

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE WYSOKO UWODNIONYCH CIAŁ STAŁYCH POCHODZENIA ROŚLINNEGO

Janusz Kolowca, Andrzej Złobecki

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
ul. Balicka 120, 30-149 Kraków
e-mail: zlobecki@ur.krakow.pl

Streszczenie. Opracowanie dotyczy zagadnień reologicznych w ujęciu fenomenologicznym. Autorzy przedstawiają skrót teorii modeli mechanicznych liniowych ośrodków lepkosprężystych oraz metody reologii doświadczalnej, a także wyniki badań własnych dotyczących właściwości reologicznych różnych wysoko uwodnionych materiałów pochodzenia roślinnego (jabłek, korzeni warzyw i buraków, bulw ziemniaków). Badania przeprowadzono na skonstruowanym w tym celu stanowisku. Testy wytrzymałościowe wykonywano w ten sposób, że próbki materiału obciążano pomiędzy dwoma równoległymi płytami, przy zachowaniu stałości naprężenia (próba pełzania), rejestrując jej odkształcenie, aż do osiągnięcia stałej prędkości pełzania (tzw. pełzanie ustalone), a następnie zdejmowano obciążenie i obserwowano powrót odkształcenia, aż do momentu jego ustalenia się na stałym poziomie. Badanym obiektom przypisano model Burgersa, a parametrami oceny właściwości reologicznych były: moduł sprężystości E , współczynnik lepkości K oraz stosunek odkształcenia powrotnego do odkształcenia pełzania. Stwierdzono, że przyjęty poziom obciążeń dla różnych grup obiektów (jabłka, korzenie warzyw, korzenie buraków, bulwy ziemniaków) był prawidłowy, z punktu widzenia analizy porównawczej, gdyż stosunek odkształcenia powrotnego do odkształcenia pełzania zawierał się we wszystkich przypadkach w podobnym i znaczącym zakresie około 50-70%. W poszczególnych grupach badanych obiektów parametr K zawierał się w zakresie: dla jabłek 219-345 MPa·s, warzyw 680-1199 MPa·s, buraków 1700-1375 MPa·s, bulw ziemniaków odmiany Salto 654-855 MPa·s. Natomiast korzenie marchwi oraz buraków ćwikłowych charakteryzowały się najwyższym modułem sprężystości E .

Słowa kluczowe: reologia, roślinne wysoko uwodnione ciała stałe, moduł sprężystości, współczynnik lepkości.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

E – moduł sprężystości (MPa),
 K – współczynnik lepkości (MPa·s),
 t – czas (s),

t_p – czas pełzania (s),
 t_n – czas powrotu lepkosprężystego (s),
 σ – naprężenie (MPa),
 $\dot{\sigma}, \ddot{\sigma}$ – pierwsza i druga pochodna naprężenia względem czasu,
 ε – odkształcenie względne,
 $\dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}$ – pierwsza i druga pochodna odkształcenia względem czasu,
 ε_0 – odkształcenie sprężyste (natychmiastowe),
 ε_n – odkształcenie powrotne,
 ε_r – odkształcenie trwałe,
 ε_{ls} – odkształcenie lepkosprężyste,
 ε_p – odkształcenie pełzania.

WSTĘP

Reologia jest podstawową dziedziną wiedzy, która zajmuje się ogólnie badaniem odpowiedzi substancji na naprężenia w funkcji czasu. Dosłownie (z greckiego) jest to nauka o płynięciu, ale praktycznie odnosi się do prawie wszystkich aspektów odpowiedzi ciał rzeczywistych na obciążenia zewnętrzne. I tak:

- w przypadku idealnego ciała stałego odpowiedź jest sprężysta i w najprostszym przypadku może być opisana prawem Hooke'a, mówiącym o proporcjonalności naprężeń i odkształceń,
- w przypadku idealnej cieczy odpowiedź ma charakter lepki, co może być opisane prosto prawem Newtona, które zakłada zależność liniową pomiędzy naprężeniami i prędkością odkształcenia.

