

WPŁYW WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ NA CIEPLNE WŁAŚCIWOŚCI JABŁEK

Helena Lisowa, Marek Wujec, Tadeusz Lis

Katedra Techniki Ciepłej, Akademia Rolnicza, ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

Streszczenie. Wykorzystując rozwiązanie równania przewodzenia ciepła Fouriera dla przypadku jego przepływu w nieograniczonym walcu przy liniowym źródle generującym krótkotrwały impuls cieplny zbudowano stanowisko badawcze, na którym wyznaczone zostały cieplne właściwości jabłek. Zbadano wpływ wilgotności względnej na współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik dyfuzji ciepła i objętościową pojemność cieplną owoców czterech odmian jabłoni w temperaturze 313 K (40°C).

Słowa kluczowe: cieplne właściwości jabłek

WYKAZ OZNACZEŃ

a, \bar{a} – współczynnik dyfuzji ciepła, jego średnia wartość, $m^2 \cdot s^{-1}$;
 c – masowa pojemność cieplna właściwa, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
 $(c\rho), (\bar{c}\rho)$ – objętościowa pojemność cieplna właściwa, jej średnia wartość, $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$;
 q_l – liniowe natężenie strumienia cieplnego, $W \cdot m^{-1}$;
 r – zmienna w kierunku promieniowym, m;
 r_o – odległość od liniowego źródła ciepła, m;
 t – temperatura, °C;
 T – temperatura bezwzględna, K;
 T_o – temperatura początkowa, K;
 ΔT – różnica temperatur, K;
 ΔT_{max} – maksymalny przyrost temperatury, K;
 ∇T – gradient temperatury, $K \cdot m^{-1}$;
 u – zawartość wody, $kg \cdot kg^{-1} \cdot s.m.$;
 u_o – początkowa zawartość wody, $kg \cdot kg_{s.m.}^{-1}$;
 w – wilgotność względna; $w = m_w \cdot m^{-1} \cdot 100, \%$;
 τ – czas, s;

τ_i – czas od początku do końca impulsu, s;
 τ_{max} – czas osiągnięcia maksymalnego przyrostu temperatury, s;
 ΔT_{max} , τ_o – czas trwania impulsu, s;
 λ , $\bar{\lambda}$ – współczynnik przewodzenia ciepła, średnia jego wartość, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
 φ_o , φ_λ , φ_w , φ_{cp} – współczynniki stosowane w metodzie impulsowej z liniowym źródłem ciepła [10].

WSTĘP

Wiedza o cieplnych właściwościach owoców jest potrzebna przy opracowywaniu technologii ich suszenia, jak również chłodzenia w procesie przechowywania. Cechy cieplne produktów decydują bowiem o nakładach energetycznych w procesach technologicznych. Nagrzewanie się surowca (np. w procesie suszenia) zależy od współczynnika dyfuzji ciepła, kształtu ciała, natężenia strumienia ciepła i cech czynnika będącego z nim w kontakcie, a dyfuzja ciepła jest ściśle związana z przewodnością cieplną i objętościową pojemnością cieplną właściwą.

Przy zmniejszaniu się zawartości wody na ogół liniowo zmniejsza się przewodność cieplna owoców, co stwierdzili: Sweat [18], Ramaswamy, Tung [14], Stankiewicz [16]. Dla szyszek chmielu wpływ zawartości wody na współczynnik przewodzenia ciepła ma charakter prostoliniowy a na współczynnik dyfuzji ciepła i ciepło właściwe ma charakter wielomianu trzeciego stopnia – Panas, Lis [13], natomiast wpływ wilgotności względnej na współczynnik przewodzenia ciepła i ciepło właściwe autorzy ci określili równaniami prostych. Lis [5] i Kolano [4] stwierdzili, iż zawartość wody ma istotny wpływ na cechy cieplne (odpowiednio warstwy pszenicy i bobiku), a zależności można wyrazić wielomianami drugiego stopnia (przy czym wykresami są parabole: dla przewodności i dyfuzyjności cieplnej odwrócone wierzchołkiem ku górze z ekstremum przy $u = 0,19 \text{ kg} \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$, a dla ciepła właściwego parabola jako funkcja rosnąca). Według Lozano i in. [11] wpływ zawartości wody na współczynnik przewodzenia ciepła jabłek w procesie suszenia można wyrazić w postaci eksponenty.

