

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE OWOCÓW WYBRANYCH ODMIAN ŚLIWY

Paskalis Grzemeski, Jerzy Bohdziewicz
Institut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Podczas zbioru, transportu i przechowywania materiał pochodzenia roślinnego podlega zarówno obciążeniom statycznym, jak i dynamicznym. Wiąże się to z możliwością powstania uszkodzeń mechanicznych, stanowiących niepożądany efekt w przypadku owoców przeznaczonych do bezpośredniej konsumpcji. Na podstawie testów reologicznych można uzyskać rodziny krzywych zależności naprężeń i przemieszczeń w funkcji czasu. Dotychczas brak jest kompleksowego opracowania o charakterze porównawczym, rozpatrywane są jedynie standardowe modele obiektu badań. Z przeprowadzonych badań wynika, że skrócenie czasu realizacji testów reologicznych skutkuje zmianą obliczonych wartości parametrów modeli standardowych. Do wnioskowania o zmianach wartości współczynników E oraz η bardziej przydatne są modele empiryczne.

Słowa kluczowe: śliwki, pełzanie, relaksacja naprężeń, modele

Wstęp

Owoce z rodziny *Rosaceae* mają szerokie zastosowanie jako surowiec w przetwórstwie owocowo-warzywnym, ze względu na dużą akumulację mikroelementów oraz witamin A, B₁, B₂, C, PP [Terry i in. 2001]. W Polsce, jak i w innych krajach, rośnie zapotrzebowanie na owoce o dobrej jakości, zwiększa się też atrakcyjność odmian śliw [Makosz 2002]. Najwyższe ceny śliwki deserowe osiągają na początku listopada, dlatego warto uprawiać odmiany późniejsze oraz starać się o poprawę zdolności przechowalniczej owoców [Klimmek 2005]. Stan fizjologiczny owoców ma istotny wpływ na zapewnienie utrzymania dobrej jakości śliwek przez jak najdłuższy okres czasu. Na przebieg dojrzewania śliwek po zbiorze oraz na skłonność do przyspieszonego rozpadu miąższu ma wpływ zasilanie roślin w asymilaty i w związki mineralne [Plich 1999, 2003]. W okresie dojrzewania i przechowywania następuje spadek jędrności owoców, natomiast tkanki przejrziałych i uszkodzonych owoców ulegają rozmiękczeniu [Dobrzański i Rybczyński 1999]. Rybczyński i Trembińska [2007] stwierdzili, iż na stopień dojrzałości owoców śliwy istotny wpływ mają jędrność oraz wytrzymałość mechaniczna badanego materiału, odwzorowane przy

pomocy współczynnika sprężystości i siły penetracji. Wykazali również tendencję spadkową wartości mierzonych parametrów w zależności od terminu zastosowania regulatora wzrostu, zawartego w preparacie Gibrescol.

Według Bohdziewicza i Czachora [2010] informacje warunkujące sposób transportu oraz składowanie plonów można otrzymać na podstawie obserwacji przebiegu zjawisk pełzania oraz relaksacji naprężeń. Z uwagi na możliwość wyznaczania wartości współczynników sprężystości E oraz lepkości dynamicznej η przyjętych modeli reologicznych należy stosować regresję z wykorzystaniem funkcji wykładniczej [Bohdziewicz 2003a, 2003b].

Zależność zmian naprężenia w funkcji czasu dla testu relaksacji można opisać równaniem czteroparametrowego modelu Maxwella:

$$\sigma(t) = E_1 \cdot e^{-\eta_1 t} + E_2 \cdot e^{-\eta_2 t} \quad (1)$$

Przebieg odkształcenia podczas pełzania można opisać czteroparametrowym równaniem modelu Kelvina- Voigta:

$$\varepsilon(t) = E_1 \cdot (1 - e^{-\eta_1 t}) + E_2 \cdot (1 - e^{-\eta_2 t}) \quad (2)$$

gdzie:

- $\sigma(t)$ – naprężenie [MPa],
- $\varepsilon(t)$ – odkształcenie,
- E_1, E_2 – współczynniki sprężystości [MPa],
- η_1, η_2 – współczynniki lepkości [MPa·s],
- t – czas realizacji eksperymentu.