Oba opisane wyżej przypadki są skrajne. Dla ośrodków rzeczywistych występuje układ złożony, o cechach zarówno sprężystych, jak i lepkich. Ośrodki rzeczywiste mogą być więc lepkosprężystymi ciałami stałymi (np. płody rolne, masa ziarnista), które w trakcie deformacji wykazują efekty lepkie lub płynami sprężystolepkimi, tzn. takimi lepкими płynami wykazującymi pewne efekty sprężyste (np. pasty, breje, pulpy). Pomiędzy powyższymi substancjami nie ma bardzo wyraźnej granicy i terminologia stosowana w tym przypadku w literaturze może być bardzo różna, bowiem rodzaj odpowiedzi substancji zależy od skali czasowej (Blahovec 2007, Aghkhani i in. 2012, Balasubramanian i in. 2012).

W reologii przyjmuje się koncepcję ośrodka ciągłego, czyli kontinuum, zdefiniowanego jako ciągły zbiór punktów materialnych, którym można przyporządkować w dowolnej chwili odpowiednie położenie przestrzenne. Zakładając dalej, że każdemu punktowi można przypisać wartości prędkości i przyspieszeń zmieniających się w sposób ciągły, to założenie takie umożliwia stosowanie rachunku różniczkowego do rozwiązywania zagadnień praktycznych (Haman i Zdanowicz 1968).

W teorii lepkosprężystości zakłada się więc bardziej ogólne równanie stanu ciała niż jest w teorii sprężystości, w postaci:

$$F(\sigma, \varepsilon, t) = 0 \quad (1)$$

a więc wprowadza się czas, jako dodatkową zmienną niezależną.

Ośrodek lepkosprężysty jest liniowy jeżeli naprężenie i odkształcenie oraz ich pochodne względem czasu w równaniu 1 będą występować liniowo, a więc ogólne równanie, ograniczając go jedynie do stanów jednoosiowych, jest następujące:

$$a_0\sigma + a_1\dot{\sigma} + a_2\ddot{\sigma} + \dots + a_k\sigma^{(k)} = b_0\varepsilon + b_1\dot{\varepsilon} + b_2\ddot{\varepsilon} + \dots + b_m\varepsilon^{(m)} \quad (2)$$

W szczególnych przypadkach:

- $\sigma = \frac{b_0}{a_0} \cdot \varepsilon$, a jeżeli w miejsce $\frac{b_0}{a_0}$ podstawimy E, czyli moduł sprężystości,

uzyskuje się równanie:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad , \quad (3)$$

które przedstawia ciało idealnie sprężyste Hooke'a,

- $\sigma = \frac{b_1}{a_0} \cdot \dot{\varepsilon}$, lub: $\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}$, (4)

Równanie 4 dotyczy ciała idealnie lepkiego Newtona.

Zjawiska reologiczne można opisać tzw. mechanicznymi modelami reologicznymi, przedstawiającymi w sposób abstrakcyjny zachowanie się ciał reologicznych pod działaniem obciążeń, i które tworzy się przez połączenie w różne kombinacje elementarnych modeli: sprężyny (ciało Hooke'a) i tłumika hydraulicznego (ciało Newtona). Uzyskuje się w ten sposób modele złożone: dwu-, trój- i czteroparametryczne, a więc składające się z 2, 3 i 4 modeli elementarnych. Na przykład równoległe połączenie sprężyny i tłumika to model Voigta-Kelvina (V – K), o równaniu stanu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + K \cdot \dot{\varepsilon} \quad (5)$$

Szeregowe połączenie sprężyny i tłumika nazywa się modelem ciała Maxwella (M), którego równaniem stanu jest:

$$\sigma + \frac{K}{E} \cdot \dot{\sigma} = K \cdot \dot{\varepsilon} \quad , \quad (6)$$

zaś szeregowe połączenie powyższych modeli tworzy czteroparametryczny model Burgersa, gdzie obowiązują zależności:

$$\varepsilon = \varepsilon_{V-K} + \varepsilon_M \quad , \quad \sigma = \sigma_M = \sigma_{V-K} \quad (7)$$