Zazwyczaj cieplne cechy jabłek wyznaczone były dla początkowej wilgotności owoców, zależnie od temperatury [10]. Podawane w literaturze wartości właściwości cieplnych jabłek (takich jak współczynnik przewodzenia ciepła, pojemność cieplna właściwa oraz współczynnik dyfuzji ciepła) niejednokrotnie znacznie różnią się między sobą. W tych samych warunkach ($T = 313 \text{ K}$, wilgotność 88%) współczynnik przewodzenia ciepła λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] wg JIjasowa i in. [2] ogólnie dla jabłek wynosi 0,537, dla odmiany Granny Smith według Lozano i in. [10] jest równy 0,490, a wg Ramaswamy i Tunga [14] ma wartość

0,467. Dla odmiany Golden Delicious wg Ramaswamy i Tunga [14] wynosi 0,479, a dla odmiany Jonagold wynosi 0,463 [7].

Zazwyczaj opublikowane wyniki badań nad właściwościami cieplnymi dotyczą niewielkiego przedziału wilgotności świeżych jabłek, a nie zmian od stanu surowca – do suszu.

Celem pracy było doświadczalne wyznaczenie cech cieplnych jabłek (współczynnika dyfuzji ciepła (a), przewodzenia ciepła (λ) i objętościowej pojemności cieplnej właściwej ($c\rho$) wybranych odmian jabłek, w zależności od poziomu wilgotności, od stanu surowca – do zupełnego wysuszenia.

MATERIAŁ I METODA BADAŃ

Materiałem badawczym były jabłka czterech odmian: Idared, Golden Delicious, Jonagold i Jonathan Red, dobranych z uwzględnieniem ich przydatności do suszenia [5] oraz ze względu na duże rozpowszechnienie w uprawach sadowniczych w Polsce.

Cieplne właściwości jabłek zostały wyznaczone metodą niestacjonarnych pól temperatury w walcu nieograniczonym, przy liniowym źródle ciepła, generującym krótkotrwały impuls cieplny – czyli metodą impulsową, opisaną w pracach [6,8,10]. Zastosowano rozwiązanie Łykowa [12] równania dyfuzji ciepła:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) \quad (1)$$

dla jego przepływu w walcu nieograniczonym przy następujących termicznych warunkach początkowo-brzegowych II rodzaju:

$$q_1 = \text{const dla } 0 < \tau \leq \tau_o \quad (2)$$

$$T(r = \infty, \tau) = T_o \quad (3)$$

$$T(r, \tau = 0) = T_o \quad (4)$$

gdzie: q_1 – natężenie liniowe strumienia cieplnego [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$], τ – czas [s], τ_o – czas trwania impulsu [s], T – temperatura [K], T_o – temperatura początkowa [K]. Ostatecznie uzyskano proste zależności o postaci:

$$a = \frac{r_o^2}{4 \cdot \tau_o} \cdot \varphi_a \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{q_1}{4 \cdot \Pi \cdot \Delta T_{\max}} \cdot \varphi_\lambda \quad (6)$$

gdzie: φ_a oraz φ_λ – współczynniki [1, 10] zależne od φ_o , których wartości miały zakres: $\varphi_o = 0,30-0,80$, $\varphi_\lambda = 0,132-0,650$ oraz $\varphi_a = 0,361-0,988$, przy czym

$$\varphi_o = \frac{\tau_o}{\tau_{\max}}, \quad (7)$$

$$\varphi_a = \frac{\varphi_o}{\frac{1-\varphi_o \cdot \ln \frac{1}{1-\varphi_o}}{\varphi_o \cdot \ln \frac{1}{1-\varphi_o}}}, \quad (8)$$

$$\varphi_\lambda = E_i \left(\frac{1}{\varphi_o} \cdot \ln \frac{1}{1-\varphi_o} \right) - E_i \left(\frac{1-\varphi_o}{\varphi_o} \cdot \ln \frac{1}{1-\varphi_o} \right), \quad (9)$$