Na podstawie przeprowadzonych badań [Bohdziewicz 2007] stwierdzono, że lepsze dopasowanie do przebiegu zależności $\sigma(t)$ ma równanie empiryczne zapisane w postaci:

$$\sigma(t) = E_1 \cdot e^{-\eta_1 t} + E_d \cdot [(1 + a \cdot t^b)^{-1}] \quad (3)$$

Analogicznie, do opisanie przebiegu $\varepsilon(t)$ można wykorzystać formułę empiryczną:

$$\varepsilon(t) = E_1 \cdot (1 - e^{-\eta_1 t}) + E_d \cdot [1 - (1 + a \cdot t^b)^{-1}] \quad (4)$$

gdzie:

- E_1, E_d – współczynniki sprężystości [MPa],
- η – współczynnik lepkości [GPa·s],
- a, b – współczynniki równań,
- t – czas realizacji eksperymentu.

Cel i obiekt badań

Celem podjętych badań było wyznaczenie wartości parametrów przyjętych modeli reologicznych do opisanie zachowania się wybranych owoców śliwy podczas testów relaksacji naprężeń oraz pełzania.

Obiektem badań były owoce sześciu odmian śliwy: Elena, Oneida, Presenta, President, Top oraz Węgierka Zwykła. Owoce pozyskano między 28 sierpnia a 8 września 2011 roku z sadu stacji dydaktyczno-badawczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, zlokalizowanej w miejscowości Samotwór. Do każdego z przeprowadzonych testów wybrano wyselekcjonowany materiał pod względem kształtu i rozmiarów.

Metodyka badań

Przed przystąpieniem do testów reologicznych ważono poszczególne owoce z dokładnością 10^{-4} g wykorzystując wagę WPA 60C oraz zmierzono ich średnice w trzech wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach z dokładnością 10^{-2} mm, za pomocą suwmiarki cyfrowej firmy VOREL. Uzyskane wyniki pozwoliły na obliczenie umownej doraźnej gęstości poszczególnych egzemplarzy. Po przeprowadzeniu testów reologicznych wyznaczano wilgotność standardową metodą wagowo-suszarkową, utrzymując temperaturę 105°C przez 24 godziny. Wyniki pomiarów cech fizycznych badanych owoców przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości średnie wybranych cech fizycznych badanego materiału
Table 1. Average values of the selected physical properties of the investigated material

Odmiana owoców	Umowna gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Zawartość suchej masy [%]	Obciążenie [N]
Elena	864 ± 15	18	35
Oneida	869 ± 18	17	20
Presenta	844 ± 29	18	20
President	1035 ± 105	14	20
Top	840 ± 58	14	20
Węgierka Zwykła	821 ± 33	19	10

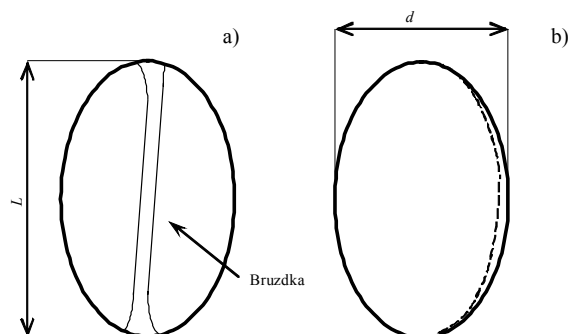
Źródło: badania własne

Badania przeprowadzono w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przeprowadzono test ściskania w kierunku osiowym i promieniowym z prędkością $5\cdot 10^{-5}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej typu Instron 5566 z głowicą tensometryczną o zakresie do 1 kN. Testy realizowano przy obciążeniu nieprzekraczającym 40% siły odpowiadającej wytrzymałości doraźnej, wyznaczonej na podstawie przeprowadzonych testów ściskania (rys. 1). Badania prowadzono dla dwóch kierunków obciążenia, co przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Wyznaczanie wytrzymałości doraźnej owocu odmiany Presenta

Fig. 1. Determining endurance of shear strength of Presenta fruit cultivar



Rys. 2. Rozmiary owoców dla kierunku przyłożonego obciążenia: osiowego (a) oraz promieniowego (b)

Fig. 2. Fruit sizes for the direction of the load applied: axial (a) and radial (b)

Wyniki badań

W tabelach 2 i 3 zestawiono średnie wartości parametrów modeli reologicznych, które zostały obliczone na podstawie równania (1). Analizowano wpływ wydłużania czasu obserwacji na zmiany wartości współczynników sprężystości E_1 i E_2 oraz współczynników lepkości η_1 i η_2 . Parametry modeli obliczono niezależnie dla każdego przedziału czasowego tego samego przebiegu zależności $\sigma(t)$.

