzepaku.

APARATURA I METODA POMIAROWA

Parametry mechaniczne złoza nasion rzepaku wyznaczano na specjalnie do tego skonstruowanym stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rysunku 1 [6]. Ściana boczna cylindrycznej komory jednoosiowego ściskania o wysokości 0,17 m i średnicy 0,21 m składała się z dwóch identycznych części (1) i (2) złączonych ze sobą wzdłuż tworzącej walca przy pomocy czterech czujników siły (7) i (8) o zakresie pomiarowym 5 kN. Dno (3) i pokrywa górna komory pomia-

rowej (4) przenosiły napór pionowy poprzez czujniki siły (5) i (6) o zakresie pomiarowym 20 kN. Konstrukcja pokrywy górnej umożliwiała obciążenie próbki materiału za pośrednictwem maszyny wytrzymałościowej.

W przypadku wyznaczania ilorazu naporu i gęstości zgodnie z zaleceniami normy Eurocode 1 wewnętrzna powierzchnia ściany bocznej była gładka natomiast dno i pokrywa górna szorstkie (pokryte papierem ściernym o ziarnistości 50).



Rys. 1. Aparat jednoosiowego ściskania.

Fig. 1. Uniaxial compression test.

Tak skonstruowana aparatura pomiarowa umożliwiała wyznaczenie średniego naporu poziomego na ścianę zbiornika - σ_x , średniego naporu normalnego na dno - σ_z oraz średniego naporu normalnego na górną powierzchnię ośrodka - σ_{z0} (Rys.1). Komorę pomiarową napełniano nasionami bez zawibrowania i przykładania innych sił zagęszczających. W przypadku wyznaczania ilorazu naporu w celu uzyskania powtarzalnej struktury upakowania komorę pomiarową napełniano według stałej procedury poprzez lej zasypowy o średnicy wylotu 20 mm ulokowany centrycznie nad swobodną powierzchnią złoża nasion. Gęstość wyznaczano dla dwóch sposobów napełniania komory pomiarowej: poprzez zasypywanie centryczne i dużymi porcjami bezpośrednio z zasobnika. Warstwa nasion miała wysokość 80 mm ($H/D = 0,38$). Materiał zagęszczano ze stałą prędkością przemieszczenia pokrywy górnej $v = 0,35$ mm/min do momentu uzyskania

pionowego naporu $\sigma_{zo} = 100$ kPa. Przy tej wartości obciążenia obracano trzykrotnie pokrywę górną komory w prawo i lewo o kąt 10° w celu dodatkowego zagęszczenia materiału. Następnie materiał ponownie dociążano do wartości naporu $\sigma_{zo} = 100$ kPa.

Ilorazu naporu k_s dla warunków napełniania i magazynowania wyznaczano na podstawie współczynnika kierunkowego k_{so} stycznej do przebiegu zależności $\sigma_z(\sigma_{z,i})$, gdzie $\sigma_{z,i} = (\sigma_z + \sigma_{zo})/2$, przy wartości naporu pionowego $\sigma_{zo} = 100$ kPa, po wcześniejszym dodatkowym zagęszczeniu materiału, w oparciu o zależność:

$$k_s = 1, 1/k_{so}. \quad (1)$$

Parametry sprężystości i plastyczności złoża nasion wyznaczano według analogicznej procedury jak gęstość i iloraz naporu. Zbiornik aparatu jednoosiowego ściskania zasypywano bezpośrednio z zasobnika. Procedura eksperymentu nie obejmowała dodatkowego zagęszczania poprzez standardowe obroty pokrywę górną i składała się tylko z dwóch faz: obciążania i odciążania.

Moduł sprężystości i współczynnik Poissona rzepaku wyznaczano na podstawie modelu zaproponowanego przez Sawickiego [11] dla materiałów sypkich pochodzenia mineralnego. W teście wyróżnia się dwie fazy: obciążanie i odciążanie (Rys.1). W pierwszej fazie występują równocześnie odwracalne (sprężyste) i nieodwracalne (plastyczne) odkształcenia próbki. W trakcie odciążania można wyróżnić dwie części. W początkowym stadium występuje reakcja liniowa, charakterystyczna dla deformacji sprężystej. Faza ta pozwala na precyzyjne wyznaczenie stałych sprężystości: modułu sprężystości E i współczynnika Poissona ν . Druga – nieliniowa faza odciążania to sprężyste i plastyczne rozluźnienie materiału.

