

## WPLYW PROCESU SUSZENIA NA GĘSTOŚĆ WYBRANYCH ODMIAN JABŁEK

*M. Lis, H. Lis\**

Katedra Maszynoznawstwa i Inżynierii Przemysłu Spożywczego AR

\*Katedra Techniki Ciepłej AR

ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

**Streszczenie:** Gęstość suszonego ciała, składającego się z fazy ciekłej, stałej i lotnej, jest funkcją gęstości faz i ich objętościowych udziałów, co zostało zweryfikowane doświadczalnie. Dotychczas przyjmowano, iż gęstość zależy od bezwzględnej wilgotności masowej lub od wilgotności względnej. W procesie suszenia jabłek wystąpiło zmniejszanie objętościowego udziału wody i znaczny, prostoliniowy spadek gęstości.

**Słowa kluczowe:** skurcz suszarniczy gęstość owoców w czasie suszenia

### OZNACZENIA

$A$  - powierzchnia [ $m^2$ ],

$a, b, n$  - współczynniki,

$g_i$  - udział masowy określonej fazy lub składnika ( $i$ ),

$m$  - masa [ $kg$ ],

$p$  - ciśnienie [ $Pa$ ],

$p_w$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

$p_g$  - ciśnienie gazu suchego,

$R_g$  - indywidualna stała gazowa dla powietrza suchego ( $278,03 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),

$R_w$  - indywidualna stała gazowa dla wody ( $461,52 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),

$r_i = v_i / v$  - udział objętościowy fazy ( $i$ ),

$T$  - temperatura [ $K$ ],

$u$  - wilgotność bezwzględna masowa (zawartość wody) [ $kg \cdot kg^{-1}$ ].

$w$  - wilgotność względna surowca [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],

$\rho$  - gęstość [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ], [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$V_{w+s+g}$  - objętość właściwa z pomiaru, obejmująca wszystkie stany skupienia [ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ],

$\varphi$  - wilgotność względna powietrza,

Indeksy:

$g$  - dla suchych gazów w powietrzu wilgotnym,

$s$  - dla suchego ciała stałego,

$o$  - dla stanu początkowego,

$w+s+g$  - dla wody, suchej masy i gazu (z pomiaru - dla całkowitej objętości),

$1+x$  - dla wilgotnego powietrza w porach (dla 1 kg powietrza suchego, łącznie z przypadającą masą pary wodnej – równą wilgotności bezwzględnej  $x$  [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  p.s.]).

#### WSTĘP

Proces suszenia zależy w znacznym stopniu od zmian właściwości termofizycznych surowca. Zmiany objętości suszonych pieczarek w zależności od zawartości wody określił Murakowski [6] przy pomocy funkcji o postaci

$$\frac{V}{V_0} = \frac{u + \frac{\rho_w}{\rho_s * u_0}}{1 + \frac{\rho_w}{\rho_s * u_0}}, \quad (1)$$

sformułowanej przy założeniu, iż zmiana objętości suszonej cząstki jest równa objętości wyparowanej wody. Inni badacze [7,10] są zdania, iż skurcz suszarniczy jest najczęściej mniejszy od ilości odparowanej wody. Według Pabisa [8] skurcz suszonych owoców i warzyw może być uważany za ich właściwość fizyczną. Jaros [1] skurcz suszarniczy zdefiniowała jako

$$S = 1 - b = 1 - (V/V_0). \quad (2)$$

Lozano i in. [5], stwierdzili, że początkowa gęstość surowca w stosunku do gęstości suchej masy zawiera się w granicach

$$0,7 \leq \frac{\rho_0}{\rho_s} \leq 1,0.$$

Według innych badaczy [2-4] stosunek gęstości świeżych jabłek do gęstości ich suchej masy wynosi ok. 1,3.