Tabela 2. Zestawienie wartości parametrów czteroparametrowego modelu Maxwella w różnych przedziałach czasowych; test relaksacji naprężeń kierunek osiowy

Table 2. The list of parameter values of four-parameter Maxwell model in various time slots; test of stress relaxation axial direction

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Maxwella czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R^2
Elena	$\sim_1(0-300)$	5,0	115	1,3	1,8	0,992
	$\sim_2(0-600)$	4,5	213	1,4	3,5	0,990
	$\sim_3(0-900)$	4,3	301	1,5	5,2	0,990
	$\sim_4(0-1200)$	4,1	380	1,5	6,9	0,989
Oneida	$\sim_1(0-300)$	4,2	87	1,4	1,8	0,987
	$\sim_2(0-600)$	4,0	155	1,5	3,5	0,987
	$\sim_3(0-900)$	3,9	220	1,6	5,2	0,986
	$\sim_4(0-1200)$	3,8	281	1,7	6,7	0,986

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Maxwella czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R ²
Presenta	~ ₁ (0-300)	1,7	3276	6,3	0,1	0,987
	~ ₂ (0-600)	1,8	6456	6,1	0,2	0,986
	~ ₃ (0-900)	1,9	9459	6,1	0,3	0,985
	~ ₄ (0-1200)	1,9	12382	6,1	0,4	0,985
President	~ ₁ (0-300)	4,5	102	1,4	2,1	0,989
	~ ₂ (0-600)	4,1	173	1,5	4,1	0,988
	~ ₃ (0-900)	4,0	233	1,5	6,0	0,987
	~ ₄ (0-1200)	4,0	317	1,6	8,7	0,986
Top	~ ₁ (0-300)	3,8	820	1,5	1,7	0,991
	~ ₂ (0-600)	3,5	1417	1,6	3,5	0,987
	~ ₃ (0-900)	3,4	1968	1,7	5,4	0,986
	~ ₄ (0-1200)	3,4	2570	1,7	7,7	0,984
Węgierka Zwykła	~ ₁ (0-300)	1,7	2289	5,3	0,1	0,989
	~ ₂ (0-600)	1,8	4716	4,9	0,2	0,993
	~ ₃ (0-900)	1,9	7172	4,8	0,3	0,991
	~ ₄ (0-1200)	2,1	9441	5,9	0,5	0,990

Źródło: badania własne

Tabela 3. Zestawienie parametrów czteroparametrowego modelu Maxwella w różnych przedziałach czasowych; test relaksacji naprężeń kierunku promieniowy

Table 3. The list of parameters of four-parameter Maxwell model in various time slots; test of stress relaxation radial direction

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Maxwella czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R ²
Elena	~ ₁ (0-300)	4,2	77	1,2	1,9	0,985
	~ ₂ (0-600)	4,1	143	1,3	3,9	0,983
	~ ₃ (0-900)	3,9	208	1,3	5,9	0,982
	~ ₄ (0-1200)	3,9	277	1,3	7,8	0,981
Oneida	~ ₁ (0-300)	5,1	97	1,7	2,4	0,984
	~ ₂ (0-600)	4,9	176	1,8	4,8	0,987
	~ ₃ (0-900)	4,8	253	1,9	7,3	0,982
	~ ₄ (0-1200)	4,7	326	1,9	9,7	0,982
Presenta	~ ₁ (0-300)	6,3	113	1,7	3,3	0,984
	~ ₂ (0-600)	6,1	207	1,8	6,4	0,982
	~ ₃ (0-900)	6,8	386	2,7	10,2	0,987
	~ ₄ (0-1200)	6,1	388	1,9	12,4	0,980
President	~ ₁ (0-300)	3,8	89	1,2	1,8	0,989
	~ ₂ (0-600)	3,5	143	1,3	3,5	0,988
	~ ₃ (0-900)	3,4	191	1,1	5,1	0,987
	~ ₄ (0-1200)	3,3	249	1,4	7,0	0,986