W fazie obciążania na całkowite odkształcenie ε_z składają się: część plastyczna ε_z^p i sprężysta ε_z^s :

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^p + \varepsilon_z^s, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = D_1 \ln\left(1 + D_2(\sigma_{zo})^a\right) + \frac{\sigma_{zo}}{E} \left(1 - \frac{2\nu^{*2}}{1 - \nu^*}\right), \quad (3)$$

gdzie:

ε_z - odkształcenie względne,

ε_z^p - składowa plastyczna odkształcenia,

ε_z^s - składowa sprężysta odkształcenia,

σ_{zo} - naprężenie wywierane na górną powierzchnię złoża ziarna,

E - moduł sprężystości,

ν^* - odpowiednik współczynnika Poissona dla fazy obciążania

$$\nu^* = K_0 / (1 + K_0),$$

K_0 - współczynnik kierunkowy liniowej zależności $\sigma_x = K_0 \sigma_{z_0}$,

D_1, D_2, α - parametry modelu wyznaczone eksperymentalnie.

Stała K_0 , na podstawie której wyliczany jest odpowiednik współczynnika Poissona ν^* , przedstawia stosunek naprężenia poziomego σ_x do pionowego σ_{z_0} podczas procesu zagęszczania złoża. W procesie tym odkształcenie poziome będące sumą odkształcenia sprężystego i plastycznego równe jest zeru ($\varepsilon_x = \varepsilon_x^s + \varepsilon_x^p = 0$).

W pierwszej fazie odciążania występuje jedynie liniowa deformacja sprężysta:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^s, \quad \varepsilon_x = \varepsilon_x^s = \varepsilon_x^p = 0, \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_{z_0}}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right), \quad (5)$$

gdzie:

ν - współczynnik Poissona oblicza się ze stosunku naprężenia poziomego σ_x do pionowego σ_{z_0} podczas odciążania złoża.

Druga – nieliniowa faza odciążania rozpoczyna się, gdy naprężenie pionowe zmaleje poniżej poziomego na tyle, że osiągnięty zostanie graniczny stan naprężenia. Odkształceniom sprężystym zaczynają towarzyszyć wtedy również odkształcenia plastyczne. Sawicki [11] przyjął, że w tej fazie odciążania materiału przyrosty naprężenia pionowego i poziomego są sobie równe $d\sigma_x = d\sigma_{z_0}$. Oznacza to, że dewiator naprężenia pozostaje stały. W fazie tej deformacja opisana jest zależnością:

$$\varepsilon_z = D_3 \ln \left(1 + D_4 (\sigma_{z_0})^\beta \right) + D_5 \sigma_{z_0}, \quad (6)$$

gdzie:

D_3, D_4, β - parametry opisujące plastyczność,

D_5 - parametr opisujący sprężystość złoża.

W celu wyznaczenia stałych sprężystości przeprowadzono estymację liniowej fazy odciążania. Współczynnik Poissona wyznaczano na podstawie współczynnika kierunkowego A liniowej zależności naprężenia poziomego σ_x od naprężenia pionowego σ_{z_0} :

$$\nu = \frac{A}{1+A}, \quad (7)$$

a następnie na podstawie liniowej estymacji zależności $\varepsilon_z(\sigma_{zn})$ (równanie 5) otrzymano wartość modułu sprężystości E .

W następnym etapie moduł sprężystości E wykorzystano do estymacji parametrów modelu sprężysto – plastycznego dla fazy obciążania (równanie 3).

Pomiary przeprowadzono dla nasion rzepaku odmiany *Licosmos* o czterech poziomach wilgotności: 6, 9, 12 i 15%. Każdy pomiar wykonano w trzech powtórzeniach.

WYNIKI

Gęstość

Gęstość złoza rzepaku wyznaczoną według zaleceń normy Eurocode 1 w warunkach jednoosiowego ściskania przy wartości obciążenia zalecanej do określenia parametrów mechanicznych ośrodka sypkiego porównano z gęstością usypną [10] i utrzęśioną [2] (Tab.1).