Lozano i in. [5] gęstość jabłek odmiany Granny Smith wyrazili zależnością regresyjną o postaci

$$\rho = 102 \ln u + 636 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}. \quad (3)$$

Lisowa, Lis i Mazurek [2] uzyskali analogiczne zależności dla jabłek suszonych w temperaturze 60°C, przy czym dla odmiany Golden Delicious zależność ma postać

$$\rho = 102,26 \ln (u/u_0) + 879,92 \text{ [kg m}^{-3}\text{]} \quad R^2 = 0,9999, \quad (4)$$

a dla odmiany Jonagold:

$$\rho = 82,666 \ln (u/u_0) + 868,76 \text{ [kg m}^{-3}\text{]} \quad R^2 = 0,9917 \quad (5)$$

Cel pracy obejmował sformułowanie teoretycznych wzorów na gęstość ciała zawierającego trzy stany skupienia oraz wzorów na udziały objętościowe tych stanów, jak również ich zweryfikowanie na podstawie wyników badań. Badano zmiany objętości i gęstości krążków jabłek dwóch odmian podczas suszenia konwekcyjnego oraz przebieg zmian objętościowych udziałów wody, suchej masy i gazu.

#### GĘSTOŚĆ WIELOFAZOWYCH CIAŁ W UJĘCIU TEORETYCZNYM ORAZ METODYKA BADAŃ

Gęstość ciała zawierającego swobodnie związaną ciekłą wodę, fazę stałą i gazową, o masie równej odpowiednio:  $m_w$ ,  $m_s$  i  $m_g$  oraz o objętości  $V_w$ ,  $V_s$  i  $V_g$  wynosi

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_w + m_s + m_g}{V} = \frac{\frac{m_w}{V_w} \cdot V_w + \frac{m_s}{V_s} \cdot V_s + \frac{m_g}{V_g} \cdot V_g}{V}, \quad \rho = \rho_w \frac{V_w}{V} + \rho_s \frac{V_s}{V} + \rho_g \frac{V_g}{V},$$

a po zastosowaniu udziałów objętościowych

$$r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V_i}{V_w + V_s + V_g}, \quad (6)$$

gęstość wielofazowego ciała może być wyznaczana ze wzoru ogólnego o postaci

$$\rho = \sum_i \rho_i r_i. \quad (7)$$

Zgodnie ze wzorem (7), gęstość ciała zawierającego fazę stałą (suchą masę), ciekłą (wodę) oraz gazową (wewnątrz komórek i w przestrzeniach międzykomórkowych np. jabłka), jest funkcją gęstości poszczególnych faz i ich udziałów objętościowych. Dla ciała zawierającego fazę gazową suma udziałów objętościowych jest równa jedności jedynie w warunkach stałej temperatury i ciśnienia podczas badań:

$$r_w + r_s + r_g = 1. \quad (8)$$

Objętościowe udziały wody, suchej masy i wilgotnego powietrza w próbce o jednostkowej masie obliczone zostały z następujących własnych wzorów o postaci:

$$\frac{v_w}{v} = r_w = \frac{g_w \cdot \rho_{w+s+g}}{\rho_w}. \quad (9)$$

Przy czym udział masowy wody  $g_w = w = m_w \cdot m^{-1}$ .

$$\frac{v_s}{v} = r_s = \frac{1 - g_w}{\rho_s} = \frac{(1 - g_w) \cdot \rho_{w+s+g}}{\rho_s} \quad (10)$$

$$r_{l+x} = \frac{v_{l+x}}{v} = \frac{1}{\rho_{w+s+g}} \left[ \frac{g_w}{\rho_w} + \frac{(1 - g_w)}{\rho_s} \right] = 1 - (r_w + r_s). \quad (11)$$

