

CECHY TERMOFIZYCZNE I SUSZARNICZE ZIARNA KUKURYDZY

Eugeniusz Kamiński

Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR we Wrocławiu

Intensywność konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych zależy między innymi od właściwości fizycznych i cieplnych suszonych elementów. Znajomość tych właściwości jest niezbędną przy formułowaniu modeli matematycznych różnych sposobów suszenia. Zaliczyć tu należy takie cechy właściwe surowców suszarniczych jak: ciepło właściwe, przewodność cieplna suszonej warstwy i elementów tej warstwy, współczynnik dyfuzji ciepła, współczynnik dyfuzji masy, gęstość, gęstość usypowa, porowatość złoża i inne.

W Instytucie Mechanizacji Rolnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu podjęto badania, których celem było wyznaczenie wartości niektórych z tych cech, a także znalezienie związku między tymi wartościami a wilgotnością.

CIEPŁO WŁAŚCIWE

Ciepło właściwe masowe, zdefiniowane jest jako ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury masy jednego kilograma substancji o 1 K. Na ogół ilość ta jest funkcją temperatury, w zakresie której ten wzrost się odbywa. Ciepło właściwe więc opisywane jest równaniem:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$$

gdzie:

Q - ilość ciepła,

T - temperatura.

Dla niektórych materiałów jak np. metale zmienia się ono z temperaturą nieznacznie (np. dla ołowiu $c \Big|_{173^{\circ}\text{K}}^{273^{\circ}\text{K}} = 0,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$, $c \Big|_{273^{\circ}\text{K}}^{373^{\circ}\text{K}} = 0,131 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$). Wydaje się jednak, że dla wilgotnych ma-

teriałów organicznych, jakimi są produkty rolne temperatura ma większy wpływ na ciepło właściwe. Do takich wniosków prowadzą np. badania przeprowadzone przez Koschatzky'ego [8]. Ciepło właściwe wilgotnych ciał stałych zależy od zawartej w nich wody. Zwracało na to uwagę wielu badaczy, którzy zajmowali się tym problemem [1-6] i inni.

Niektórzy z nich [4] proponują zależność:

$$C_u = C_s + u \quad (1)$$

gdzie:

C_u - ciepło właściwe produktu o zawartości wody u ,

C_s - ciepło właściwe suchej masy produktu.

Wychodząc z założenia, że ciepło właściwe wody jest równe $1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$, Jegorow i Ljubuszkin [4] proponują dla ziarna kukurydzy równanie:

$$C_u = 0,267 + u \quad (2)$$

Nikitina [10] zwróciła uwagę na to, że woda zawarta w komórkach różni się właściwościami od wody swobodnej, co czyni kontrowersyjnym równanie (1). Na niezgodność tego równania z wynikami badań dla materiałów o dużej wilgotności zwrócił również uwagę Kamiński [5], badając ciepło właściwe ziemniaków, dla których znalazł formułę empiryczną w postaci:

$$C_u = C_s + 0,72 \frac{u}{1 + u} \quad (3)$$

lub

$$C_w = C_s + 0,0072 w \quad (4)$$

gdzie:

C_w - ciepło właściwe ziemniaków o wilgotności w .

Podawane przez różnych badaczy dane, dotyczące ciepła właściwego ziarna kukurydzy różnią się od siebie dość znacznie. Wynika to między innymi stąd, że różni autorzy badali je różnymi metodami, a więc popełniali różny błąd pomiarowy, a także badali różne odmiany. Różne odmiany posiadają nieraz dość zróżnicowaną budowę i skład chemiczny. W szczególności zaś woda zawarta w komórkach przy wyższych jej zawartościach może mieć różne własności cieplne (różne ciśnienia kapilarne). Według badań autora wpływ odmiany na ciepło właściwe przy wyższych wilgotnościach jest widoczny.

Koschatzky [8] badał ciepło właściwe ziarna kukurydzy odmiany Velox, Jura 258 i Brillant metodą kalorymetryczną. Badaniem ciepła właściwego ziarna kukurydzy Yellow Dent metodą kalorymetryczną zajmowali się również Kazarian i Hall [7].