Równanie stanu tego modelu przybiera więc postać:

$$\sigma + A\dot{\sigma} + B\ddot{\sigma} = C \cdot \dot{\varepsilon} + D \cdot \ddot{\varepsilon} \quad , \quad (8)$$

gdzie: $A = \frac{K_1}{E_1} + \frac{K_1}{E_2} + \frac{K_2}{E_2}$

$$B = \frac{K_1 \cdot K_2}{E_1 \cdot E_2}$$

$$C = K_1$$

$$D = K_1 \cdot \frac{K_2}{E_2}$$

W warunkach stałego naprężenia $-\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ dla modelu Burgersa uzyskuje się równanie:

$$D\ddot{\varepsilon} + C \cdot \dot{\varepsilon} = \sigma \quad (9)$$

Po scałkowaniu równania (9), dla warunków początkowych: $t = 0$, $\dot{\varepsilon} = 0$, uzyskuje się tzw. równanie pełzania dla analizowanego modelu, które jest równaniem różniczkowym postaci:

$$\varepsilon_1(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{K_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{K_2}t} \right) \right] \quad (10)$$

Jeżeli opisywany układ odciążymy natychmiastowo $-\sigma(-t) = 0$, w chwili $t = t_1$ otrzymamy równanie tzw. pełzania powrotnego (inaczej odkształcenia powrotnego), które przedstawia krzywą, o przebiegu w czasie większym od t_1 :

$$\varepsilon_2(t) = \sigma_0 \left[\frac{t_1 - t_0}{K_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{K_2}t_1} \right) \cdot e^{-\frac{E_2}{K_2}(t-t_1)} \right] \quad (11)$$

W modelu Burgersa za odkształcenie natychmiastowe odpowiada więc sprężyna E_1 . Ukośna asymptota krzywej (10) wyznacza drugą stałą sprężystą E_2 , a jej nachylenie stałą tłumika K_1 . Parametr K_2 można wyznaczyć w oparciu o styczną do krzywej pełzania w punkcie $t = 0$.

Model Burgersa zakłada całkowitą odwracalność odkształceń sprężystych przy odciążeniu, a krzywa odciążenia (11) zbliża się asymptotycznie do prostej poziomej, która całkowite odkształcenie pełzania dzieli w przybliżeniu na dwie części: odkształcenie powrotne i odkształcenie trwałe. Stąd można wyprowadzić następujące wzory:

$$E = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cong \frac{\sigma_0}{\varepsilon_n} \quad (12)$$

i

$$K = K_1 \cong \frac{\sigma_0 \cdot t_p}{\varepsilon_t} \quad (13)$$

gdzie: $\varepsilon_p = \varepsilon_n + \varepsilon_t$, $\varepsilon_n = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ls}$, $t_p \cong t_n$,

Przyjmując zaś $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = \text{const}$ powstaje równanie relaksacji dla modelu Burgersa:

$$\sigma + A \cdot \dot{\sigma} + B \cdot \ddot{\sigma} = 0, \quad (14)$$

które jak widać, w porównaniu z równaniem pełzania, zawiera znacznie mniej informacji odnośnie stanu ciała niż równanie pełzania z odciążeniem.

Tak więc, głównym celem reologii doświadczalnej powinno być wyznaczenie krzywych pełzania z odciążeniem dla różnych poziomów naprężeń, najlepiej przy założeniu modelu mechanicznego o liniowym charakterze. Jeżeli występują niejasności odnośnie liniowego charakteru lepkosprężystego ośrodka należy wyznaczyć wcześniej krzywe naprężeniowo-odkształceniowe w stałym czasie, tzn. wykonać kilka prób pełzania przy różnych poziomach naprężeń, a następnie wykonać przekroje rodziny krzywych pełzania dla stałych wartości czasu t . Jeżeli takie zależności przedstawiają pęk prostych przechodzących przez początek układu, to materiał jest liniowo lepkosprężysty, a jeżeli tak nie jest w całym przyjętym przedziale obciążeń, to ośrodek można uznać za liniowy tylko w ograniczonym zakresie. Należy dodać, że większość ośrodków rzeczywistych dla niewielkich odkształceń ma charakter liniowy (Chrzanowski 1995, Fathollahzadeh i Rajabipour 2007).