Gęstość surowca podczas procesu suszenia obliczana była z własnego wzoru o postaci:

$$\rho = \rho_w \cdot r_w + \rho_s \cdot r_s + \rho_{l+x} r_{l+x}. \quad (12)$$

Surowiec suszony był w formie krążków o promieniu 1 cm i grubości 0,4 cm w temperaturze 50°C, przy prędkości przepływu 1 m/s. Dla 10 poziomów wilgotności (w 12 powtórzeniach) mierzona była objętość całkowita (obejmująca wszystkie stany skupienia), średnich prób (każda z 45 krążków) lakierowanych i zanurzanych w oleju roślinnym, w stałej temperaturze). Objętość mierzona była wg własnej metodyki, w strzykawkach lekarskich o pojemności 100 ml, które pozwalały dokładnie zmierzyć objętość próbek w pełni zanurzonych w oleju, jak również usunąć pęcherzyki powietrza tkwiące w oleju - poprzez wstrząsy w aparacie wibracyjnym. Ponadto wyznaczana była gęstość suchej masy: bez lakierowania próbek - w piknometrze. Do wyznaczania wilgotności służyła suszarka próżniowa. Pomiar masy przeprowadzono z dokładnością  $\pm 0,001\text{g}$ , a objętości  $\pm 0,1$  ml. Względny błąd maksymalny wynosił odpowiednio 0,01% i 1%. We wszystkich eksperymentach stwierdzono jedynie błędy przypadkowe. Liczony był błąd średniej arytmetycznej, co pozwoliło określić prawdopodobieństwo z jakim zostały wyznaczone badane wielkości, które mieści się w zakresie od 0,997 do 0,999. Gęstość wody w zależności od temperatury odczytana została z tablic [9].

Gęstość wilgotnego powietrza w porach została obliczona z własnego wzoru dla stałych, klimatyzowanych warunków, w jakich wykonywany był pomiar objętości surowca (40°C, wilgotność względna powietrza 10%, ciśnienie ok. 1 bar) biorąc pod uwagę, iż:

$$pV = mRT \rightarrow \frac{m}{V} = \frac{p}{RT} = \rho. \quad (13)$$

Dla 1 kg gazu suchego (indeks g) i pary wodnej w ilości x [kg/kg<sub>g</sub>] (indeks w), czyli dla 1+x:

$$\rho_{1+x} = \rho_g + \rho_w = \left[ \frac{p_g}{R_g \cdot T} + \frac{p_w}{R_w \cdot T} \right] \left[ \frac{1+x}{m^3} \right]. \quad (14)$$

$$\rho_{1+x} = \left[ \frac{p_g}{R_g} + \frac{p_w}{R_w} \right] \cdot \frac{1}{T} \left[ \frac{1+x}{m^3} \right]. \quad (15)$$

Ciśnienie bezwzględne jest sumą ciśnień cząstkowych

$$p = p_g + p_w \rightarrow p_g = p - p_w \quad (16)$$

a wilgotność względna powietrza  $\varphi$  zależy od ciśnienia cząstkowego i ciśnienia nasycenia:

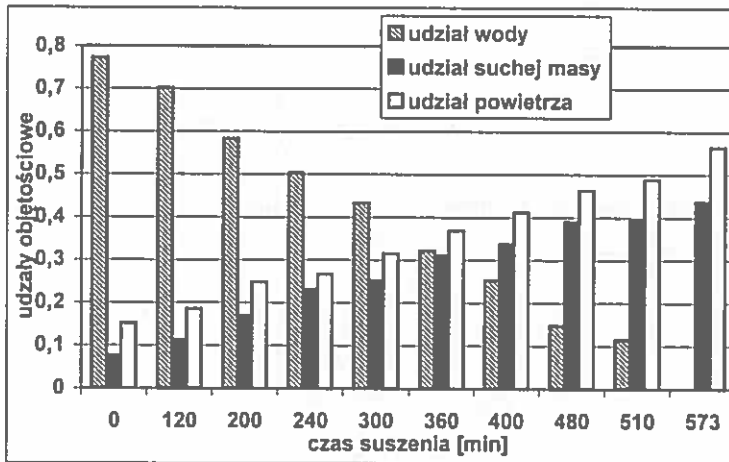
$$\varphi = \frac{p_w}{p_w^n} \rightarrow p_w = \varphi \cdot p_w^n, \quad (17)$$