Ginzburg [2] znalazł zależność ciepła właściwego suchej masy ziarna kukurydzy od temperatury w postaci:

$$c_s = 0,2775 + 0,00085 t \quad \text{w} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}} \quad (5)$$

gdzie:

t - temperatura w $^{\circ}\text{C}$ ($1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ}$).

Autor badał ciepło właściwe ziarna pięciu krajowych mieszańców kukurydzy a mianowicie: 72 k x F 115, W 33 x F 115, F 7 x EP 1, W 33 x EP 1 i KBep x 142, wyhodowanych w Stacji Hodowli Roślin w Kobierzycach w woj. wrocławskim. Badania przeprowadzono metodą kalorymetryczną, a uzyskane ciepło właściwe dotyczy zakresu temperatur 292-294 K (ok. 19-20 $^{\circ}\text{C}$). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

T a b e l a 1

Wartości ciepła właściwego 5 mieszańców

Mieszaniec	Ciepło właściwe suchej masy		wsp. a	wsp. b
	$\frac{\text{k J}}{\text{kg K}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$		
72k x F115	1,176	0,281	0,04	1,29
W33 x F115	1,332	0,318	0,02	1,63
F7 x EP1	1,123	0,268	0,03	1,55
W33 x EP1	1,130	0,270	0,03	1,48
KBexp 142	1,195	0,285	0,03	1,72

Jednocześnie stwierdzono, że w zakresie małych zawartości wody zależność c_w od u ma charakter krzywoliniowy ($w = 0-10\%$). W zakresie wyższych wilgotności istnieje zależność:

$$c_w = a \cdot w + b \quad \text{w} \quad \frac{\text{k J}}{\text{kg K}} \quad (6)$$

Współczynniki a i b podano również w tabeli 1. Wyniki te zbliżone są do otrzymanych przez Disney'a (cyt. za [3]).

Inne badania autora przeprowadzone na suchej masie ziarna innych odmian przedstawiono w tabeli 2. Badania przeprowadzone by- metodą niestacjonarnej wymiany ciepła w płycie nieograniczonej. Wyniki różnią się średnio o około 5% od uzyskanych metodą kalorymetryczną.

T a b e l a 2

Ciepło właściwe suchej masy 5 mieszańców

Odmiana	Ciepło właściwe suchej masy	
	w $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	w $\frac{\text{kcal}}{\text{kg K}}$
S26 x S72	1,549	0,37
F7 x Co151	1,461	0,35
KB x 270	1,461	0,35
B21 x F7	1,632	0,39
F7 x EP1	1,716	0,41

Porównanie wyników badań różnych autorów przedstawia tabela 3. W tabeli tej przedstawiono ciepło właściwe suchej masy oraz ziarna o wilgotności 30%.

PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA

Przewodzenie ciepła można rozpatrywać w obrębie jednego ciała, w którym istnieją różnice temperatur, lub w obrębie warstwy cząstek (układ dwuskładnikowy: powietrze - cząstki stałe). Definicja współczynnika przewodności cieplnej oparta o równanie Fouriera dla przepływu jednokierunkowego w materiale jednorodnym ma następujący zapis:

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot \Delta t \cdot \theta$$

stąd

$$\lambda = \frac{Q \cdot s}{F \cdot \Delta t \cdot \theta} \quad \text{w} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}} \quad (7)$$