Ośrodki stałe pochodzenia roślinnego można z dużym powodzeniem opisywać uniwersalnym liniowym modelem Burgersa, omówionym szczegółowo powyżej (Byszewski i Haman 1977, Jankowski 1989, Kolowca 2003, Miś 2001, Rybiński i in. 2009). W literaturze tematu można znaleźć też przykłady przyporządkowania do ciał stałych pochodzenia roślinnego innych modeli liniowych: n-parametrycznego uogólnionego modelu Maxwella (Gołacki 1998, Bohdziewicz 2001, Frontczak i in. 1985, Bzowska-Bakalarz 1993) oraz trójparametrycznego modelu standardowego Bohdziewicz 2001). Oba modele wykazują natychmiastowe odkształcenie pełzania.

MATERIAŁ I METODA

Charakterystyka mechaniczna wysoko uwodnionych ciał stałych pochodzenia roślinnego jest typowo reologiczna. Na przykład w warunkach obciążeń ściskających, działających na próbki pobrane z takich materiałów, najbardziej wytrzymała część konglomeratu komórkowego, czyli ściany komórkowe, odkształcają się początkowo sprężysto, komórki zmieniają kształt spłaszczając się w kierunku działania obciążenia, wzrasta ciśnienie turgorowe, co powoduje wypływ cieczy przez przepuszczalne dla wody ściany komórkowe i występuje pełzanie materiału (jego płynięcie w czasie). Pełzanie materiału odbywa się najpierw ze znaczną i malejącą prędkością, a potem prędkość odkształcenia osiąga stałą wartość (pełzanie ustalone). Taki stan rzeczy może trwać dość długo, bowiem komórki mogą zmieniać swoje położenie dzięki istnieniu wypełnionych powietrzem przestrzeni komórkowych, a ściany komórkowe odkształcają się plastycznie tylko nieznacznie, tzn. że po odciążeniu próbki następuje częściowy powrót odkształcenia, który odbywa się ze zmienną prędkością, najpierw dużą, a potem coraz mniejszą, aż do ustalenia się na stałym poziomie (lepkosprężysty charakter powrotu). Podczas trwającego dłużej pełzania, z czasem narastają naprężenia w ścianach komórkowych, zaczynają dominować odkształcenia plastyczne i dochodzi do tzw. pełzania nieustalonego powstającego z powodu niszczenia wiązań pektynowych komórek. Komórki oddzielają się od siebie i występuje utrata nośności próbki – jej zniszczenie.

Przeprowadzono badania porównawcze właściwości reologicznych różnych wysoko uwodnionych ciał stałych pochodzenia roślinnego w ujęciu fenomenologicznym. Do badań wykorzystano skonstruowane w tym celu stanowisko, którego szczegółowy opis zawarty jest w literaturze (Kołowca i Krzysztofik 2003).

Materiał badawczy stanowiło m.in.: 6 odmian jabłek o zróżnicowanej strukturze miąższu: Delicusz, Jonagold, Champion, Szara Reneta, Ligol i Boscop. Z jabłek pobierano próbki poprzecznie (promieniowo) do osi obrotu, z części bez rumieńca i z rumieńcem. Sposób przygotowania próbki był następujący: pobranie materiału w postaci walca na głębokości około 15 mm od powierzchni owocu, odcięcie i odrzucenie 2 mm warstwy ze skórką, odcięcie walca o długości około 10 mm. Ze względu na możliwe zmiany właściwości próbek związane z wilgotnością i składem chemicznym ich przygotowanie odbywało się „na bieżąco”. Pomiary wykonywano w fazie dojrzewania pozbiornego owoców pochodzących z sadu produkcyjnego, przechowywanych w chłodni w temperaturze 6°C i wilgotności powietrza około 95%. Przed wykrawaniem próbek miąższu owoce pobrane z chłodni przetrzymywano około 18 godz. w celu osiągnięcia równowagi z naturalnymi warunkami pomieszczenia, w którym wykonywano testy wytrzymałościowe.