wobec tego ciśnienie suchych gazów wynosi

$$p_g = p - \varphi \cdot p_w^n. \quad (18)$$

### WYNIKI BADAŃ, ICH ANALIZA I DyskusJA

W jabłkach odmiany Jonagold sport Jonagored - suszonych od wilgotności 87%, do zupełnego wysuszenia, zmieniał się udział objętościowy (rys.1): wody od 77,2% do zera, suchej masy od 7,6% do 43,6% i powietrza od 15,2% do 56,4%. Dla odmiany Idared ( $w_o=86,3\%$ ) udział objętościowy wody zmieniał się od 69,2% do zera, suchej masy od 7,3% do 38,7% oraz powietrza od 23,5% do 61,3% (rys 1). Niewielkie różnice pomiędzy odmianami wynikają ze zróżnicowania wilgotności początkowej i gęstości pomiarowej  $\rho_{w+s+g}$ , która podczas su-



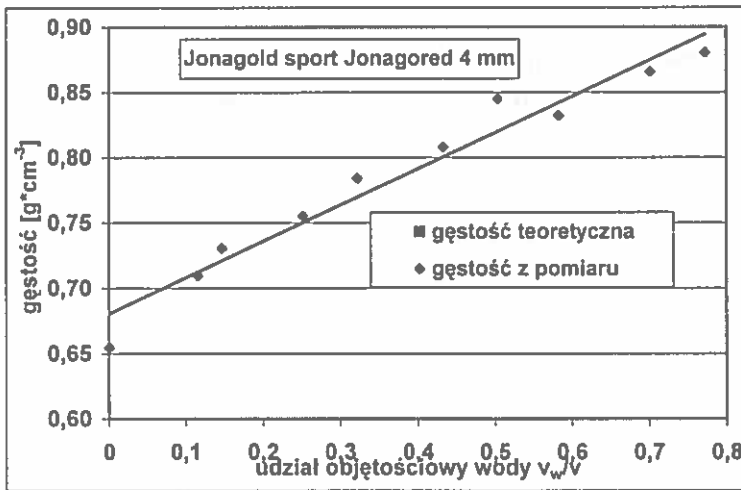
Rys. 1. Wpływ czasu suszenia jabłek (Jonagold sport Jonagored) na udziały objętościowe:  $(v_w/v)$ ,  $(v_s/v)$  i  $(v_{1+x}/v)$ .

Fig. 1. Influence of drying time of apple (Jonagold sport Jonagored) on the volume fraction:  $(v_w/v)$ ,  $(v_s/v)$  and  $(v_{1+x}/v)$ .

szenia odmiany Jonagold zmniejszała się od 0,8804 do 0,6546 g·cm<sup>-3</sup>, a Idared od 0,769 do 0,581 g·cm<sup>-3</sup>. Gęstość suchej masy w obu przypadkach wynosiła  $\rho_s = 1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a powietrza w porach  $\rho_{1+x} = 0,001109 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