$E_i(\beta)$ – całkowa funkcja charakterystyczna, β – zmienna pomocnicza.
Funkcja $E_i(\beta)$ jest zdefiniowana następująco:

$$-E_i(\beta) = \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-s)}{s} ds \quad (10)$$

gdzie: s – zmienna pomocnicza. Biorąc pod uwagę zależność o postaci

$$c \cdot \rho = \frac{\lambda}{a} \text{ otrzymano}$$

$$c \cdot \rho = \frac{q_1 \cdot \tau_o}{\Pi \cdot r_o^2 \cdot \Delta T_{\max}} \cdot \varphi_{cp} \quad (11)$$

$$\varphi_{cp} = \frac{\varphi_\lambda}{\varphi_a}, \quad (12)$$

gdzie: współczynniki φ_λ oraz φ_a [1,10].

W próbce o kształcie walca była umieszczana grzałka z drutu oporowego oraz w znanej odległości r_o „gorący koniec” termopary. Impuls cieplny wytwarzany przez grzałkę elektryczną wywoływał zmianę temperatury w próbce, która była mierzona termoparą i zapisywana na rejestratorze. Określając ΔT_{\max} (maksymalny wzrost temperatury spowodowany impulsem cieplnym) oraz czas τ_{\max} (po którym nastąpił maksymalny przyrost temperatury) wyznaczyliśmy ciepłe cechy jabłek.

Ze względu na wysoką wilgotność jabłek (które dość łatwo tracą wodę podczas pomiaru) metoda impulsowa w szczególnym stopniu nadaje się do badań właściwości cieplnych, gdyż krótki jest czas pomiaru (1 min) i wilgotność materiału nie zmienia się podczas jego trwania.

Do wyznaczania suchej masy służyła suszarka próżniowa. Pomiar masy przeprowadzono z dokładnością $\pm 0,001$ g.

Do określenia błędów pomiaru badanych wielkości cieplnych stosowano metodę logarytmicznego różniczkowania biorąc pod uwagę następujące błędy pomiaru: temperatury $|\Delta(\Delta T_{max})| = 0,01$ K, odległości termoelementu od liniowego źródła ciepła $|\Delta r_o| = 0,02$ mm, czasu, po którym nastąpił maksymalny przyrost temperatury $|\Delta T_{max} - \Delta \tau_{max}| = 0,5$ s, czasu trwania impulsu $|\Delta \tau_o| = 0,05$ s, oporu elektrycznego $|\Delta R| = 0,05$ Ω i długości drutu oporowego $|\Delta l| = 1$ mm.

Dla współczynników dyfuzji ciepła i przewodzenia ciepła maksymalny błąd względny był jednakowy i nie przekraczał 4,6% a dla objętościowego ciepła właściwego nie przekraczał 6,8%.

Wszystkie badane wielkości wyznaczone były dla dziesięciu poziomów wilgotności (uzyskiwanych poprzez odpowiednie wysuszenie) dla czterech odmian jabłek w stałej temperaturze 313 K (40°C) w 12 powtórzeniach.

WYNIKI I DYSKUSJA

Dla zbadania istotności wpływu wilgotności oraz odmiany na wartość współczynników cieplnych posłużono się metodą analizy wariancji dla podwójnej klasyfikacji krzyżowej, z różną liczbą obserwacji badanych cech w podklasie (tab.1). Wilgotność względna ($w = m_w \cdot m^{-1} \cdot 100\%$) wywiera istotny wpływ na wartości badanych cech cieplnych i dla każdej badanej wielkości wpływ jest na poziomie istotności $\alpha = 0,01$.

Dla współczynnika przewodzenia ciepła oraz dyfuzji ciepła stwierdziliśmy istotne różnice pomiędzy wszystkimi badanymi odmianami, a dla objętościowego ciepła właściwego (cp) nie stwierdziliśmy istotnych różnic jedynie pomiędzy odmianami Jonagold i Idared.