Spśród wyznaczanych gęstości najniższe wartości miała gęstość usypna [15]. Gęstość ta zmieniała się nieznacznie z wilgotnością nasion. Stosunek gęstości utrzęśionej do gęstości usypnej dla całego zakresu wilgotności był w przybliżeniu stały i wynosił $1,16 \pm 0,01$. Początkowa gęstość złoza po zasypaniu komory aparatu jednoosiowego ściskania była również w przybliżeniu stała dla całego zakresu wilgotności i wynosiła w przypadku centrycznego napełniania 625 kg/m^3 , a dla napełniania zasobnikiem 694 kg/m^3 . W przeciwieństwie do gęstości usypnej i utrzęśionej, gęstość uzyskana w wyniku zagęszczeniu złoza nasion zgodnie z procedurą zalecaną przez Eurocode 1 rosła ze wzrostem wilgotności od 658 do 734 kg/m^3 dla napełniania centrycznego i od 712 do 800 kg/m^3 dla napełniania zasobnikiem przy wzroście wilgotności od 6 do 15%.

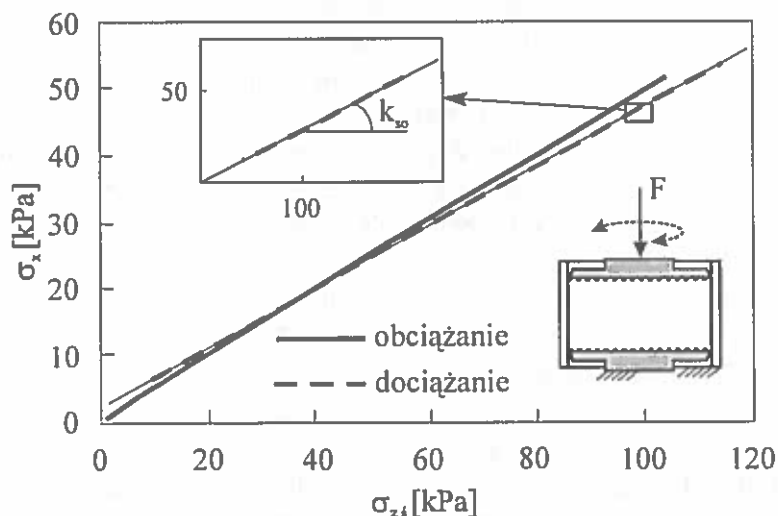
Porównanie trzech gęstości wskazuje, że proponowane w literaturze metody szacowania gęstości złoza nasion w silosie na podstawie gęstości usypnej pomnożonej przez współczynnik korekcyjny (około 1,06) nie obejmują zmiany odkształcalności złoza ze zmianą wilgotności [1]. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest propozycja normy Eurocode 1 bezpośredniego wyznaczania gęstości złoza dla konkretnych realizacji praktycznych. W metodzie tej należy wziąć pod uwagę również wpływ sposobu napełniania komory pomiarowej na początkową gęstość i strukturę opakowania.

Tabela 1. Gęstość i iloraz naporu dla nasion rzepaku
Table 1. Bulk density and pressure ratio for rape seeds

Wilgotność [%]	Gęstość usypna [kg/m ³]	Gęstość wg Eurocode 1 [kg/m ³]		Gęstość utrżciona [kg/m ³]	Iloraz naporu wg normy Eurocode 1: $k_s=1,1k_{s0}$
		Zасыpywanie centryczne	Zасыpywanie zasobnikiem		
6	645 ± 5	658 ± 10	712 ± 5	756 ± 4	0,46 ± 0,02
9	661 ± 2	666 ± 2	740 ± 4	761 ± 6	0,28 ± 0,04
12	655 ± 3	697 ± 2	777 ± 13	760 ± 6	0,27 ± 0,02
15	644 ± 2	734 ± 9	800 ± 5	760 ± 5	0,24 ± 0,02

Iloraz naporu

Przebieg zależności $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ dla nasion rzepaku o wilgotności 6% przedstawia rysunek 2. Zależność $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ oznaczona linią ciągłą reprezentuje obciążanie złoża rzepaku, zaś linia przerywana reprezentuje analogiczną zależność podczas dociążania, czyli po wykonaniu standardowych obrotów pokrywą. Przebiegi $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ dla fazy obciążania i dociążania są zależnościami prawie liniowymi. Wartość średnia współczynnika kierunkowego stycznej do przebiegu zależności $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ dla procesu obciążania złoża nasion o wilgotności 6% wynosiła 0,47 zaś dla dociążania 0,42.



Rys. 2. Przykładowa zależność $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ dla nasion rzepaku o wilgotności 6%.

Fig. 2. Typical $\sigma_x(\sigma_{z,i})$ relationship for rape seeds of 6% of moisture content.