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Maxwella czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R^2
Top	$\sim_1(0-300)$	4,3	106	1,3	1,7	0,989
	$\sim_2(0-600)$	3,9	180	1,5	3,4	0,990
	$\sim_3(0-900)$	3,7	245	1,5	5,2	0,989
	$\sim_4(0-1200)$	3,6	302	1,6	6,9	0,989
Węgiarka Zwykła	$\sim_1(0-300)$	6,0	134	1,6	2,2	0,991
	$\sim_2(0-600)$	5,4	255	1,7	4,3	0,990
	$\sim_3(0-900)$	5,1	354	1,8	6,4	0,990
	$\sim_4(0-1200)$	4,2	399	1,4	7,3	0,986

Źródło: badania własne

Zauważalne są zmiany wartości współczynników sprężystości E oraz współczynników lepkości η ze zmianą kierunku przyłożenia obciążenia, szczególnie dla odmiany Presenta. Charakterystyczne jest to, że przede wszystkim wartości współczynników lepkości znacznie różnią się między sobą, co jest konsekwencją doboru metody wyznaczenia współczynników równania przyjętego modelu [Bohdziewicz 2003b].

W tabelach 4 oraz 5 zestawiono średnie wartości parametrów reologicznych, obliczonych na podstawie równania (2).

Tabela 4. Zestawienie wartości parametrów czteroparametrowego modelu Kelvina-Voigta w różnych przedziałach czasowych; test pełzania kierunek osiowy

Table 4. The list of parameter values of four-parameter Kelvin-Voigt model in various time slots; creep test axial direction

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Kelvina- Voigta czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R^2
Elena	$\sim_1(0-300)$	2,4	395	5,8	0,07	0,998
	$\sim_2(0-600)$	2,1	637	4,3	0,08	0,999
	$\sim_3(0-900)$	1,9	884	3,6	0,09	0,999
	$\sim_4(0-1200)$	1,7	1302	3,0	0,1	0,999
Oneida	$\sim_1(0-300)$	1,8	33	0,7	0,1	0,999
	$\sim_2(0-600)$	1,3	35	0,6	0,2	0,999
	$\sim_3(0-900)$	1,1	38	0,5	0,3	0,999
	$\sim_4(0-1200)$	0,9	42	0,4	0,4	0,998
Presenta	$\sim_1(0-300)$	3,4	50	1,8	0,2	0,999
	$\sim_2(0-600)$	2,6	55	1,7	0,4	0,999
	$\sim_3(0-900)$	2,2	60	1,6	0,6	0,998
	$\sim_4(0-1200)$	2,0	65	1,5	0,8	0,998
President	$\sim_1(0-300)$	1,7	33	0,5	0,1	0,999
	$\sim_2(0-600)$	1,1	36	0,4	0,2	0,999
	$\sim_3(0-900)$	0,9	39	0,3	0,2	0,999
	$\sim_4(0-1200)$	0,9	39	0,3	0,2	0,999

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Kelvina- Voigta czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [GPa·s]	R ²
Top	~ ₁ (0-300)	2,6	47	1,0	0,2	0,999
	~ ₂ (0-600)	1,6	42	0,9	0,3	0,999
	~ ₃ (0-900)	1,6	54	0,8	0,4	0,999
	~ ₄ (0-1200)	1,5	58	0,7	0,5	0,999
Węgierka Zwykła	~ ₁ (0-300)	0,7	165	2,4	0,03	0,999
	~ ₂ (0-600)	0,6	234	1,8	0,04	0,999
	~ ₃ (0-900)	0,6	298	1,5	0,04	0,999
	~ ₄ (0-1200)	0,5	377	1,3	0,05	0,999

Źródło: badania własne

Tabela 5. Zestawienie parametrów modelu Kelvina-Voigta czteroparametrowego w różnych przedziałach czasowych; test pełzania kierunku promieniowy