Q - ilość przepływającego ciepła w kJ

F - powierzchnia przepływu w m²

s - odległość płaszczyzn izotermicznych w m

Zestawienie wyników badań ciepła właściwego różnych autorów

Autor	Metoda pomiaru	Ciepło właściwe suchej masy		Ciepło właściwe ziar- na o wilgot- ności 30%	Wzór dla obli- czenia c_w	Współczyn- nik	Górne tempe- ratury nagrza- nia K	Odmiana
		$c_s \frac{kJ}{kg K}$	$c_w \frac{kJ}{kg K}$					
1	2	3	4	5	6	7	8	
Koschatzky [8]	kalory- metrycz- na	1,112	1,965	$c_w = c_s + a$	$a = 2,846$	288	Velox	
"	"	1,221	2,044	"	$a = 2,750$	305	"	
"	"	1,297	2,324	"	$a = 3,441$	333	"	
"	"	0,903	1,785	"	$a = 2,939$	288	Inra 258	
"	"	1,191	1,977	"	$a = 2,625$	303	"	
"	"	1,137	2,182	"	$a = 2,721$	333	"	
"	"	1,074	1,771	"	$a = 2,334$	288	Brillant	
"	"	0,120	2,115	"	$a = 2,328$	303	"	
"	"	1,246	2,228	"	$a = 2,286$	333	"	
Kazarian-Hall [7]	"	1,463	2,529	"	$a = 0,036$	277	Yellow Dent	
Jegorow-Ljubusz- kin [4]	"	1,116	2,909	$c_w = c_s + a \cdot u$	$a = 1,000$	-	-	
Ginzburg [2]	-	1,104	-	-	-	288	-	

1	2	3	4	5	6	7	8	
Kamiński	kalorymetryczna	1,175	2,483	$c_w = a_w + bw$	$a_w = 0,04$	$b = 1,29$	293	72 x F115
"	"	1,329	2,228	"	$a_w = 0,02$	$b = 1,63$	293	W33 x F115
"	"	1,120	2,149	"	$a_w = 0,03$	$b = 1,55$	293	F7 x EP1
"	"	1,129	2,136	"	$a_w = 0,03$	$b = 1,48$	293	W33 x EP1
"	"	1,191	2,466	"	$a_w = 0,03$	$b = 1,72$	293	Kb e xp 142
"	niestacjonarna wymiana ciepła	1,547	-	"	-	-	313	S26 x S72
"	"	1,463	-	-	-	-	313	F7 x Co 151
"	"	1,463	-	-	-	-	313	Kb - 270
"	"	1,630	-	-	-	-	313	B21 x F7
"	"	1,714	-	-	-	-	313	F7 x E1
Średnia		1,261	2,206					
Odchylenie standardowe		0,204	0,291					

t - różnica temperatur płaszczyzn izotermicznych

θ - czas w h.

Współczynniki przewodności cieplnej wahają się dla gazów w granicach $0,005-0,5 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$, cieczy $0,08-0,6$ materiałów izolacyjnych $0,02-2,5$, metali $2-360 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$.

Produkty rolnicze mają przewodność cieplną mieszczącą się w grupie izolatorów przyjmując niższe wartości w stanie suchym wyższe zaś w wilgotnym. Określeniem współczynnika przewodności produktów rolniczych w pojedynczych elementach jak i w warstwie dwuskładnikowej powietrze-elementy zajmowało się wielu badaczy [3, 11, 12].

Kazarian i Hall [7] badali przewodność cieplną warstwy ziarna kukurydzy Yellow Dent. Mühlbauer [9] badając przewodność cieplną warstwy ziarna odmiany Velox i Inra 258 określił ją dla suchej masy

$$\lambda_s = 0,114 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}}.$$

Stwierdził on również zależność między przewodnością cieplną wilgotnej warstwy λ_u , a zawartością wody u w postaci:

$$\lambda_u = \lambda_s + 0,133 u - 0,125 u^2. \quad (8)$$

Jegorow (cyt. za [3]) proponuje zależność w zakresie wilgotności 10-30%

$$\lambda_w = 0,0320 + 0,0053 w \quad (9)$$

T a b e l a 4

Przewodność cieplna 5 mieszańców

Mieszaniec	w $\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$	w $\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$
S26 x S72	0,088	0,368
F7 x Co151	0,082	0,343
KB x 270	0,082	0,343
B21 x F7	0,085	0,356
F7Ms x Fp1	0,089	0,372

Badania autora nad przewodnością cieplną warstwy suchej masy ziarna niektórych krajowych mieszańców kukurydzy metodą niestacjonarną dostarczyły informacji podanych w tabeli 4.