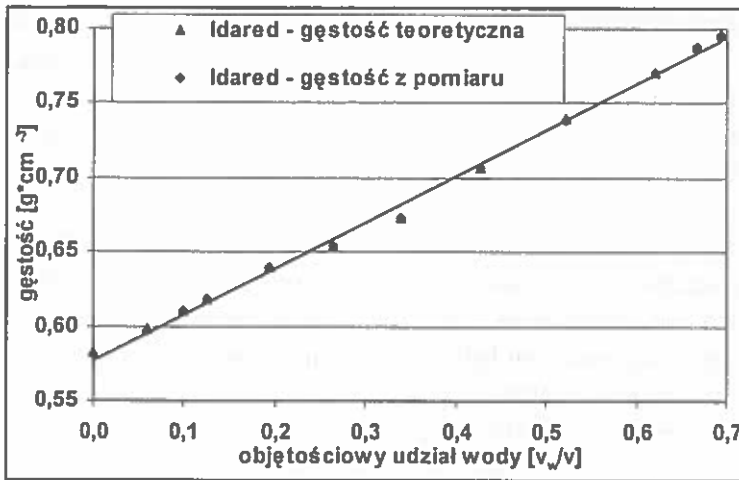
Dla odmiany Jonagold gęstość teoretyczna zmniejszała się od 0,8806 do 0,6552 g·cm<sup>-3</sup>, a doświadczalna od 0,8804 do 0,6546 g·cm<sup>-3</sup> (rys. 2), dla Idared odpowiednio od 796 do 582 kg·m<sup>-3</sup> i od 796 do 581 kg·m<sup>-3</sup> (rys.3). Wystąpiła bardzo dobra zgodność wartości gęstości obliczonych ze wzoru (12) i wyznaczonych doświadczalnie. Wniosek ten jest podstawą do matematycznego modelowanie zmian poszczególnych faz i gęstości w procesie suszenia surowców roślinnych, przy ograniczeniu badań eksperymentalnych do podstawowych wielkości zawartych we wzorach 9-12 i 15.

Stosunek gęstości surowca do gęstości suchej masy wynosił dla odmiany Jonagold 1,34 i Idared 1,37. Według badań Lozano [5] stosunek gęstości początkowej surowca do gęstości suchej masy zawiera się w granicach  $0,7 \leq (\rho_0/\rho_s) \leq 1$ , co nie zostało potwierdzone dla jablek.



Rys. 2. Wpływ objętościowego udziału wody na gęstość jablek.

Fig. 2. Influence of volume water fraction on apple density.



Rys. 3. Wpływ objętościowego udziału wody na gęstość jabłek.

Fig. 3. Influence of volume water fraction on apple density.

Po pełnym wysuszeniu objętość względna  $v/v_0$  jabłek (odmiany Jonagold) zmniejszyła się o od 100% do 17,3% (o 82,7%), udział objętościowy wody  $v_w/v$  zmniejszył się o 77,2%, a zawartość wody o 100%, czyli zróżnicowanie wynosiło:

$$\left( \Delta \frac{v}{v_0} - \Delta \frac{v_w}{v} \right) \cdot 100 = 82,7\% - 77,2\% = 5,5\%$$

$$\left( \Delta \frac{v}{v_0} - \Delta \frac{u}{u_0} \right) \cdot 100 = 82,7\% - 100\% = -17,3\%$$

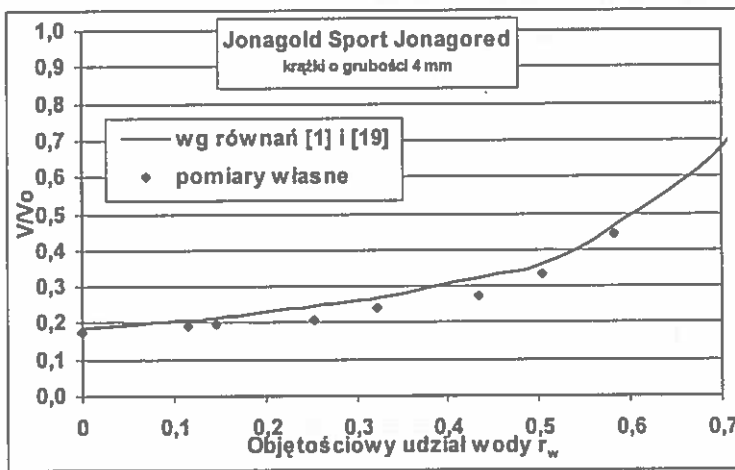
Dla skrajnych danych procesu suszenia zmniejszenie objętości surowca było większe o 5,5% od  $v_w/v$  wyparowanej wody, jak również było o 17,3% mniejsze od zmian  $u/u_0$  (a więc podobnie jak w pracy [7]). Wniosowanie takie jest jak widać sprzeczne ze sobą, gdyż zależy od wielkości jakie wyrażają stan nawilgocenia materiału. Ponadto opiera się ono na pomiarach najmniej pewnych – stanu zupełnie suchego, uzyskanego po dodatkowym suszeniu próbki w wysokiej temperaturze. Znacznie pewniejsze jest wyznaczenie wartości współczynnika korelacji pomiędzy badanymi wielkościami.