W tej samej temperaturze ($T = 313$ K, $t = 40^\circ\text{C}$) jabłka odmian o większej początkowej wilgotności miały też przed suszeniem wyższe wartości wszystkich badanych cech cieplnych. Wilgotność w jabłek odmiany Jonagold wynosiła 87,6%, Idared 85,2%, Golden Delicious 84,5% i Jonathan 84,3%.

Tabela 1. Analiza wariancji
Table 1. Analysis of variance

Źródło zmienności Size and source of variability (λ)	Stopnie swobody Degrees of freedom	$F_{obliczone}$ $F_{calculated}$	F_o $F_{0,05}$ $F_{0,01}$		Istotność Significance
Odmiana, Variety	3	170,247	2,62	3,83	**
Wilgotność względna (w) Relative humidity (w)	8	1743,093	1,96	2,55	**
Odmiana x wilgotność Variety x relative humidity	24	16,625	1,54	1,84	**
Błąd Error	395				
Źródło zmienności (a) Size and source of variability (a)	Stopnie swobody Degrees of freedom	$F_{obliczone}$ $F_{calculated}$	F_o $F_{0,05}$ $F_{0,01}$		Istotność Significance
Odmiana Variety	3	33,855	2,62	3,83	**
Wilgotność względna (w) Relative humidity (w)	8	272,091	1,96	2,55	**
Odmiana x wilgotność Variety x relative humidity	24	3,245	1,54	1,84	**
Błąd, Error	395				
Źródło zmienności (cp) Size and source of variability (cp)	Stopnie swobody Degrees of freedom	$F_{obliczone}$ $F_{calculated}$	F_o $F_{0,05}$ $F_{0,01}$		Istotność Significance
Odmiana Variety	3	295,985	2,62	3,83	**
Wilgotność względna (w) Relative humidity (w)	8	628,075	1,96	2,55	**
Odmiana x wilgotność Variety x relative humidity	24	13,545	1,54	1,84	**
Błąd Error	395				

F – test prawdopodobieństwa, test of probability,

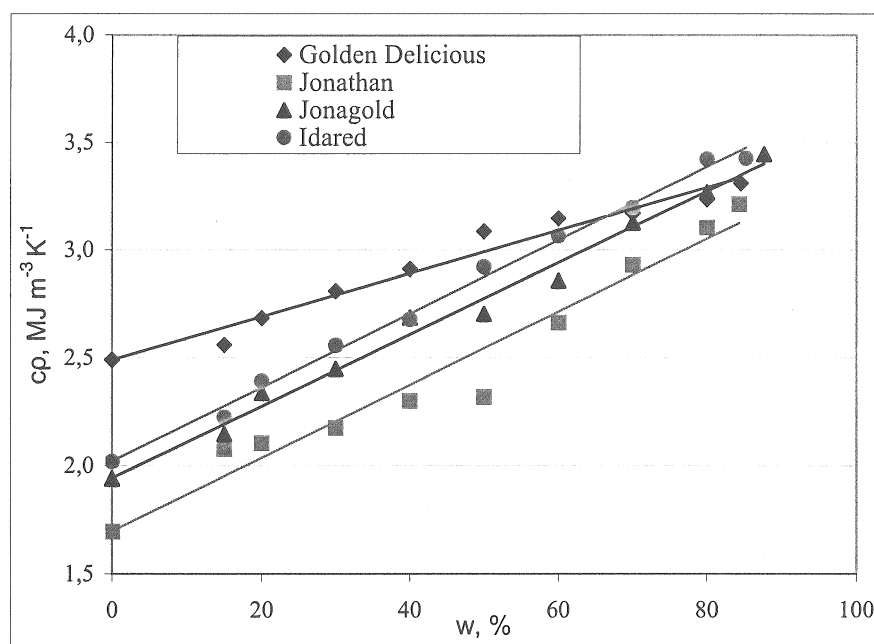
$F_{0,05}$, $F_{0,01}$ – wartość funkcji testowej z tablic F-Snedecora przy istotności na poziomie $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$, limit value of test-function from table of F-Snedecor distribution for level $\alpha = 0.05$, and $\alpha = 0.01$,