Wraz ze wzrostem wilgotności rosną siły tarcia oraz spójności pomiędzy nasionami. W związku z tym naprężenie w kierunku poziomym przyrasta wolniej od naprężenia w kierunku pionowym, wzdłuż którego przyłożona jest siła obciążająca. Powoduje to spadek wartości ilorazu naporu (Tab.1). W przypadku nasion rzepaku iloraz naporu zmalał o 48% przy wzroście wilgotności od 6 do 15%.

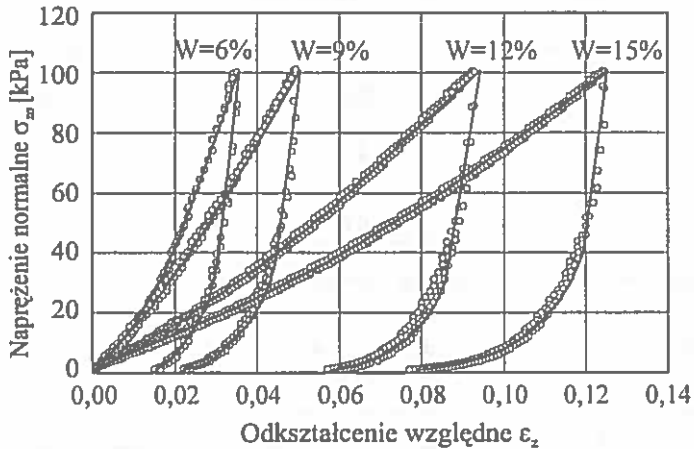
Iloraz naporu wyznaczony w teście jednoosiowego ściskania przy wilgotności 6% pokrywał się z wartością $k_s=0,45$ otrzymaną we wcześniejszych badaniach przeprowadzonych dla dużej objętości złoza rzepaku ($0,17 \text{ m}^3$) przy naporze pionowym 13 kPa i analogicznej wilgotności złoza [7]. Zalecana przez Polską Normę [9] wartość ilorazu naporu dla rzepaku wynosi 0,53 i jest zbliżona do wartości wyznaczonej w teście jednoosiowego ściskania jedynie w przypadku złoza nasion o wilgotności 6%.

Parametry sprężystości i plastyczności

Przebiegi zależności naprężenia σ_{z0} od odkształcenia względnego ε_z w czasie obciążania i odciążania złoza nasion rzepaku o czterech poziomach wilgotności przedstawia rysunek 3. Pierwszy fragment krzywych obciążania ilustruje zagęszczenie materiału poprzez przemieszczanie się i obroty nasion, bez ich deformacji. Drugi fragment, bardziej stromy, obejmuje dalszy wzrost odkształceń sprężystych i plastycznych. W tej fazie pojedyncze ziarna deformują się w obszarach wzajemnego kontaktu. Stwierdzono znaczne różnice przebiegu deformacji w próbkach o różnej wilgotności. Najniższą wartość maksymalnego odkształcenia względnego (około 0,035) otrzymano dla rzepaku o wilgotności 6%, zaś najwyższą wynoszącą około 0,12 dla wilgotności 15%.

Dopasowanie modelu dla liniowej części odciążania dało zadawalające rezultaty. Współczynnik determinacji R^2 dla czterech wilgotności rzepaku zmienił się w zakresie od 0,863 do 0,896 (Tab.3). Wartości otrzymanych stałych sprężystych były zróżnicowane w zależności od wilgotności i malały wraz ze wzrostem wilgotności. Największą wartość modułu sprężystości wynoszącą 9 MPa otrzymano dla wilgotności 6%, najniższą 6,6 MPa dla wilgotności 15%. Zakresowi obciążenia przyjętemu w badaniach (100kPa) odpowiada obciążenie złoza nasion o wysokości około 14 m. Dla tej wysokości złoza norma [9] oraz projekt jej nowelizacji [3] zalecają przyjmowanie wartości modułu sprężystości równej 20 MPa. Maksymalną wartość współczynnika Poissona (0,24) dla części sprężystej odciążania otrzymano dla rzepaku o wilgotności 6% a minimalną wynoszącą 0,10 dla wilgotności 15% (Tab.3). Według normy [9] wartość współ-

czynnika Poissona należy przyjmować równą 0,4. Norma nie różnicuje obu tych stałych materiałowych w zależności od wilgotności złoża.