Dla całego przebiegu suszenia skurcz suszarniczy jest istotnie skorelowany z udziałem objętościowym wody (dla Jonagolda:  $R=0,9993$ , na poziomie istotności 0,01). Nie jest to jednak zależność liniowa, ale można ją opisać dwoma równaniami: (1) i (19) o jednakowym i bardzo wysokim współczynniku determinacji. Własne równanie ma postać

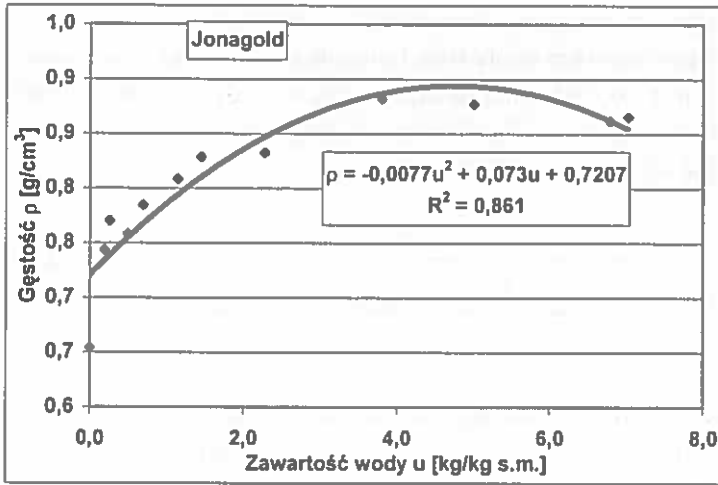
$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{\left(-1,14348 \cdot \frac{v_w}{v} + 2,098954\right)^2 + 10,43147}, \quad R^2=0,9986, \quad (19)$$

a zależność (1) Murakowskiego [6] dla jabłek sprawdza się bardzo dobrze w przypadku gęstości wyznaczonej z uwzględnieniem objętości fazy stałej i gazowej – rys.4.



Rys. 4. Wpływ objętościowego udziału wody na  $v/v_0$  wg równań (1) i (19).  
 Fig. 4. Influence of volume water fraction on the the  $v/v_0$  according to eqal (1) and (19).

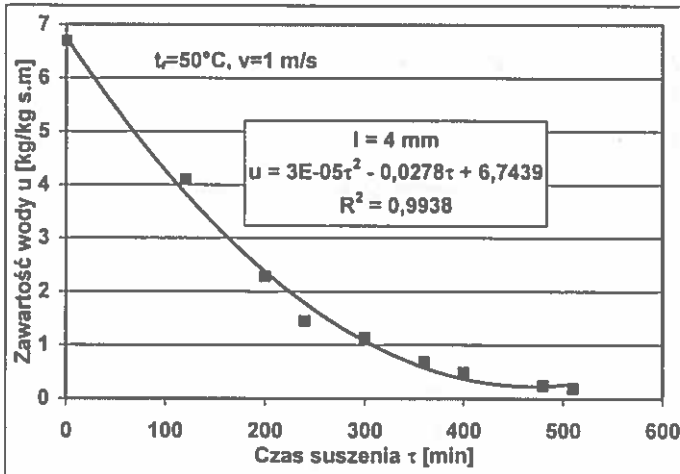
Podana na rysunku 5 zależność gęstości jabłek odmiany Jonagold (sportu Jonagored) od zawartości wody ma nieco inny przebieg, niż podana przez Lozano in. [5] dla odmiany Granny Smith. Sport Jonagored nieco się różni od owoców tej odmiany nie posiadających rumieńca [3].