**istotność na poziomie $\alpha = 0,01$, significance at the level of $\alpha = 0.01$.

Dla stanu wilgotności surowca eksperymentalna wartość współczynnika przewodzenia ciepła [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] wynosiła: 0,395 dla odmiany: Jonathan, 0,408 dla Golden D., 0,426 dla Idared i 0,463 dla Jonagold. Dla jabłek były one zawsze niższe, niż dla chemicznie czystej wody, dla której współczynnik przewodzenia ciepła w tej samej temperaturze wynosi $0,627 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [17].

Przy wilgotności początkowej jabłek wartość współczynnika dyfuzji ciepła [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] wynosiła: dla odmiany Jonathan 1,229, Golden Delicious 1,234, Idared 1,257 i Jonagold 1,346. We wszystkich przypadkach (ze względu na początkową wilgotność jabłek w zakresie 84-88%) była ona znacznie niższa, niż dla czystej wody, dla której wynosi 2,48 [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

Dla stanu wilgotności surowca eksperymentalna wartość objętościowego ciepła właściwego [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$] wynosiła: dla odmiany: Jonathan 3213, Golden d. 3311, Idared 3425, Jonagold 2445. W tej samej temperaturze dla wody jest on znacznie wyższy, gdyż wynosi $4145,8 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$.



Rys. 1. Wpływ wilgotności na regresyjne i pomiarowe wartości objętościowej pojemności cieplnej jabłek

Fig. 1. Influence of relative humidity on the volumetric specific heat capacity

Wpływ wilgotności na badane cechy cieplne czterech odmian jabłek można wyrazić regresyjnymi równaniami liniowymi, przy czym ich wykresami są proste o dodatnich współczynnikach kierunkowych (tab. 2 – rys. 1). Mogą one służyć do obliczania przebiegu zmian cieplnych właściwości jabłek w procesie suszenia od stanu surowca do zupełnego wysuszenia. Każde równanie zostało wyznaczone na podstawie, co najmniej 100 pomiarów danej cechy – wartości współczynnika determinacji są wysokie ($R^2 = 0,96-0,99$). Ramaswamy i Tung [14] oraz Sweat [18] również stwierdzili funkcję prostoliniową dla tej zależności, jednakże dla małego zakresu wilgotności.

Tabela 2. Równania regresji ($t = 40^\circ\text{C}$)

Table 2. Regression equation ($t = 40^\circ\text{C}$)

Odmiana Variety	n	Równanie regresji Regression equation	R^2	$F_{\text{obliczone}}$ $F_{\text{calculated}}$	$F_{0,05}$	$F_{0,01}$	
Idared	119	$\lambda = 0,0033w + 0,1402$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,997	4617,0	3,93	6,86	**
Idared	119	$a = 0,0053\cdot w + 0,7787$ [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	0,993	238,7	3,93	6,86	**
Idared	119	$c\rho = 0,0171\cdot w + 2,0211$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,995	1480,2	3,93	6,86	**
Jonathan	107	$\lambda = 0,0028\cdot w + 0,1386$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,970	1381,6	3,93	6,88	**
Jonathan	107	$a = 0,0038\cdot w + 0,8954$ [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	0,996	2569,8	3,93	6,88	**
Jonathan	107	$c\rho = 0,0169\cdot w + 1,6975$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,958	809,1	3,93	6,88	**
Golden D.	100	$\lambda = 0,0024\cdot w + 0,1944$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,990	1833,9	3,94	6,90	**
Golden D.	100	$a = 0,0047\cdot w + 0,8125$ [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	0,984	1598,2	3,94	6,90	**
Golden D.	100	$c\rho = 0,01\cdot w + 2,4909$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,969	594,5	3,94	6,90	**
Jonagold	105	$\lambda = 0,0033\cdot w + 0,1469$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,987	2675,9	3,94	6,94	**
Jonagold	105	$a = 0,0054\cdot w + 0,8401$ [$10^7\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	0,959	831,4	3,94	6,94	**
Jonagold	105	$c\rho = 0,0166\cdot w + 1,9435$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,988	1270,0	3,94	6,94	**