Rys. 3. Typowe przebiegi eksperymentalne zależności $\sigma_m(\epsilon_z)$ wraz z krzywymi modelu dla rzepaku o czterech poziomach wilgotności.

Fig. 3. Typical experimental plots of $\sigma_m(\epsilon_z)$ with fitted model curves for rape seeds at four levels of moisture content.

Moduł sprężystości pojedynczych nasion rzepaku badał szczegółowo Sępniewski [12, 13], ściskając nasiona między dwoma równoległymi płytkami. Przyjął on, że nasienie rzepaku to sprężysta powłoka wypełniona nieściśliwą cieczą. Przy wilgotności 15% autor otrzymał wartość E równą około 6 MPa, zaś dla wilgotności 6% wartość E około 27 MPa. Różnice w wartości modułu sprężystości dla pojedynczego nasiona oraz dla złoża wynikają bezpośrednio z wpływu struktury upakowania jak i z wzajemnych oddziaływań pomiędzy nasionami.

Tabela 2. Współczynniki determinacji oraz parametry modelu dla obciążania złoża nasion rzepaku
Table 2. Coefficients of determination and model parameters for rape seeds under loading

Wilgotność [%]	R^2	D_1	D_2	α	K_0	ν^*
6	0,998	0,121	0,010	0,929	0,47	0,32
9	0,998	0,138	0,011	0,958	0,38	0,27
12	0,998	0,162	0,013	1,090	0,36	0,26
15	0,998	0,191	0,012	1,17	0,30	0,23

Tabela 3. Współczynniki determinacji oraz parametry sprężyste wyznaczone na podstawie pierwszej liniowej fazy odciążania

Table 3. Coefficients of determination and model parameters for rape seeds for first (linear) sector of unloading

Wilgotność [%]	R ²	E [MPa]	A	ν
6	0,896	9,0	0,32	0,24
9	0,865	8,7	0,20	0,17
12	0,863	7,1	0,19	0,16
15	0,868	6,6	0,11	0,10

Tabela 4. Współczynniki determinacji oraz parametry modelu otrzymane dla nieliniowej fazy odciążania

Table 4. Coefficients of determination and model parameters for rape seeds for second (nonlinear) sector of unloading

Wilgotność [%]	R ²	D ₃	D ₄	D ₅ [kPa ⁻¹]	β
6	0,986	0,219	0,165	0,142·10 ⁻³	0,171
9	0,988	0,875	0,056	0,011·10 ⁻³	0,208
12	0,952	0,381	0,418	0,140·10 ⁻³	0,145
15	0,929	0,398	0,159	0,641·10 ⁻³	0,142

Znając moduł liniowej sprężystości E , wyznaczony na podstawie liniowej części odciążania, estymowano parametry D_1 , D_2 i α równania (4) modelu opisującego nieliniową, plastyczną deformację próbki przy obciążaniu. Wartości tych trzech parametrów wzrastały wraz ze wzrostem wilgotności (Tab.2). Sawicki [11] zastosował wartość wykładnika α równą 3/2. W trakcie estymacji danych eksperymentalnych stwierdzono, że lepsze wyniki dopasowania otrzymuje się po uwolnieniu wartości wykładnika. Wartość wykładnika dla każdej wilgotności była w przybliżeniu równa 1. Różnica w wartości wykładnika w stosunku do modelu Sawickiego wynika prawdopodobnie z niższego zakresu obciążenia (100 kPa). Wartości parametrów opisujących zależność $\varepsilon_z(\sigma_{z0})$ w drugiej fazie odciążania przedstawia tabela 4. Nie stwierdzono istotnej tendencji w otrzymanych wartościach. Zauważono jedynie, że wartość parametru D_5 dla wilgotności 6% równa jest w przybliżeniu odwrotności modułu ściśliwości ($1/K=3(1-2\nu)/E$), co świadczyłoby na korzyść przyjętej przez Sawickiego [11] hipotezy, że podczas tej części odciążania sprężysta część deformacji obejmuje jedynie składową objętościową.

Wartości współczynnika determinacji dla obciążania wynosiły w każdym przypadku 0,998 natomiast dla drugiej fazy odciążania zawierały się w zakresie

od 0,929 do 0,988. Wartości te świadczą o dobrym dopasowaniu równań modelu do danych eksperymentalnych.