Badania przeprowadzono także na korzeniach buraków i roślin warzywnych wybranych odmian. Próbki mięszu z buraków i warzyw wykrawano poprzecznie (promieniowo) i wzdłuż (poosiowo) osi korzenia. Do badań wzięto korzenie buraków: pastewnych (Cyklop) i ćwikłowych (Glob) oraz korzenie warzyw: marchwi (Karotka), pietruszki (Kaśka), selera (Feniks) i rzodkwi czarnej (Murzynka). Próbki przygotowywano w podobnych warunkach jak dla jabłek. Ponadto analizowano właściwości reologiczne mięszu bulw ziemniaka odmiany Salto o różnej wielkości (frakcja 30-40 mm i powyżej 60 mm).

Testy wytrzymałościowe wykonywano następująco. Próbki materiału obciążano pomiędzy dwoma równoległymi płytami, przy zachowaniu stałości naprężenia (próba pełzania), rejestrując jej odkształcenie, aż do osiągnięcia stałej prędkości pełzania (tzw. pełzanie ustalone), a następnie zdejmowano obciążenie i obserwowano powrót odkształcenia, aż do momentu jego ustalenia się na stałym poziomie. Odkształcenie mierzono z dokładnością 0,01 mm. Poziom obciążenia w zakresie 28-72 N był zróżnicowany i przyjęty tak, aby uzyskać możliwie duży udział powrotu w stosunku do odkształceń pełzania. Próbki miały kształt walców o wymiarach $\varphi = 14,7$ i $h = 10$ mm i były wykrawane za pomocą specjalnego wykrojnika, który umożliwiał uzyskanie próbek o równoległych płaszczyznach podstaw. Było to istotne ze względu na konieczność dobrego przylegania podstaw próbki do elementu obciążającego i oporowego, gdyż w ten sposób można uzyskać zadowalającą jednorodność naprężeń i odkształceń. Wysokość próbki mierzono za pomocą czujnika elektronicznego firmy „Mitutoyo” z dokładnością do 0,01 mm.

Badanym obiektom przypisano model Burgersa, a parametrami oceny właściwości reologicznych był:

- moduł sprężystości E ,
- współczynnik lepkości K ,
- stosunek odkształcenia powrotnego do odkształcenia pełzania $\varepsilon_r / \varepsilon_p$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1. Zamieszczone w niej zakresy średnich wartości parametrów oceny właściwości reologicznych, uwzględniające różne warianty doświadczenia, a także 5% przedziały ufności. Kolejność danych podano tutaj wg wzrastających wartości modułu sprężystości E .

Zaobserwowano tu bardzo wyraźne zróżnicowanie wartości parametrów oceny właściwości reologicznych badanych odmian jabłek. Najwyższe wartości modułu sprężystości E wystąpiły dla odmiany Boscop, a najniższe wartości przypadły odmianie Jonagold. Wartości tego parametru były w zakresie 3,6-6,7 MPa, a parametr

$\varepsilon_n / \varepsilon_p$ mieścił się w zakresie 49-77%. Dla korzeni buraków i roślin warzywnych można było zaobserwować gatunkowe zróżnicowanie właściwości lepkosprężystego korzeni buraków oraz warzyw. W poszczególnych grupach (warzywa, buraki), korzenie marchwi oraz buraków ćwikłowych charakteryzowały się najwyższym modułem E , a wartości $\varepsilon_n / \varepsilon_p$ mieściły się w zakresie 50-68%. Bulwy mniejsze (frakcja 30-40 mm) charakteryzowały się wyższym modułem sprężystości ITD niż bulwy większe (frakcja powyżej 60 mm).

Tabela 1. Wartości parametrów oceny właściwości reologicznych różnych wysoko uwodnionych obiektów biologicznych

Table 1. The values of estimation parameters of rheological properties for different high-hydrated biological objects