**istotność na poziomie $\alpha = 0,01$ significance at the level of $\alpha = 0.01$.

Średnie wartości z pomiarów, w zakresie od stanu surowca do suchej masy, w temperaturze 40°C , zależnie od odmiany zmieniały się następująco:
współczynnik przewodzenia ciepła:

- Jonagold od 0,463 do 0,147 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- Idared od 0,426 do 0,140 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- Golden Delicious od 0,408 do 0,194 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

- Jonathan od 0,395 do 0,138 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

współczynnik dyfuzji ciepła:

- Jonagold od 1,3459 do 0,8388 [$10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],
- Idared od 1,2570 do 0,7853 [$10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],
- Golden Delicious od 1,2339 do 0,8108 [$10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],
- Jonathan od 1,2287 do 0,8958 [$10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

objętościowe ciepło właściwe:

- Jonagold od 3445 do 1941 [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$],
- Idared od 3425 do 2018 [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$],
- Golden Delicious od 3311 do 2491 [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]
- Jonathan od 3213 do 1696 [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$].

Wartości wyznaczone doświadczalnie są zbieżne z obliczonymi z równań regresyjnych.

Zróźnicowanie właściwości cieplnych zupełnie wysuszonego materiału w stosunku do stanu surowca badanych odmian jabłek było bardzo duże. Można to wytłumaczyć między innymi zastąpieniem wody powietrzem, gdyż porowatość wzrasta od 15 do ok. 55% oraz bardzo dużym wzrostem udziału suchej masy (od 8 do 44% [9]), a woda ma odmienne cechy cieplne od powietrza czy suchej masy. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła jest np. 2,4-krotnie mniejsza dla powietrza, niż dla ciekłej wody. Jeżeli chodzi o współczynnik dyfuzji ciepła, to dla powietrza jest on o 1,6 razy większy, niż dla wody.

Na rysunku 1 naniesione zostały punkty pomiarowe oraz linie uwzględniające wartości regresyjne (obliczone ze wzorów zestawionych w tab. 2). Widoczne jest, iż punkty pomiarowe w większości przypadków leżą na prostych regresji.

Wraz ze zmniejszającą się wilgotnością wszystkich badanych odmian jabłek zmniejsza się wartość objętościowej pojemności cieplnej, czyli ilość ciepła potrzebna na zmianę temperatury 1 m^3 suszonego materiału o 1 K. Woda wyróżnia się bowiem nadzwyczaj wysoką jej wartością, wynoszącą (w temperaturze 40°C) ($c\rho$)=4,1436 [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$], a jest zastępowana w procesie suszenia głównie przez powietrze, dla którego wartość ta jest 3742 razy mniejsza, gdyż dla powietrza [17] wynosi ($c\rho$)= 1,107 [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$].

Spośród badanych odmian, Golden Delicious cechuje się najwyższymi, a Jonathan – najniższymi wartościami objętościowej pojemności cieplnej w całym zakresie pomiarowym, co różnicuje ich tzw. akumulacyjność cieplną. Nie stwierdzono natomiast różnic pomiędzy odmianami Jonagold i Idared.

WNIOSKI

1. Dla jabłek czterech odmian (Jonagold, Idared, Golden Delicious i Jonathan Red) stwierdzono istotny wpływ wilgotności na współczynnik przewodzenia ciepła, dyfuzji ciepła i na objętościowe ciepło właściwe (na poziomie istotności równej $\alpha = 0,01$).

2. Wpływ wilgotności na cechy cieplne badanych odmian jabłek można wyrazić regresyjnymi równaniami liniowymi, przy czym ich wykresami są proste o dodatnich współczynnikach kierunkowych. Mogą one służyć do obliczania przebiegu zmian cieplnych właściwości jabłek od stanu surowca do zupełnego wysuszenia (w temperaturze równej 313 K).