WNIOSKI

1. Gęstość złoża nasion rzepaku określana zgodnie z zaleceniami normy Eurocode 1 rośnie ze wzrostem wilgotności nasion w przeciwieństwie do gęstości usypnej i utrząsionej, które zmieniają się w bardzo ograniczonym zakresie. Wartości parametrów mechanicznych złoża rzepaku wyznaczone w teście jednoosiowego ściskania były ściśle powiązane ze sposobem napełniania komory pomiarowej.
2. Model Sawickiego [11] zaproponowany do opisu deformacji piasku poprawnie opisuje jednoosiowe ściskanie ziarna rzepaku dla różnych wilgotności, o czym świadczą wysokie wartości współczynników determinacji R^2 .
3. Wartość modułu sprężystości E złoża malała wraz ze wzrostem wilgotności. Również wartość współczynnika Poissona ν malała ze wzrostem wilgotności i była o połowę niższa od zalecanej przez normę [9].
4. W przypadku deformacji plastycznej jedynie w czasie obciążania stwierdzono wzrost wartości parametrów D_1 , D_2 i α wraz ze wzrostem wilgotności.
5. Iloraz naporu nasion rzepaku zależy od wilgotności złoża. Wzrost wilgotności nasion rzepaku z 6 do 15% powoduje spadek ilorazu naporu od wartości 0,46 do 0,24. Otrzymane wartości ilorazu naporu pozostają zgodne z wyznaczonymi wcześniej [7] dla większej objętości złoża, co potwierdza poprawność zastosowanej metody.

PIŚMIENNICTWO

1. Britton M. G., Moysey E. B.: Grain Properties in the Proposed New Engineering Practice on Bin Loads. American Society of Agricultural Engineers, 86-4502, 1986.
2. Dobrzański B., Horabik J., Molenda M.: Vibratory Method for Bulk Density Estimation. Powder Handling and Processing, 6 (1), 67-70, 1994.
3. 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.
4. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4. Actions in silos and tanks. DDENV 1991-4: 1996.
5. Grzesiuk S., Kulka K.: Fizjologia i biochemia nasion. PWRiL, Warszawa, 1981.
6. Horabik J., Molenda M.: Urządzenie pomiarowe do wyznaczania ilorazu naporu ośrodka

- sypkiego. Zgłoszenie patentowe nr P-340014. Biuletyn Urzędu Patentowego Nr 22(700), 2000, A1(21) 340017.
7. Horabik H., Rusinek R.: Wyznaczanie ilorazu naporu w roślinnych materiałach sypkich. Cz II. Badania doświadczalne. Acta Agrophysica, 37, 73-81, 2000.
 8. 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.
 9. PN-89/B-03262. Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kisonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
 10. PN-73/R-74007. Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości.
 11. Sawicki A.: Elasto-plastic interpretation of oedometric test. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 41 (1-2), 111-131, 1994.
 12. Stępniewski A.: Wpływ wilgotności i temperatury na zmienność właściwości mechanicznych nasion rzepaku. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin 1997.
 13. Stępniewski A., Szot B.: Czynniki determinujące odporność nasion rzepaku na uszkodzenia. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych, z. 427, 51-63, 1995.
 14. Szwed G.: Kształtowanie fizycznych i technologicznych cech nasion rzepaku w modelowanych warunkach przechowywania. Acta Agrophysica, 27, 2000.
 15. Ślaska-Grzywna B.: Metoda wyznaczania granicznych wartości zagęszczania materiałów sypkich. Rozprawa doktorska, Akademia Rolnicza w Lublinie, 1995.
 16. Tys J.: Czynniki kształtujące właściwości agrofizyczne rzepaku. Rozprawa habilitacyjna, Acta Agrophysica, 6, 1997.

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF RAPE SEEDS IN UNIAXIAL TEST

M. Stasiak, M. Molenda, R. Rusinek, J. Horabik

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

Summary: Experimental investigations of mechanical behaviour of bedding of rape seeds were performed at four levels of moisture content (6, 9, 12 and 15%). Bulk density and pressure ratio of the bedding were determined with methods recommended by new standard Eurocode 1. Deformation of the medium was also investigated in loading – unloading cycle of uniaxial compression. Stress – strain relationship was described with an elastoplastic model proposed by Sawicki [11]. Modulus of elasticity and Poisson's ratio of the material were determined using linear phase of unloading cycle. It was stated that adopted model adequately described investigated process. Material properties as well as the model parameters were found strongly influenced by moisture content of seeds.

Key words: rape seed, bulk density, stress ratio, uniaxial compression, mechanical model.