Nazwa obiektu – Name of object	Moduł sprężystości Modulus of elasticity E (MPa)	Współczynnik lepkości Coefficient of viscosity K (MPa·s)	$\varepsilon_n / \varepsilon_p$
Jabłka – Apples (Jonagold)	3,6-4,1	232 ± 13	0,49-0,58
Jabłka – Apples (Delicjusz)	4,2-4,4	–	0,51-0,55
Jabłka – Apples (Champion)	4,8-5,4	–	0,55-0,60
Jabłka – Apples (Szara Reneta)	4,9-5,6	–	0,54-0,59
Jabłka – Apples (Ligol)	5,0-5,3	–	0,60-0,68
Jabłka – Apples (Boscop)	5,6-6,7	329 ± 16	0,65-0,77
Seler – Celery (Feniks)	7,1-7,3	736 ± 56	0,52-0,59
Pietruszka – Parsley (Kaśka)	5,3-7,5	–	0,55-0,61
Bulwy ziemniaków – Potato tubers (Salto), (frakcja powyżej 60 mm – fraction above 60 mm)	6,5-8,0	654-735	0,50-0,57
Burak pastewny – Fodder beet (Cyklop)	7,7-8,2	1817 ± 117	0,47-0,55
Bulwy ziemniaków – Potato (Salto), (frakcja 30-40 mm – Salto fraction 30-40 mm)	7,0-8,5	740 - 855	0,65-0,74
Burak ćwikłowy – Red beet (Glob)	8,1-9,0	1323-52	0,56-0,67
Rzodkiew czarna – Black radish (Murzynka)	8,1-9,5	–	0,50-0,68
Marchew – Carrot (Kartotka)	9,3-10,1	1112-87	0,55-0,68

Parametr ten zawierał się w zakresie 6,5-8,5 MPa. Parametr $\varepsilon_t / \varepsilon_p$ był w zakresie 50-74%. Tak duże zróżnicowanie wartości parametru K, o wiele wyraźniejsze niż w przypadku modułu sprężystości E, wynika z wartości czasu pełzania (t_p). Im wyższe jego wartości, tym większe K (wzór 13). Czas pełzania zależy od struktury wewnętrznej badanego obiektu (wielkości komórek, grubości ścian komórkowych, ciśnienia turgorowego itd.). Stąd badania reologiczne powinny być uzupełnione w przyszłości o analizę mikroskopową i wnioskowane zgodne z regułami obowiązującymi w reologii strukturalnej.

Reasumując, w badaniach reologicznych bardzo istotny jest prawidłowy dobór modelu mechanicznego, którym opisuje się zachowania reologiczne analizowanego ośrodka. W przypadku ciał stałych pochodzenia roślinnego jest to z reguły model liniowy. Jednak w przypadku, kiedy występują niejasności odnośnie liniowego charakteru ośrodka, można wyznaczyć, przed badaniami właściwymi, izochromy i ocenić zakres obciążeń, przy którym taka liniowość występuje. Zjawiska reologiczne ciał stałych pochodzenia roślinnego dobrze opisuje liniowy 4-ro parametryczny model Burgersa, w którym występuje odkształcenie natychmiastowe, a krzywa pełzania odwrotnego zbliża się asymptotycznie do prostej poziomej. Daje to możliwość „rozdzielenia” całkowitego odkształcenia pełzania na odkształcenie trwałe i sprężyste (suma odkształcenia natychmiastowego i lepko sprężystego), co z kolei umożliwia stosunkowo proste wyznaczenie modułu sprężystości i współczynnika lepkości.

Model Burgersa opisuje precyzyjnie odpowiedź stałego ośrodka biologicznego na obciążenia zewnętrzne. Wykazały to liczne badania własne autorów dotyczące materiałów o bardzo różnej strukturze zewnętrznej i wewnętrznej – korzeni warzyw: pietruszki, marchwi, rzodkwi czarnej, selera, korzeni buraków (ćwikłowych i pastewnych), jabłek i bulw ziemniaków. Tak więc, model Burgersa jest tutaj modelem w pełni uniwersalnym.

Najczęściej stosowanym testem reologicznym powinna być próba pełzania z odciążeniem, która niesie ze sobą znacznie więcej informacji niż zwykły test pełzania (bez odciążenia) lub test relaksacji. Z krzywych pełzania z odciążeniem można uzyskać reprezentatywne, szczegółowe i pełne dane odnośnie cech reologicznych badanego materiału. Najczęściej wyznacza się dwie stałe materiałowe – moduł sprężystości i współczynnik lepkości, ale można też do opisu zachowań reologicznych badanego obiektu wykorzystać: średnie wartości prędkości odkształceń pełzania i odkształceń powrotnych, moduł pełzania (stosunek zastosowanego naprężenia do prędkości pełzania), współczynnik pełzania poprzecznego (stosunek odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego), stosunek odkształcenia powrotnego do odkształcenia pełzania, czasy pełzania. O przydatności testu pełzania z odciążeniem do badań reologicznych ciał stałych pochodzenia roślinnego świadczą wyniki badań przedstawione w tym opracowaniu, w których