WSPÓŁCZYNNIK DYFUZJI CIEPŁA a

Współczynnik dyfuzji ciepła określa prędkość rozchodzenia się ciepła w ośrodku przy określonym gradiencie temperatur. Jest on opisany wzorem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad \text{w} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (10)$$

Ponieważ wszystkie wielkości (λ , c , ρ) zależą od zawartości wody i temperatury, a więc i a zależy od nich. I w tym przypadku należy wyróżnić współczynnik a pojedynczego elementu (ziarna) i warstwy ziarnistej. Wartość współczynnika a wyznaczona została dla niektórych produktów rolniczych przez różnych autorów [3, 5, 11, 12]

Kazarian i Hall [7] badali współczynnik a dla warstwy ziarna odmiany Yellow Dent. Badania autora na czterech krajowych mieszańcach metodą niestacjonarnej wymiany ciepła dały wyniki przedstawione w tabeli 5. Przedstawione wartości a dotyczą suchej masy, a pomiary wykonane były dla temperatury nagrzania ziarna 313K.

T a b e l a 5

Współczynnik dyfuzji ciepła
4 mieszańców

Mieszaniec	$a \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
S26 x S72	$5,522 \cdot 10^{-8}$
Kb 270	$6,050 \cdot 10^{-8}$
F7 Ms x Ep1	$5,377 \cdot 10^{-8}$
B21 x F7	$5,614 \cdot 10^{-8}$

GĘSTOŚĆ, GĘSTOŚĆ USYPOWA, POROWATOŚĆ WARSTWY ZIARNA KUKURYDZY

Gęstość i porowatość warstwy są ważnymi cechami przy obliczaniu procesu suszenia, a także projektowaniu miejsc do składowania. Wszystkie te cechy zależą od zawartości wody. Mühlbauer [9] proponuje następujące zależności:

$$\rho_u = \rho_s - c_1 \cdot u \quad (11)$$

gdzie:

ρ_u - gęstość przy zawartości wody u w $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,

ρ_s - gęstość suchej masy w $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,

u - zawartość wody w $\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s.m.}}$,

c_1 - współczynnika stały.

Wyniki pomiarów gęstości suchej masy 4 mieszańców krajowych wykonanych przez autora (średnie z 10 pomiarów) przedstawia tabela 6. Dla niektórych krajowych odmian autor znalazł wartości gęstości usypowej umieszczone w tabeli 7. Zależność gęstości ρ oraz gęstości usypowej ρ' od zawartości wody pokazano dla 5 odmian na rys. 1 i 2.

T a b e l a 6

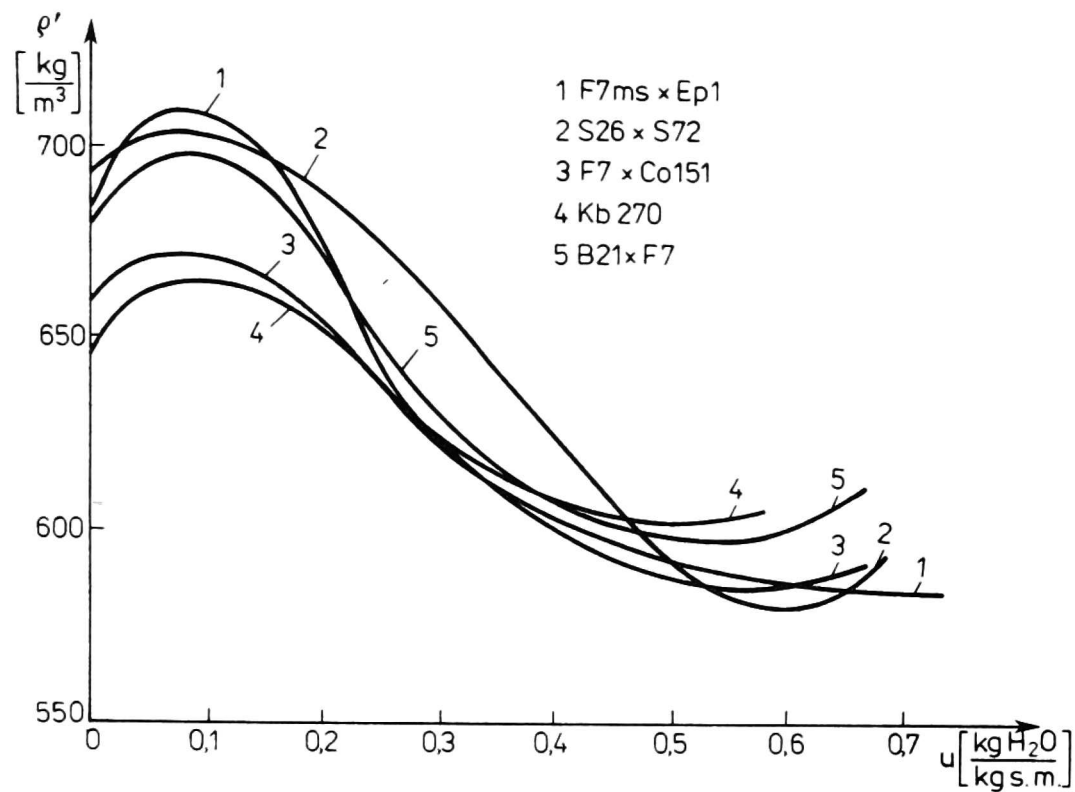
Gęstość usypowa 7	
Odmiana	$\rho_s \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
S26 x S72	1191
F7 Ms x Ep1	1151
B21 x F7	1128
F7 x Co151	1103