Rys. 5. Wpływ zawartości wody na gęstość jabłek.

Fig. 5. Influence of water content on apple density.

Wpływ czasu suszenia jabłek na wilgotność bezwzględną masową może mieć charakter wielomianu drugiego stopnia ( $R^2 = 0,9938$ ). Zmiany właściwości fizycznych jabłek są ściśle związane z przedstawionym na rysunku 6 przebiegiem procesu suszenia.



Rys. 6. Przebieg krzywej suszenia jabłek odmiany Jonagold.

Fig. 6. Course of drying curve of apples of the Jonagold apples.

## WNIOSKI

1. Sformułowano teoretyczne wzory na: gęstość ciała zawierającego trzy stany skupienia oraz na udziały objętościowe tych stanów, jak również pozytywnie zweryfikowano je na podstawie wyników badań jabłek dwóch odmian podczas suszenia konwekcyjnego.
2. Wystąpiła bardzo dobra zgodność wartości gęstości obliczonych z teoretycznego wzoru i wyznaczonych doświadczalnie, a to może być podstawą do matematycznego modelowania zmian poszczególnych faz i gęstości w procesie suszenia surowców roślinnych, przy ograniczeniu badań eksperymentalnych do podstawowych wielkości zawartych we wzorach 9-12 i 15.
3. Skurcz suszarniczy ( $v/v_0$ ) jest istotnie skorelowany z udziałem objętościowym wody ( $v_w/v$ ) w suszonym surowcu, a zależność (19) jest typu wykładniczego.

## PIŚMIENNICTWO

1. Jaros M.: Kinetyka suszenia warzyw. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, 1999.
2. Lisowa H., Lis T., Mazurek T.: Zmiany gęstości jabłek w procesie suszenia. VIII Konferencja naukowo - techniczna MUPS, Białystok - Białowieża, 251 - 260, 1998.
3. Lisowa H., Lis T.: Gęstość suszonych ciał jako funkcja objętościowych udziałów i gęstości faz. Inżynieria Rolnicza nr 4 (10), 227-234, 1999.
4. Lisowa H., Wujec M., Lis T.: Changes in the Thermophysical Properties of Apples in the Process of Drying. Annual Review of Agricultural Engineering, V. 2/1, 105- 115, 2000.
5. Lozano J. E., Rotstein R., Urbicain M.J.: Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. J. of Food Science, v. 48, 1497-1502, 1983.
6. Murakowski J. : Suszenie pieczarek w warunkach konwekcji naturalnej - modelowanie pierwszego okresu suszenia. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z. 417, 35 - 50, 1994.
7. Nowak D., Witrowa-Rajchert D., Lewicki P.P.: Skurcz objętościowy i zmiana gęstości marchwi i ziemniaka podczas suszenia konwekcyjnego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 454, 461-468, 1998.
8. Pabis S.: Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z. 417, 15-34, 1994.
9. Rażnjević K. Tablice cieplne z wykresami. WNT Warszawa, s.86. 1966.
10. Ratti C. J. Food Enging. 23, 1994.

## INFLUENCE OF DRYING PROCESS ON DENSITY CHANGES OF SELECTED APPLE VARIETIES

*M. Lis, H. Lis\**

Department of Food Engineering and Machinery, \*Chair of Thermal Technology  
Agricultural Academy  
Doświadczalna 44, 20-236 Lublin

**Summary:** The density of dried body which consists of the liquid, solid and volatile phase, is a function of the phases densities and their volume fractions, what had been verified experimentally. Until now it was assumed that the density depends on the moisture contents, dry or wet basis. In the process of drying apples the decrease of water volume fraction and considerable rectilinear drop of the density were observed.

**Keywords:** density of dried fruits