wykazano wyraźne różnice w zachowaniu reologicznym badanych gatunków i odmian roślin. Mówi to o wysokiej „czułości” takiego testu w odniesieniu do materiałów biologicznych, które przecież, w porównaniu z materiałami technicznymi, są bardzo złożonymi obiektami o wyraźnej niejednorodności struktury i kształtu, o wielofazowej i wielowarstwowej budowie, i w których składowe stanowią różną i nierównomiernie rozłożoną zawartość ich objętości, co wpływa na określoną kierunkowość struktury, a więc i anizotropię.

Ze względu na dużą zmienność cech mechanicznych materiałów roślinnych, bardzo istotne, dla wiarygodności przeprowadzonych testów reologicznych, jest przyjęcie odpowiednio licznej próby oraz zagwarantowanie podczas badań w miarę dużej jednorodności odkształceń i naprężeń. Próbkę pobraną z płodów rolnych powinno się przygotowywać bardzo starannie, tak aby ich powierzchnia przylegająca do elementu obciążającego i oporowego była idealnie równoległa i możliwie duża. Najlepiej jeżeli: kształt próbek jest walcowy, próbki są ściskane wzdłuż wysokości, pobieranie próbek odbywa się specjalnym walcowym wykrojnikiem z miejsc o różnej gęstości i kierunkowości struktury badanego obiektu, wymiary próbek są ujednolicone i mierzone z dokładnością co najmniej 0,01 mm itd. Z uwagi na możliwe w trakcie badań zmiany właściwości próbek, związane z wilgotnością i składem chemicznym, pomiary należy wykonywać „na bieżąco”.

Informacje o właściwościach reologicznych ośrodków roślinnych mogą być znaczące, zarówno z poznawczego, jak i użytkowego punktu widzenia. W pierwszym aspekcie szczególnie istotne będą dane o właściwościach reologicznych w ujęciu strukturalnym (reologia strukturalna), a w drugim (reologia fenomenologiczna) w poszerzeniu wiedzy o wzajemnych relacjach w układzie maszyna – roślina, a w szczególności w aspekcie destrukcyjnego oddziaływania zespołów roboczych na płody rolne, a więc także pogorszenia jakości produktu końcowego w zastosowanej technologii prac maszynowych, w wyniku uszkodzeń mechanicznych. Najważniejsze dla konstruktora i eksploatatora maszyn rolniczych jest tutaj sprecyzowanie rodzaju i wielkości obciążeń mechanicznych działających na obiekt biologiczny, przy których efekty ich działania będą takie, że po „zdjęciu” obciążenia nastąpi całkowita odwracalność odkształceń.

WNIOSKI

Generalnie, w odniesieniu do wszystkich badanych obiektów, wnioski są następujące:

1. Przyjęty poziom obciążeń (28-72 N) dla różnych grup obiektów (jabłka, korzenie warzyw, korzenie buraków, bulwy ziemniaków) był prawidłowy z punktu widzenia analizy porównawczej, gdyż parametr $\varepsilon_r / \varepsilon_p$ zawierał się we wszystkich przypadkach w podobnym i znaczącym zakresie około 50-70%.

2. W poszczególnych grupach badanych obiektów parametr K zawierał się w zakresie: dla jabłek 219-345 MPa·s, warzyw 680-1199 MPa·s, buraków 1700-1375 MPa·s, bulw ziemniaków odmiany Salto 654-855 MPa·s.

3. Zaobserwowano duże międzygatunkowe zróżnicowanie właściwości lepko-sprężystych korzeni buraków oraz warzyw. W poszczególnych grupach korzenie marchwi oraz buraków ćwikłowych charakteryzowały się najwyższym modułem E .

PIŚMIENNICTWO

- Aghkhani M., Miraei Ashtiani S., Baradaran Motie J., Abbaspour-Fard M., 2012. Physical properties of Christmas Lima bean at different moisture content. *Int. Agrophysics*, 26(4), 341-346.
- Balasubramanian S., Singh K., Kumar R., 2012. Physical properties of coriander seeds at different moisture content. *Int. Agrophysics*, 26(4), 419-422.
- Blahovec J., 2007. Role of water content in food and product texture. *Int. Agrophysics*, 21, 209-215.
- Bohdziewicz J., 2001. Właściwości mechaniczne i reologiczne wybranych odmian buraka ćwikłowego. *Acta Agrophysica*, 45, 17-29.
- Byszewski W., Haman J., 1977. Gleba, maszyna, roślina. PWN.
- Bzowska-Bakalarz M., 1993. Model reologiczny tkanki korzenia buraka cukrowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 408, 283-290.
- Chrzanowski M., 1995. Reologia ciał stałych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Fathollahzadeh H., Rajabipour A., 2007. Some mechanical properties of barberry. *Int. Agrophysics* 20, 299-302.
- Frontczak J., Metzger T., Bieniek J., 1985. Zarys podstawowych zagadnień przy badaniu cech mechanicznych i reologicznych produktów rolniczych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Nr 156, Rolnictwo XLIII, 23-36.
- Gołacki K., 1998. Charakterystyki lepko-sprężyste korzeni marchwi w szerokim zakresie prędkości obciążenia mechanicznych. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Haman J., Zdanowicz A., 1968. O potrzebie rozszerzenia studiów nad reologią materiałów w rolnictwie. *Rocz. Nauk Roln. T. 68-C-2*, 7-26
- Jankowski T., 1989. Modele właściwości fizycznych artykułów żywnościowych. Cz. I. Właściwości mechaniczne, *Przemysł Spożywczy* 7, 179-183.
- Kolowca J., 2003. Ocena właściwości reologicznych wysokouwodnionych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*. 11(33), 97-103.
- Kolowca J., Krzysztofik B., 2003. Właściwości lepko-sprężyste miąższu bulw ziemniaka różnej wielkości. *Acta Agrophysica* 2(4), 759-764.
- Miś A., 2001. Ocena właściwości reologicznych glutenu mokrego przy pomocy testu pełzania. *Acta Agrophysica* 46, 127-144.
- Rybiński B., Szot R., Rusinek J., 2009. Estimation of geometric and prosperities of seed of Polish cultivar and lines representing selected species of pulse crop. *Int. Agrophysics*, 23, 257-267.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HIGH-HYDRATED SOLIDS OF PLANT ORIGIN

Janusz Kolowca, Andrzej Złobek

Department of Mechanical Engineering and Agrophysics,
Production and Power Engineering Faculty, Agricultural University of Cracow
e-mail: zlobek@ur.krakow.pl

Abstract. The study relates to questions of rheological formulation in phenomenological aspect. The authors present a summary of the theory of mechanical models of linear viscoelastic centres and the method of the experimental rheology, and also the results of own investigations on the rheological propriety of various high-hydrated plant materials (apples, roots: vegetables and beetroots, tubers of potatoes). The investigations were realised on a test stand designed specifically for this purpose. The strength tests were conducted by subjecting samples of the material to loading between two parallel plates, maintaining constant stress (the creep test), recording their deformation until the achievement of constant speed of the creep (so-called steady creep); then the load was removed and the return of the deformation was observed, until the moment of its stabilisation at a constant level. The Burger's model was assigned to studied objects, and the parameters of estimation the of rheological properties were the modulus of elasticity E , the coefficient of internal friction K and the ratio of the return deformation to the creep deformation. It was found that the adopted level of loads for the various groups of objects (apples, roots of vegetables, roots of red beet, tubers of potatoes) was correct from the viewpoint of comparative analysis, because the ratio of return deformation to creep deformation was in all cases within a similar and significant range of about 50-70%, and the K parameter for the particular groups of studied objects fell within the following ranges: for apples 219-345 MPa·s, for vegetables 680-1199 MPa s, beetroots 1700-1375 MPa s, tubers of potatoes of Salto variety 654-855 MPa s. The roots of carrot and red beet were characterised by the highest modulus of elasticity E .

Keywords: rheology, high-hydrates solid bodies, modulus of elasticity, coefficient of internal friction