T a b e l a 7

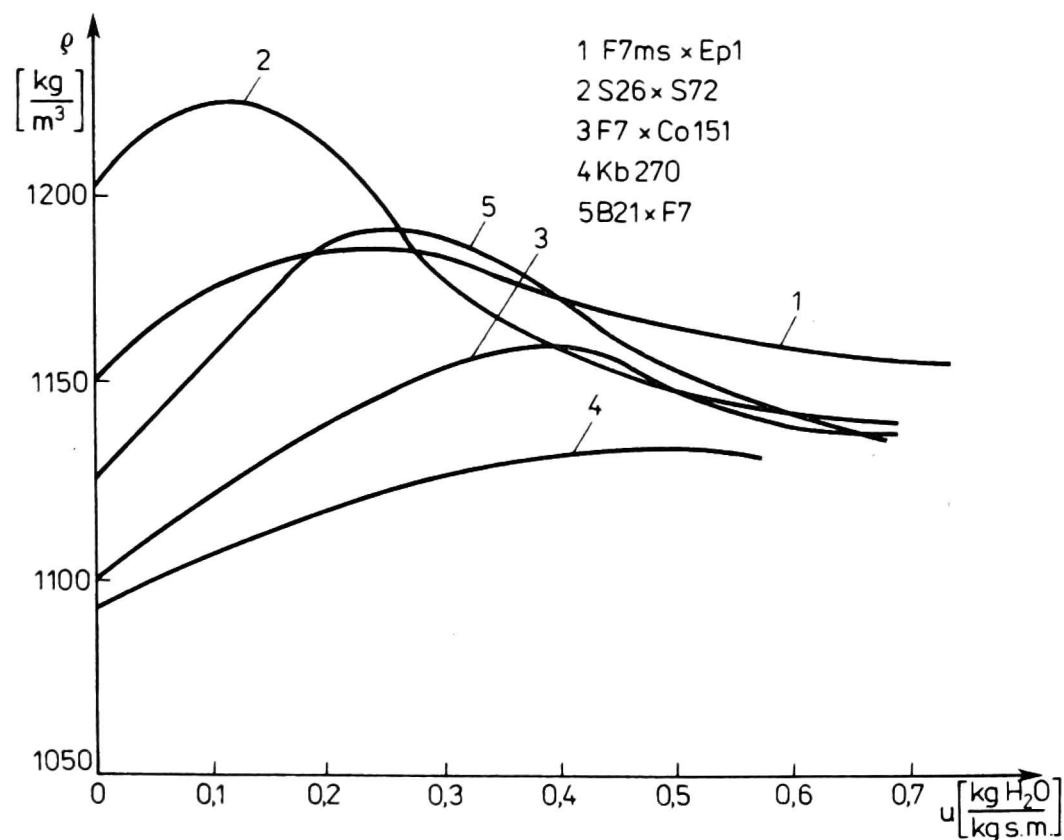
Gęstość usypowa 7 mieszańców	
Odmiana	gęstość usypowa $\rho_s \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
S26 x S72	692
F7Ms x Ep1	684
B21 x F7	677
F7 x Co 151	660
Kb 270	643
EP1 x W79 A	670
Kbe x p 173	650

Porowatość warstwy ziarna ε określamy następującym wzorem:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho'}{\rho} \quad (12)$$



Rys. 1. Zależność gęstości usypowej od zawartości wody



Rys. 2. Zależność gęstości od zawartości wody

Jej zależność od wilgotności określa Mühlbauer 9 następująco:

$$\epsilon_u = \epsilon_s + c_3 u \quad (13)$$

gdzie:

ϵ_u - porowatość warstwy o zawartości wody u ,

ϵ_s - porowatość suchej masy,

c - współczynnik zależny od odmiany.