Table 5. The list of parameters of four-parameter Kelvin-Voigt model in various time slots; creep test axial direction

Odmiana	Przedział czasowy ~ [s]	Model Kelvina-Voigta czteroparametrowy				
		E_1 [MPa]	η_1 [MPa·s]	E_2 [MPa]	η_2 [MPa·s]	R ²
Elena	~ ₁ (0-300)	0,9	162	3,7	76	0,998
	~ ₂ (0-600)	0,8	335	1,9	75	0,999
	~ ₃ (0-900)	0,8	424	1,7	76	0,999
	~ ₄ (0-1200)	0,7	504	1,5	79	0,999
Oneida	~ ₁ (0-300)	1,6	26	0,2	50	0,999
	~ ₂ (0-600)	1,0	29	0,2	65	0,999
	~ ₃ (0-900)	0,6	33	0,2	103	0,999
	~ ₄ (0-1200)	0,5	34	0,2	130	0,999
Presenta	~ ₁ (0-300)	2,4	29	1,5	202	0,999
	~ ₂ (0-600)	1,9	33	1,4	353	0,998
	~ ₃ (0-900)	1,7	36	1,4	492	0,997
	~ ₄ (0-1200)	1,5	40	1,4	660	0,996
President	~ ₁ (0-300)	1,4	25	0,7	149	0,999
	~ ₂ (0-600)	1,2	26	0,7	200	0,999
	~ ₃ (0-900)	1,0	29	0,6	281	0,668
	~ ₄ (0-1200)	0,9	32	0,6	382	0,997
Top	~ ₁ (0-300)	2,3	28	1,0	165	0,999
	~ ₂ (0-600)	1,6	34	0,9	305	0,998
	~ ₃ (0-900)	1,3	39	0,7	483	0,997
	~ ₄ (0-1200)	1,3	41	0,7	576	0,998
Węgierka Zwykła	~ ₁ (0-300)	0,5	101	1,1	17	0,999
	~ ₂ (0-600)	0,4	137	0,9	18	0,999
	~ ₃ (0-900)	0,4	184	0,7	19	0,998
	~ ₄ (0-1200)	0,4	220	0,7	22	0,998

Źródło: badania własne

Podczas testu pełzania obserwowany jest niejednakowy charakter zmian parametrów modelu, opisującego cechy reologiczne badanego materiału. W przypadku przyłożenia obciążenia w kierunku osiowym wartości współczynników sprężystości E oraz współczynników lepkości η znacznie się różnią od wyznaczonych dla kierunku promieniowego. Oznacza to niejednakowy przebieg deformacji owocu w obu kierunkach. Charakterystyczne jest także ściśle powiązanie wartości współczynnika lepkości od czasu trwania pomiaru.

Do zweryfikowania uzyskanych wyników w tabeli 6 zestawiono średnie wartości parametrów modelu empirycznego, obliczonych na podstawie równania (3). Parametry E_I oraz η_I opisują właściwości materiału, które wyznaczane są na podstawie przebiegu intensywności zanikania naprężenia bezpośrednio po osiągnięciu założonej wartości obciążenia ściskającego. Dane zawarte w trzech ostatnich kolumnach tabeli wiążą się z przebiegiem testu relaksacji naprężeń w dłuższym wymiarze czasu. Ponieważ różnice wartości parametrów w poszczególnych przedziałach czasowych nie są znaczne, zestawiono wyniki dla testu trwającego 1200 sekund.

Tabela 6. Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test relaksacji naprężeń w czasie 1200 sekund

Table 6. Average values of empiric model parameters; stress relaxation test in 1200 seconds

Odmiana	Kierunek	Parametry modelu					
		E_I [MPa]	η_I [GPa·s]	E_d [MPa]	Parametr a [-]	Parametr b [-]	R^2
Elena	osiowy	4,1	97	1,2	0,12	0,40	0,999
	promieniowy	2,1	46	1,5	0,17	0,42	0,999
Oneida	osiowy	3,2	37	1,4	0,15	0,43	0,999
	promieniowy	3,1	58	1,8	0,18	0,44	0,999
Presenta	osiowy	2,6	30	2,3	0,17	0,44	0,999
	promieniowy	2,5	45	2,4	0,20	0,44	0,999
President	osiowy	2,4	39	1,5	0,16	0,45	0,999
	promieniowy	2,1	34	1,4	0,13	0,48	0,999
Top	osiowy	3,2	81	1,4	0,13	0,48	0,999
	promieniowy	3,1	80	1,4	0,10	0,47	0,999
Węgierka Zwykła	osiowy	5,9	145	1,8	0,09	0,41	0,999
	promieniowy	4,2	94	1,6	0,10	0,42	0,999