PIŚMIENNICTWO

1. **Ginsburg A. S., Gromow M. A., Krasowskaja G. I.:** Thermophysical characteristics of agricultural products (in Russian). Piszczewaja Promyszlennost, Moskwa, 61, 1980.
2. **Iljasov S.G., Angersbach L.K., Angersbach N.I., Panin A.S.:** Thermophysical characteristics of agricultural products and vine (in Russian). Izv. Wuzov. Piščev. Technol., (4), 81-83, 1987.
3. **Kolano M.:** Właściwości cieplne nasion bobiku. Rozprawa doktorska. Akademia Rolnicza, Lublin 1987.
4. **Lis T.:** Charakterystyka właściwości cieplnych ziarna pszenicy. Rozprawa habilitacyjna. Akademia Rolnicza, Lublin, 1984.
5. **Lis H., Pakuła A., Pęczkowski K.:** Wpływ cech odmianowych na kinetykę suszenia i jakość suszu z jabłek Annales UMCS Lublin-Polonia, Sectio EEE, Vol. V, 53-63, 1997.
6. **Lis H., Lis T., Senyk J.:** Optimisation of the impulse method of the impulse method of thermal properties determination in agricultural product. 7th Int. Drying Symposium, CHISA 90, Praha, 27-31, 1990.
7. **Lis H., Wujec M., Lis T.:** Changes in the Thermophysical Properties of Apples in the Process of Drying. Annual Review of Agricultural Engineering, 2(1), 105-115, 2000.
8. **Lis H., Wujec M.:** Determination of Thermal Characteristics by the pulse Method. Annual Review of Agricultural Engineering, Polish Academy of Sciences, 2(1), 117-125, 2000.
9. **Lis M., Lis H.:** Wpływ procesu suszenia na gęstość wybranych odmian jabłek. Acta Agrophysica, 45, 131-142, 2001.
10. **Lis H., Wujec M., Lis T.:** Influence of temperature and variety on the thermal properties of apples. International Agrophysics, Vol. 16, 1, 43-52, 2002.
11. **Lozano J.E., Urbicain M. J., Rotstein R.:** Thermal conductivity of apples as a function of moisture content. Journal of Food Science, 44, 1, 198-199, 1979.
12. **Łykow A.W.:** The methods of calculation of thermal conductivity and thermal diffusivity (in Russian). Energija Moskwa, 181-187, 1973.
13. **Panas R., Lis H.:** Właściwości cieplne szyszek chmielu wyznaczone z uwzględnieniem ciepła oddychania. Roczniki Nauk Rolniczych, t. 76-C-1, 159-176, 1985.
14. **Ramaswamy H.S., Tung M. A.:** Thermophysical properties of apples in relation to freezing. Journal of Food Science, 46, 724-728, 1981.
15. **Ratti C., Mujumdar A.S.:** Fixed-bed batch drying of shrinking particles with time varying drying air conditions. Drying Technology, 11(6), 1311-1335, 1993.

16. **Stankiewicz K.:** Podstawowe właściwości termofizyczne surowców i przetworów owocowych i warzywnych. cz. I. Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny, nr 7, 17-19, 1990.
17. **Szargut J.:** Termodynamika. PWN, Warszawa; 1998, 339.
18. **Sweat V.E.:** Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. J.Food Science, 3, 1080, 1974.

INFLUENCE OF RELATIVE HUMIDITY
ON THE THERMAL PROPERTIES OF APPLES

Helena Lisowa, Marek Wujec, Tadeusz Lis

Department of Thermal Technology, University of Agriculture
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin, Poland

Abstract. Using the solution for Fourier's heat diffusion equation for the case of its flow in an unrestricted cylinder with linear source generating a short heat pulse, we determined the thermal properties of apples. The influence of relative humidity on the coefficient of thermal conductivity, thermal diffusivity and volumetric specific heat capacity of four apple varieties at the temperature of 313 K (40°C) was studied.

Keywords: thermal properties of apples