Dla badanych przez autora mieszańców kukurydzy porowatość ϵ_s , masa 1000 ziarn, oraz średnice zastępcze podano wartości w tabeli 8.

T a b e l a 8

Cechy fizyczne 5 mieszańców

Odmiana	ϵ_s w %	m_s 1000 w g	dz_s w mm
S26 x S72	58	189,24	8,27
F7 Ms x Ep1	59	206,26	6,99
B21 x F7	60	-	-
F7 x Co151	60	196,28	5,36
Kb 270	59	184,26	6,85

LITERATURA

1. Disney R. W.: The specific heat of some cereal grains. Cereal Chemistry 31/3, 1954, s. 229-234.
2. Ginzburg A. S.: Suszka piszczewnych produktow. Piszczepromizdat, Moskwa, 1960.
3. Ginzburg A. S. i inni: Właga w ziarnie. Izd. Kołos, Moskwa, 1969.
4. Jegorow G. A., Ljubuszkin B. T.: Kukuruza, t. 5, Nr 3, 1960, s. 52-53.
5. Kamiński E.: Niektóre cechy termofizyczne ziemniaka. Roczn. Nauk Rol. t. 69-C-1, 1972, s. 35-51.
6. Kamiński E.: Wpływ wilgotności na ciepło właściwe niektórych roślin strączkowych. B.I. - IMER, Nr 10, 1968, s. 165-174.
7. Kazarian E. A., Hall C. W., Thermal properties of grain. Trans of the ASAE, Nr 1, 1965, s. 33-37.
8. Koschatzky E.: Experimentale. untersuchungen uber die spezifische Wärme von Kornmais, Grasern und Leguminosen. Grandl. Landt, Nr 24/4, 1974, s. 99-115.
9. Mühlbauer W. i inni: Untersuchungen von Kornermais im Gleichstromverfahrens mittels hoher Lufttemperaturen. Grundlagen der Landtechnik, Bd. 21, Nr 1, 1971, s. 1-32.

10. Nikitina Ł. M.: Termodynamiczeskije parametry i kochicienty massoperenosa we wlaźnych materiałach. Energia, Moskwa, 1968.
11. Pabis S.: Wyznaczenie przewodności cieplnej w warstwie ziar-
nistych produktów rolniczych. Biuletyn Prac Naukowo-Badaw-
czych IMER, Nr 5, 1966, s. 7-19.
12. Pabis., Gadaaj S.: Przewodność cieplna warstwy ziarna i na-
sion. B.I. - IBMER, Nr 12, 1970.

Эугениуш Каминьски

ТЕРМОФИЗИЧЕСКИЕ И СУШИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗЕРНА КУКУРУЗЫ

Р е з ю м е

Знание физических свойств является необходимым при разработке математических моделей различных способов сушки.

В реферате представлены результаты испытаний следующих свойств: собственно тепла, теплопроводности, коэффициента диффузии тепла, насыпной плотности, пороватости, гидросопротивления слоя. Эти свойства рассматривались в зависимости от сорта и состояния влажности.

Результаты представлены в виде таблиц и чертежей (графиков) зависимостей физических свойств от влагосодержания.

Eugeniusz Kamiński

THERMO-PHYSICAL AND DRYING PROPERTIES OF MAIZE GRAIN

S u m m a r y

To elaborate mathematical models of various drying methods the physical features of material ought to be known. As a result of investigation the following features of maize grain are discussed in the paper: specific heat, thermal conductivity, thermal diffusion coefficient, density, bulk density, porosity and hydraulic resistance of a layer. The mentioned features were considered depending on the variety and moisture content of grain. The results are presented in form of tables and diagrams of physical properties versus moisture content.