Źródło: badania własne

Na podstawie zestawienia można zauważyć, że odpowiedź na obciążenie jest podobna dla obu kierunków w odniesieniu do owoców czterech odmian. Większe zróżnicowanie wartości parametrów E_I oraz η_I wykazują sliwki odmian Elena oraz Węgierka Zwykła.

Przebieg zjawiska pełzania w warunkach stałego naprężenia opisano przy wykorzystaniu formuły empirycznego równania 4. Wyniki obliczeń wartości współczynnika sprężystości E_I oraz współczynnika lepkości η_I zamieszczono w tabeli 7.

Tabela 7. Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test pełzania w czasie 1200 sekund
 Table 7. Average values of empiric model parameters; creep test in 1200 seconds

Odmiana	Kierunek	Parametry modelu					
		E_1 [MPa]	η_1 [GPa·s]	E_d [MPa]	Parametr a [-]	Parametr b [-]	R^2
Elena	osiowy	0,1	5,8	1,4	0,04	0,69	0,999
	promieniowy	0,1	3,3	0,6	0,02	0,77	0,999
Oneida	osiowy	0,1	1,2	0,4	0,03	0,71	0,999
	promieniowy	0,1	0,9	0,1	0,01	0,78	0,999
Presenta	osiowy	0,3	7,3	0,9	0,05	0,66	0,999
	promieniowy	0,3	7,3	0,7	0,06	0,63	0,999
President	osiowy	0,2	2,3	0,6	0,03	0,87	0,999
	promieniowy	0,1	2,3	0,4	0,04	0,68	0,999
Top	osiowy	0,2	3,3	0,5	0,03	0,65	0,999
	promieniowy	0,1	2,8	0,6	0,05	0,64	0,999
Węgierka	osiowy	0,04	0,5	0,4	0,03	0,62	0,999
Zwykła	promieniowy	0,02	0,2	0,2	0,04	0,57	0,999

Źródło: badania własne

Analogicznie, jak podczas testu relaksacji naprężeń na podstawie tabeli 7 można zauważyć, że istnieje uwarunkowanie zachowania się owoców odmian Elena i Węgierka Zwykła w zależności od kierunku przyłożonego obciążenia. Wynika to ze zróżnicowania grubości miąższu otaczającego pestkę owocu.

W celu określenia wpływu odmiany owoców śliwek na parametry wybranych modeli reologicznych uzyskane wyniki poddano wieloczynnikowej analizie wariancji na poziomie istotności $\alpha=0,05$. Wyniki przedstawiono w tabeli 8 dla testu relaksacji naprężeń oraz w tabeli 9 dla testu pełzania. Na podstawie analizy statystycznej nie stwierdzono istotnego wpływu odmiany na parametr E_1 w modelu empirycznym dla testu relaksacji naprężeń w kierunku promieniowym oraz dla η_1 w modelu Kelvina- Voigta dla testu pełzania w kierunku promieniowym. W przypadku pozostałych parametrów odmiana owoców miała istotny wpływ na stałe analizowanych modeli reologicznych.

Tabela 8. Wyniki analizy statystycznej (wartości p przy $\alpha=0,05$) dla testu relaksacji naprężeń
 Table 8. Results of statistical analysis (values p at $\alpha=0,05$) for the stress relaxation test

Parametry	Relaksacja naprężeń			
	Model Maxwell'a		Model empiryczny	
	Osiowo	Promieniowo	Osiowo	Promieniowo
E_1	0,000001	0,000001	0,000001	0,168491
η_1	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
E_2	0,000001	0,000001	-	-
η_2	0,000001	0,000001	-	-
E_d	-	-	0,000001	0,000389

Źródło: badania własne

Tabela 9. Wyniki analizy statystycznej (wartości p przy $\alpha=0,05$) dla testu pełzania
 Table 9. Results of statistical analysis (values p at $\alpha=0.05$) for the creep test

Parametry	Pełzanie			
	Model Kelvina-Voigta		Model empiryczny	
	Osiowo	Promieniowo	Osiowo	Promieniowo
E_1	0,000003	0,000009	0,008323	0,000064
η_1	0,000001	0,216976	0,000001	0,000001
E_2	0,000001	0,000002	-	-
η_2	0,000007	0,000001	-	-
E_d	-	-	0,000010	0,002050

Źródło: badania własne autorów

Podsumowanie

1. Zmiany obliczonych wartości współczynników sprężystości E oraz współczynników lepkości η przyjętych modeli Maxwella i Kelvina-Voigta w wybranych przedziałach czasowych mogą być konsekwencją skrócenia czasu realizacji testów reologicznych i zastosowanej metody determinacji wartości parametrów.
2. Do poprawnego wnioskowania na podstawie testów reologicznych niezbędne są obliczenia zmian parametrów przyjętych różnych modeli. Modele empiryczne charakteryzują się większą przydatnością do opisu zachowania się badanego materiału podczas testów. Na ich podstawie można stwierdzić, że największym zróżnicowaniem wartości współczynników E_1 oraz η_1 charakteryzowały się śliwki odmiany Elena oraz Węgierka Zwykła.

Bibliografia

- Bohdziewicz J.** (2003a): Analiza procesu pełzania tkanki mięszu buraka ćwikłowego. Część I. Płynięcie lepkosprężyste. *Acta Agrophysica*, 83, 11-20.
- Bohdziewicz J.** (2003b): Zmienność parametrów charakteryzujących zjawisko relaksacji naprężeń w tkance buraka ćwikłowego. *Acta Agrophysica*, 87, 33-43.
- Bohdziewicz J.** (2007): Modelowanie przebiegu odkształcenia tkanek parenchymy warzyw w warunkach quasi-statystycznych zmian obciążenia. Rozprawa habilitacyjna. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*. (557), ISSN 1897-208X.
- Bohdziewicz J. Czachor G.** (2010): Wpływ obciążenia na przebieg odkształceń warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 1(119), 85-91.
- Dobrzański jr. B. Rybczyński R.** (1999): Stress-strain relationship for fruit firmness estimation. *Acta Horticulture*, 485, 117-126.
- Klimek G.** (2005): Warszawski rynek śliwek w latach 1997-2004. *Zeszyty Naukowe Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa*, 13, 101-110.
- Makosz E.** (2002): Unowocześnić uprawę śliw [online], *Hasło Ogrodnicze*, 11. [dostęp 1-03-2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.ho.haslo.pl/index.php?rok=2002&numer=11>
- Plich H.** (1999): The effect of storage conditions and date of picking on storability and quality of some plum (*Prunus domestica* L.) fruit cultivars. *Acta Horticulturae* 485, 301-307.

Plich H. (2003): Wybrane zagadnienia dotyczące zbioru i przechowywania owoców śliw. materiały XLII Ogólnopolskiego zjazdu Sadowników, Skierniewice, 121-132.

Rybczyński R. Trembińska T. (2007): Wpływ preparatu Gibrescol na właściwości mechaniczne śliwek. Acta Agrophysica, nr 10(3), 687-694.

Terry P., Terry J.B. & Wolk A. (2001): Fruit and vegetable consumption in the prevention of cancer: an update. J. Intern. Med. 250: 280-290.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRUIT OF THE SELECTED CULTIVARS OF PLUM

Abstract. During cropping, transport and storing, plant material is subjected to both static and dynamic loads. It is related to possibility of mechanical damages, which constitute undesired effect in case of fruit for direct consumption. On the basis of rheological tests, families of stress and dislocation curves as the time function may be obtained. There has been no complex comparative study so far. Standard models of the research object are only discussed. It results from the research, which was carried out, that shortening the time of performance of rheological tests results in the change of the calculated values of standard models parameters. Empirical models are more useful for conclusions related to changes of E and η coefficient values.

Key words: plums, creep, stress relaxation, models

Adres do korespondencji:

Paskalis Grzemeski; e-mail: paskalis.grzemeski@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław