POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

ROZPRAWY NAUKOWE NR 62

Roman Niesteruk

WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNE ŻYWNOŚCI

Część II

BIAŁYSTOK 1999

DZIAŁ WYDAWNICTW I POLIGRAFII

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jan Łach
prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej S/WM/1/96

Opracowanie redakcyjne – Jadwiga Żukowska
Skład komputerowy – Teresa Dawidowicz
Korekta – Autor

ISSN 0867–096X

Skład komputerowy i druk w Dziale Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej. Nakład 100 egz. Format B5. Ark. wyd. 6.0. Ark. druk. 7,0. Oddano do druku i druk ukończono w grudniu 1999. Zam. 179/99.

SPIS TREŚCI

Strona

Wykaz stosowanych oznaczeń 5

1. Jagody 7
Literatura 11

2. Przetwory owocowe i warzywne 13
2.1. Ciepło właściwe 13
2.2. Współczynnik przewodzenia ciepła 17
2.3. Współczynnik wyrównywania temperatury 21
2.4. Gęstość 23
Literatura 27

3. Jaja i ich przetwory 31
3.1. Jaja 31
3.2. Białko 31
3.3. Żółtko 32
3.4. Masa jajowa 33
3.5. Skorupa 34
Literatura 35

4. Ziarna zbóż i produkty ich przetwórstwa 36
4.1. Pszenica 36
4.1.1. Ciepło właściwe 36
4.1.2. Współczynnik przewodzenia ciepła 38
4.1.3. Współczynnik wyrównywania temperatury 42
4.1.4. Gęstość 43
4.2. Żyto 44
4.3. Pszenżyto 46
4.4. Owies 46
4.5. Jęczmień 48
4.5.1. Właściwości termofizyczne słodu jęczmiennego 49
4.6. Kukurydza 50
4.7. Proso 53
4.8. Gryka 54
4.9. Ryż 54
4.10. Soja 56
4.11. Właściwości termofizyczne produktów przetwórstwa zbóż 57

Strona

4.11.1. Śruta 57
4.11.2. Mąka 57
4.11.3. Kasza 63
4.11.4. Ciasto 65
4.11.5. Chleb i pieczywo 69
Literatura 71

5. Węglowodany 75
5.1. Cukier 75
5.1.1. Roztwory sacharozy 78
5.2. Fruktoza 79
5.3. Glukoza 79
5.4. Laktoza 79
5.5. Skrobia (krochmal) 80
5.6. Miód 83
Literatura 85

6. Herbata, kawa, kakao, czekolada, chałwa, wyroby cukiernicze 87
6.1. Herbata 87
6.2. Kawa 88
6.3. Kakao 92
6.4. Czekolada i wyroby czekoladowe 94
6.5. Chałwa 95
6.6. Składniki do produkcji cukierków 96
Literatura 97

7. Drożdże 99
Literatura 101

8. Sól kuchenna 102
Literatura 103

9. Napoje alkoholowe 104
9.1. Spirytus etylowy 104
9.2. Wodne roztwory spirytusu 104
9.3. Wino 106
Literatura 107

10. Materiały opakowaniowe 108
Literatura 109

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

a – współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna), m^2/s,
B – stała w równaniu Wargaftika,
c – ciepło właściwe, J/(kg·K),
E – zawartość etanolu, ułamek wagowy,
f – zawartość tłuszczu, ułamek wagowy,
h – wysokość warstwy, mm,
m – wilgotność produktu, ułamek wagowy,
n – zawartość suchej substancji, ułamek wagowy (koncentracja),
p – zawartość białek (protein), ułamek wagowy,
s – zawartość cukru, ułamek wagowy,
T – temperatura, K,
z – zawartość soli, ułamek wagowy,
α – stała w równaniu Wargaftika,
δ – grubość materiału opakowaniowego, mm,
ε – porowatość,
λ – współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna), W/(m·K),
ρ – gęstość, kg/m^3.

Indeksy

ek. – ekwiwalentne,
k – krioskopowa,
m – woda,
n – nasypowa,
max. – maksymalne,
rz – rzeczywiste (istotne),
T – zależny od temperatury.

1. JAGODY

Zasadniczy wpływ na właściwości termofizyczne jagód (w tym także winogron) mają: wilgotność [4,5,9,13,14,17], temperatura [2,3,6,8,10,12] oraz przemiana fazowa wody w lód podczas ich zamrażania [2,3,8,10,12]. Właściwości termofizyczne warstwy jagód zależą ponadto od sposobu usypania [4,14] (a więc porowatości) i od warunków wymiany ciepła z otoczeniem [1,4,11,12].
Ciepło właściwe jagód rośnie ze wzrostem ich wilgotności. Ginzburg [4] poleca następujące wzory opisujące zależność ciepła właściwego od wilgotności dla temperatury 293 K i $0 < m < 1$:

$$c = 1402 + 2765\, m, \tag{1.1}$$

dla: borówki, brusznicy, truskawki i winogron;

$$c = 1384 + 2803\, m, \tag{1.2}$$

dla: agrestu, jeżyny i maliny;

$$c = 1367 + 2820\, m, \tag{1.3}$$

dla: porzeczki i żurawiny.

Ciepło właściwe rodzynek dla temperatury wyższej od 293 K i w przedziale wilgotności $0{,}14 < m < 0{,}80$ określa wzór:

$$c = 1400 + 2782\, m. \tag{1.4}$$

Eksperymentalne wartości ciepła właściwego jagód (tablica 1.1) różnią się od obliczonych ze wzorów (1.1) – (1.3) o 4% dla temperatury wyższej od krioskopowej. Ciepło właściwe jagód zamrożonych stanowi około 50% wartości tego ciepła przed zamrożeniem (tablica 1.1). Ciepło właściwe jagód nie zależy od odmiany i miejsca uprawy (patrz winogrona odmian amerykańskich i europejskich), jeżeli

tylko mają one jednakową wilgotność. Wynika to z decydującego wpływu tego parametru na ciepło właściwe.

Współczynnik przewodzenia ciepła jagód wzrasta także wraz ze wzrostem wilgotności i temperatury. Zależności te dla winogron ilustrują równania:

$$\lambda = 0{,}404\, m + 0{,}069\,, \tag{1.5}$$

$$\lambda = 0{,}0024\, T - 0{,}213\,. \tag{1.6}$$

Równanie (1.5) ma zastosowanie dla warstwy winogron i rodzynek o porowatości 0,37÷ 0,49, w przedziale wilgotności $m = 0{,}14 \div 0{,}80$ i w zakresie temperatury 312 K ÷ 324 K. Natomiast wzór (1.6) obowiązuje w przedziale temperatury 293 K ÷ 353 K. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła (przewodności cieplnej) niektórych jagód zawiera tablica 1.2.

Tablica 1.1.

Ciepło właściwe jagód

Nazwa	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Ciepło właściwe c [J/kg·K]		Literatura
			dla $T < T_k$	dla $T > T_k$	
Agrest	0,889		1926	3768	[8,10,12]
Czarna jagoda	0,823			3600	[16]
Jeżyna	0,823		1926	3684	
Malina	0,834		1884	3600	[8,10,12]
Malina (warstwa h=50mm)		273 ÷288		3750	[1]
Porzeczka	0,847		1884	3684	[8,10]
	0,307			2310	
Rodzynki	0,14÷0,80			1780÷3620	[3]
	0,245		1968		
Rodzynki sułtanki	0,192		1960	2620	
Truskawka	0,90		1967	3852	[8,10]
	0,886	273÷283		3870	[15,16]
	0,720		1758		[8,10]
Truskawka (warstwa h= 60mm)		273÷288		3885	[1]
Winogrona amerykańskie	0,819		1842	3600	[8,10]
Winogrona europejskie			1842	3600	[8,10]
	0,795	273÷283		3620	[15]
		283÷353		3886	[7]
Żurawina	0,874		1926	3768	[8,10]

Tablica 1.2.

Współczynnik przewodzenia ciepła jagód

Nazwa	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Gęstość ρ i gęstość nasypowa ρ_n [kg·m^3]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/m·K]	Literatura
Agrest (warstwa)				0,329	[17]
Jeżyna		273÷300		0,49	[15,16]
Jeżyna (warstwa)		256	640	0,31	[11,12]
Malina	0,843	273÷283	998	0,49	[15,16]
Malina (warstwa h =50 mm)			492,5	0,204	[1]
Porzeczka (warstwa)				0,31	[16]
	0,886	273÷283		0,46	[15,16]
		260,8		1,067	[1]
Truskawka (warstwa)		255	630	0,586	[13]
Truskawka (warstwa=60 mm)		273	499	0,18	[1]
Winogrona	0,795	273÷283	1068	0,51	[16]

Współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) jagód wzrasta ze wzrostem temperatury. Zmianę tę dla winogron opisano w [7] równaniem:

$$a = (0{,}0064\, T - 0{,}608)\cdot 10^{-7}\,. \tag{1.7}$$

Wzór (1.7) jest ważny w przedziale temperatury 293 K ÷ 353 K. Natomiast dyfuzyjność cieplna rodzynek suszonych (m = 0,322) w przedziale temperatury 273 K ÷313 K zmienia się według wzoru:

$$a = (0{,}0008\, T + 0{,}80)\cdot 10^{-7}\,. \tag{1.8}$$

Wartości współczynnika wyrównywania temperatury (dyfuzyjności cieplnej) jagód zawiera tablica 1.3.

Tablica 1.3.

Współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) jagód

Nazwa	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Dyfuzyjność cieplna $a \cdot 10^7$ [m^2/s]	Literatura
Jeżyna		246 ÷255	1,27	[2]
		273 ÷ 300	1,38 ÷1,59	[15]
Malina		273 ÷283	1,31	[15]
Maliny (warstwa)			1,093	[1]
Truskawka	0,920	278	1,70	[14]
		278 ÷298	1,24 ÷1,34	[15]
Truskawki (warstwa)			0,950	[1]

Badanie procesu chłodzenia malin i truskawek w skrzynkach za pomocą powietrza o temperaturze zmieniającej się od 288 K do 258 K wykazało, że zwiększenie prędkości strumienia do 5 m/s intensyfikuje wymianę ciepła i skraca czas procesu. Natomiast dalszy wzrost prędkości jest niecelowy [1], gdyż prowadzi do większego zużycia energii, a czas chłodzenia skraca się minimalnie.

Gęstość jagód nie zależy od gatunku i miejsca zbioru, zmniejsza się natomiast ze wzrostem ich wilgotności. Gęstość winogron o wilgotności m = 0,784; 0,804; 0,836 wynosi odpowiednio: 1100, 1054, 1036 kg/m^3 [4].

Złożona i wielokomponentowa budowa jagód i winogron ma także wpływ na ich gęstość, ponieważ gęstość poszczególnych elementów jest różna (tablica 1.4).

Tablica 1.4.

Gęstość owocu i jego elementu (winogrona gat. Riesling) [4]

Owoc i jego element	Gęstość ρ [kg·m^3]
Kiść	1071 ÷ 1086
Owoc	1077 ÷ 1087
Kostka	1130 ÷ 1190
Skórka	1115 ÷ 1130

Najważniejszym parametrem wpływającym na gęstość nasypową jagód i winogron jest porowatość warstwy. Gęstość nasypowa zależy od sposobu nasypania owoców i rośnie ze wzrostem grubości warstwy (tablica 1.5).

Tablica 1.5.

Wpływ grubości warstwy i sposobu nasypania na ρ_n winogron

Sposób nasypania	Grubość warstwy h [m]			
	0,35	**0,70**	**1,00**	**1,50**
Swobodnie nasypane	550 ÷ 600	580 ÷ 630	610 ÷ 660	660÷ 720
Ułożone z wypełnieniem porów	600 ÷ 655	630 ÷ 685	650 ÷710	690÷ 750
Zagęszczone wstrząsaniem	700 ÷ 755	720 ÷ 775	745÷ 800	775÷ 830

Gęstość nasypowa wzrasta z obniżeniem wilgotności. Gęstość nasypowa rodzynek [18] wzrosła od 582 do 762 kg/m^3 przy obniżeniu ich wilgotności od 0,80 do 0,14. Gęstość i gęstość nasypową innych jagód zawiera tablica 1.6.

Tablica 1.6.

Gęstość i gęstość nasypowa jagód

Nazwa jagody	ρ [kg·m^3]	ρ_n [kg·m^3]	Literatura
Agrest	1040	600	[4]
Agrest zamrożony w torebkach		580 ÷ 630	[11,12]
Jeżyna zamrożona w torebkach		640	
Malina	950 ÷ 1030	350÷650	[4]
Porzeczka	1070	250 ÷ 680	
Truskawka	921	499,5	[1]
Truskawka zamrożona w torebkach		630	[11,12]

Literatura

1. **Фикин А.Г., Трифонов С.Д.** 1983: *Интенсификация процесса охлаждения клубинки и малины,* Холодильная техника, № 3, 57 – 60.
2. **George R.M.** 1990: *A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products,* Campden Food and Drink Research Association, Technical Bulletin, № 73, 8-10.
3. **George R.M., Holdsworth S.D.** 1990: *A Literature Survey of Heat Capacity of Food Products*, Campden Food and Drink Research Association,Technical Bulletin, № 76, 5 - 9.
4. **Гинзбург А.С., Громов М.А.** 1987: *Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов*, В.О. Агропромиздат , Москва.
5. **Гвинианидзе Т.Н., Асатиани М.Г., Хведелидзе В.Г.**1988: *Теплофизические характеристики кожицы винограда*, Пищевая промышленность, № 6, 34.

6. **Heldman D.R., Lund D.B.** 1992: *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker Inc.,New York, Basel, Hong – Kong, 247 –254.
7. **Илясов С.Г., Ангерсбах Л.К., Ангерсбах Н.И., Панин А.С.**1987: *Теплофизические характеристики плодов и винограда,* Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 81 – 83.
8. **Moshenin N.N.**1980: *Thermal Properties of Food and Agricultural Materials*. Gordon and Breach Publishers. New York, 307-312.
9. **Okos M.R.**1986: *Physical and Chemical Properties of Food* , ASAE Publ.08-86, St. Joseph, USA, 35 – 137.
10. **Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P.** 1980: *A Compilation of Thermal Properties of Foods*, Food Technology – November, 76-92.
11. **Qashou M.S., Vachon R.I., Touloukian Y.S.** 1972: *Thermal Conductivity of Foods*, Transactions of the ASHRAE, Vol.15, No 2, 165 –183.
12. **Rha ChoKyun.** 1975: *Theory, Determination and Control of Physical Properties of Foods Materials*. D.Reidel Publ. Comp., 318 – 358.
13. **Singh R.P., Medina A.G.** 1988: *Food Properties and Computer – Aided Engineering of Food Processing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 113 – 116.
14. **Singh R.P., Heldman D.R.** 1993: *Introduction to Food Engineering*, Second Edition, Academic Press Inc., San Diego,139 –141.
15. **Stankiewicz K.** 1990: *Podstawowe właściwości termofizyczne surowców i przetworów owocowych i warzywnych*. Cz.I. *Owoce i warzywa jako surowiec do dalszego przerobu, Przemysł Fermentacyjny i Owocowo – Warzywny*, t. XXXIV, № 7, 17 – 19.
16. **Stankiewicz K.**1992: *Podstawowe właściwości termofizyczne surowców i przetworów owocowych i warzywnych*. Cz.II. *Owoce i warzywa w procesach wymiany ciepła i masy, Przemysł Fermentacyjny i Owocowo – Warzywny*. t. XXXVI, № 2, 10 –12.
17. **Toledo R.** 1991: *Fundamentals of Food Process Engineering*, Second Edition. Van Nostrand Reinhold Publ., New York, 579 – 582.
18. **Vagenas G.K., Marinos – Kouris D., Saravacos G.D.**1990: *Thermal Properties of Raisins*, Journal of Food Engineering, Vol.11, 147–158.
19. **Видев К., Раичков Г.**1981: *Метод на определяне на коефициента на топлопроводност на плодове и зеленчуци*, Научни трудове на Висшия институт по хранителна и вкусова промишленост – Пловдив, т.XXVIII, св.II, 385–393.

2. PRZETWORY OWOCOWE I WARZYWNE

2.1. Ciepło właściwe

Ciepło właściwe przetworów owocowych i warzywnych, a szczególnie pulp, soków i nektarów, zależy w zasadzie od dwóch parametrów: temperatury (T) i koncentracji suchej substancji (n) [2,4,8,9,23,33]. Do określania zależności ciepła właściwego przetworów owocowych i warzywnych od temperatury i koncentracji suchej substancji najczęściej stosuje się [2,8,9,23,33] model liniowy (addytywny), który wymaga znajomości udziału wagowego poszczególnych komponentów i wartości ich ciepła właściwego. Jednakże model liniowy nie uwzględnia interakcji składników. Jest on polecany [2,4] dla produktów o wilgotności $m > 0{,}50$ [4]. Natomiast w produktach o wilgotności niższej od 50%, pozostająca woda jest w coraz większej części wodą związaną, która ma wpływ [4] na ciepło właściwe produktu. Zjawisko jest dokładniej opisane przez model potęgowy. Wyniki badania ciepła właściwego 31pulp owocowych i warzywnych w temperaturze wyższej od krioskopowej Alvarado [2] opisał równaniem:

$$c = 2664\, m + 1194, \tag{2.1}$$

które jest ważne dla $0{,}40 < m < 0{,}85$.

Model potęgowy ciepła właściwego pulp owocowych, obowiązujący dla przedziału wilgotności $0{,}01 < m < 0{,}96$ ma postać:

$$c = 1{,}56\, e^{0{,}9446\, m}. \tag{2.2}$$

Ciepło właściwe puree z jabłek, moreli, grusz, brzoskwiń, śliw i pigwy w [33] opisano równaniem:

$$c = 3358 - 161\, n + 0{,}00145\, T. \tag{2.3}$$

Powyższy wzór jest słuszny dla przedziału temperatury 293 K < T < 353 K i zawartości suchej substancji $0{,}08 \le n \le 0{,}19$. Pokazuje on, że z dwóch parametrów (n, T), wpływających na ciepło właściwe pulp owocowych, większe znaczenie ma zawartość suchej substancji. Zależności do obliczania ciepła właściwego dla pulp i kremogenów zawiera tablica 2.1. Natomiast tablica 2.2. zawiera zależności ciepła właściwego soków, syropów i nektarów.

Ciepło właściwe soków, syropów i nektarów owocowych, podobnie jak pulp, zależy od zawartości suchej substancji i temperatury. Ze wzrostem masowej zawartości suchej substancji w soku zmniejsza się jego ciepło właściwe. Wzrost temperatury wpływa na wzrost wartości ciepła właściwego. Wyniki badań wskazują, że wpływ suchej substancji na ciepło właściwe soków owocowych jest o rząd wielkości większy od wpływu temperatury (równania 2.4 ÷ 2.36).

Minčev i in. [25] ciepło właściwe soków i syropów z czereśni, jabłek, malin, truskawek i wiśni opisali następującym równaniem:

$$c = 4067 + 0{,}44\,T - 3197\,n + 3{,}10\,nT\,, \qquad (2.4)$$

które ma zastosowanie dla 293 K < T < 353 K i 0,10 < n < 0,71.

Tablica 2.1.

Ciepło właściwe pulp i kremogenów

Nazwa	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Koncentracja n	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
1	2	3	4	5	6	7
Pulpa z:						
ananasów		0,46÷0,85		$c = 2860\,m + 980$	(2.5)	[4]
arbuza		0,67÷0,92		$c = 3850\,m + 330$	(2.6)	
banana (M.cavendis)		0,45÷0,76		$c = 2620\,m + 1340$	(2.7)	
banana (M.paradis)		0,49÷0,74		$c = 3620\,m + 660$	(2.8)	
brzoskwini		0,57÷0,87		$c = 2860\,m + 1510$	(2.9)	
	293÷353		0,11	$c = 1{,}4\,T + 3192$	(2.10)	[33]
grapefruita		0,89÷0,63		$c = 2290\,m + 1410$	(2.11)	[4]
gruszy		0,812÷0,33		$c = 2300\,m + 1700$	(2.12)	
	293÷353		0,16	$c = 2{,}45\,T + 2719$	(2.13)	[33]

cd. tablicy 2.1.

1	2	3	4	5	6	7
gruszy adwokackiej		0,442÷0,74		$c = 3320\,m + 920$	(2.14)	[4]
guajawy		0,51÷0,86		$c = 2290\,m + 970$	(2.15)	
jabłek		0,50 ÷0,87		$c = 2320\,m + 1510$	(2.16)	
	293÷353		0,089	$c = 0{,}657\,T + 3488$	(2.17)	[33]
cytryny		0,47÷ 0,89		$c = 3340\,m + 660$	(2.18)	[4]
mandarynki		0,48 ÷0,87		$c = 2210\,m + 1520$	(2.19)	
mango	293÷353		0,166	$c = 0{,}765\,T + 3500$	(2.20)	[33]
melona		0,766÷0,94		$c = 4470\,m - 520$	(2.21)	[4]
moreli	293÷353		0÷0,108	$c = 0{,}564\,T + 3469$	(2.22)	[33]
morwy		0,594÷0,86		$c = 3530\,m + 550$	(2.23)	[4]
ogórków		0,546÷0,83		$c = 3304\,m + 560$	(2.24)	
opuncji		0,537÷0,84		$c = 2500\,m + 1450$	(2.25)	
papayi (melonowca)		0,55 ÷0,89		$c = 2480\,m + 1230$	(2.26)	
pigwy	293÷353		0,079	$c = 0{,}226\,T + 3508$	(2.27)	[33]
pomidorów		0,64÷0,945		$c = 3390\,m + 710$	(2.28)	[4]
		0,929		4019		[12]
śliwy	293÷353		0,188	$c = 0{,}206\,T + 2950$	(2.29)	[33]
		0,677÷0,89		$c = 4010\,m + 110$	(2.30)	[4]
truskawek		0,61÷ 0,92		$c = 3290\,m + 680$	(2.31)	
winogron		0,47÷0,81		$c = 3460\,m + 680$	(2.32)	
Kremogeny:						
bananowy	303÷373		0,251	$c = 3{,}37\,T + 2305$	(2.33)	[35]
jabłkowy			0,102	$c = 3{,}46\,T + 2510$	(2.34)	
marchwiowy			0,053	$c = 2{,}62\,T + 2710$	(2.35)	

Równanie opisujące zmianę ciepła właściwego nektarów owocowych ma postać [11]:

$$c = 2784 - 1670n + 1{,}135T, \qquad (2.36)$$

dla: 0,09 < n < 0,17; 293 K < T < 353 K.

Tablica 2.2.

Ciepło właściwe soków, syropów i nektarów

Produkt	Temperatura T [K]	Koncentracja n	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
Soki z:					
czereśni	293÷353	0,1161	$c = 1{,}74\,T + 3403$	(2.37)	[25]
jabłek	303÷343	0,08÷0,42	$c = 2\,T - 2160\,n + 3546$	(2.38)	[18]
jabłek i czereśni	293÷353	0,135	$c = 8{,}11\,T + 1628$	(2.39)	[25]
jabłek (klarow.)	303÷363	0,06÷0,75	$c = 2{,}34\,T - 1817\,n + 2744$	(2.40)	[9]
pomarańcz		0,10÷0,65	$c = 4186 - 2679\,n$	(2.41)	[28]
selera	233÷293	0,0÷1,0	$c = 4220 - 3000\,n$	(2.42)	[21]
wiśni	293÷353	0,1133	$c = 3{,}37\,T + 3860$	(2.43)	[25]
Nektary z:					
brzoskwini	293÷353	0,0965	$c = 2{,}02\,T + 3046$	(2.44)	[16]
gruszki		0,17	$c = 1{,}97\,T + 3494$	(2.45)	[20]
jabłka i moreli		0,1514	$c = 1{,}47\,T + 3172$	(2.46)	[16]
moreli		0,147	$c = 4{,}54T + 2327$	(2.47)	
pigwy	292÷353	0,109	$c = 1{,}30\,T + 3233$	(2.48)	
śliwy	293÷353	0,142	$c = 1{,}38\,T + 3174$	(2.49)	
Syropy z:					
czereśni	293÷353	0,6951	$c = 1{,}34\,T + 2349$	(2.50)	[25]
malin		0,711	$c = 0{,}59\,T + 2487$	(2.51)	
pomarańcz	293÷343		$c = 3{,}52T + 1820$	(2.52)	[20]
truskawek	293÷353	0,691	$c = 2{,}44\,T + 1952$	(2.53)	[25]
wiśni		0,6895	$c = 2{,}13\,T + 2057$	(2.54)	

Tablica 2.3.

Ciepło właściwe dżemów, galaretek i marmolad

Produkt	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Gęstość ρ [kg/m^3]	Ciepło właściwe c [J/kg K]	Numer wzoru	Literatura
1	2	3	4	5	6	7
Dżem:						
agrestowy	273÷373	0,380	1250	$c = 5{,}91\,T + 620$	(2.55)	[29]
porzeczkowy		0,376	1225	$c = 15{,}50\,T - 2175$	(2.56)	
śliwkowy		0,412	1156	$c = 12{,}82\,T - 938$	(2.57)	
truskawkowy		0,407	1209	$c = 13{,}00\,T - 1777$	(2.58)	
		0,410		2540		[11]

cd. tablicy 2.3.

1	2	3	4	5	6	7
winogronowy		0,420		2470		[11]
Galaretka	$T > T_k$	0,32÷0,48		$c = 6355\,m - 326$	(2.59)	
Marmolada		0,423		3030		
Powidło jabłk.	293÷363	0,3÷0,9		$c = 4187 - 3526n + 3{,}6nT$	(2.60)	[12]

Niższe wartości ciepła właściwego syropów są wynikiem większej w nich zawartości suchej substancji (około 6-krotny wzrost w porównaniu z sokami). Ponadto 95% suchej substancji syropów stanowią cukry.

Ciepło właściwe dżemów, galaretek, powideł oraz marmolad wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury. Jednakże ciepło właściwe tych przetworów jest zbadane w stopniu niedostatecznym. Dane o ich cieple właściwym zestawiono w tablicy 2.3.

2.2. Współczynnik przewodzenia ciepła

Przetwory owocowe i warzywne zalicza się do produktów spożywczych dwukomponentowych, składających się (tablica 2.5) z wody i substancji suchej. Ich przewodność cieplna podlega prawu addytywności. Współczynnik przewodzenia ciepła przetworów maleje ze wzrostem substancji suchej i zmniejszeniem temperatury. Riedel [8,34] podał dla soków owocowych, mleka i roztworów cukru następującą zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wyżej wymienionych parametrów:

$$\lambda = (-209{,}26 + 2{,}88\,T - 0{,}00337\,T^2)(1 - 0{,}54\,n)\cdot 10^{-3}, \qquad (2.61)$$

zweryfikowaną dla przedziału temperatury 273 K ÷ 353 K. Współczynnik przewodzenia ciepła soków i syropów owocowych [25,34] nieznacznie różni się od współczynnika przewodzenia wodnych roztworów glukozy i sacharozy. Uwzględnienie zawartości cukru (s) przy bardzo małej zawartości białek (p) i tłuszczu (f) pozwala zredukować równanie Sweat'a [37] do postaci [38]:

$$\lambda = 0{,}58\,m + 0{,}25\,s \qquad (2.62)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła sześciu puree owocowych w przedziale temperatury 293 K ÷ 353 K (równania 2.65 ÷ 2.68 i 2.70 ÷ 2.72 w tablicy 2.4) opisano w pracy [33] jednym równaniem:

$$\lambda = 0{,}224 - 0{,}14n + 8{,}1 \cdot 10^{-4} T. \qquad (2.63)$$

Uogólniona zależność współczynnika przewodzenia ciepła soków i syropów owocowych, a także wodnych roztworów glukozy i fruktozy, dla przedziału temperatury 293 K < T < 353 K i zawartości w nich suchej substancji $0 \leq n \leq 0{,}71$ jest następująca [26]:

$$\lambda = 0{,}1759 + 1{,}45 \cdot 10^{-3} T - 0{,}6346n + 1{,}28 \cdot 10^{-3} nT. \qquad (2.64)$$

Tablica 2.4.

Współczynnik przewodzenia ciepła przetworów owocowych i warzywnych

Produkt	Temperatura T [K]	Zawartość suchej substancji n	Wilgotność m	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/m·K]	Numer wzoru	Literatura
1	2	3	4	5	6	7
Puree z:						
brzoskwini	293÷353	0,11		$\lambda = 0{,}194 + 8{,}48 \cdot 10^{-4} T$	(2.65)	[33]
gruszki		0,16		$\lambda = 0{,}174 + 8{,}61 \cdot 10^{-4} T$	(2.66)	
guajawy		0,126		$\lambda = 0{,}154 + 1{,}23 \cdot 10^{-3} T$	(2.67)	[23]
jabłek		0,089		$\lambda = 0{,}282 + 6{,}34 \cdot 10^{-4} T$	(2.68)	[33]
			0,78	$\lambda = 0{,}182 + 1{,}40 \cdot 10^{-3} T$	(2.69)	[34]
mango	293÷353	0,166		$\lambda = 0{,}138 + 1{,}25 \cdot 10^{-3} T$	(2.70)	[23]
moreli		0,108		$\lambda = 0{,}249 + 7{,}08 \cdot 10^{-4} T$	(2.71)	[33]
pigwy		0,079		$\lambda = 0{,}121 + 1{,}06 \cdot 10^{-3} T$	(2.72)	
pomidora			0,684	$\lambda = 0{,}115 + 1{,}44 \cdot 10^{-3} T$	(2.73)	[12]
śliwy		0,188		$\lambda = 0{,}208 + 7{,}94 \cdot 10^{-4} T$	(2.74)	[33]
wiśni	299			0,530		[12]
ziemniaka	$>T_k$			0,488		
Sok z :						
buraków	283÷298	0,05÷0,2		$\lambda = 0{,}14 - 0{,}3n + 0{,}0016T$	(2.75)	[12]
czereśni	293÷353	0,116		$\lambda = -0{,}30 + 2{,}81 \cdot 10^{-3} T$	(2.76)	[25]
gruszy	293	0,15÷0,6		$\lambda = 0{,}60 - 0{,}326n$	(2.77)	[34]
jabłek	303÷343	0,08÷0,4		$\lambda = 0{,}29 + 0{,}001T - 0{,}25n$	(2.78)	[13]

cd. tablicy 2.4.

1	2	3	4	5	6	7
jabłek i czereśni	293÷353	0,1352		$\lambda = 0{,}036 + 1{,}95 \cdot 10^{-3} T$	(2.79)	[25]
pomarańcz	255			2,388		[30]
	303			0,435		
	243÷258	0,20		$\lambda = 24{,}68 - 0{,}087T$	(2.80)	[8]
selera		0 ÷0,30		$\lambda = 0{,}566 - 0{,}357n$	(2.81)	[21]
wiśni	293÷353	0,113		$\lambda = -0{,}187 + 2{,}46 \cdot 10^{-3} T$	(2.82)	[33]
winogron	298÷348	0,20		$\lambda = -0{,}192 + 2{,}29 \cdot 10^{-3} T$	(2.83)	[27]
Nektar z:						
brzoskwini	293÷353	0,0965		$\lambda = 0{,}246 + 6{,}87 \cdot 10^{-4} T$	(2.84)	[16]
guajawy		0,17		$\lambda = 0{,}142 + 1{,}23 \cdot 10^{-3} T$	(2.85)	[23]
gruszki		0,17		$\lambda = 0{,}254 + 6{,}93 \cdot 10^{-4} T$	(2.86)	[16]
jabłek i moreli	293÷353	0,1514		$\lambda = 0{,}299 + 5{,}25 \cdot 10^{-4} T$	(2.87)	
mango		0,155		$\lambda = 0{,}144 + 1{,}25 \cdot 10^{-3} T$	(2.88)	[23]
moreli		0,1473		$\lambda = 0{,}143 + 9{,}67 \cdot 10^{-4} T$	(2.89)	[16]
pigwy		0,1088		$\lambda = 0{,}142 + 1{,}02 \cdot 10^{-3} T$	(2.90)	
śliwy		0,1419		$\lambda = 0{,}256 + 6{,}66 \cdot 10^{-4} T$	(2.91)	
Syrop z:						
czereśni	293÷353	0,682		$\lambda = -0{,}300 + 2{,}81 \cdot 10^{-3} T$	(2.92)	[25]
maliny i truskawki		0,691		$\lambda = 0{,}392 + 8{,}0 \cdot 10^{-5} T$	(2.93)	
wiśni		0,6895		$\lambda = 0{,}336 + 2{,}7 \cdot 10^{-4} T$	(2.94)	
Koncentrat z:						
jabłek	298÷343	0÷0,70		$\lambda = 0{,}234 + 1{,}3 \cdot 10^{-3} T + 0{,}079n - 1{,}50 \cdot 10^{-3} nT$	(2.95)	[34]
pomarańcz (odpektynizowany)		0÷0,40		$\lambda = 0{,}604 - 2{,}31 \cdot 10^{-2} n - 2{,}8 \cdot 10^{-5} n^2$	(2.96)	[39]
pomidorów	293÷423	0,05÷0,80		$\lambda = 0{,}495 - 0{,}961n + 5{,}28 \cdot 10^{-4} T + 0{,}00142nT$	(2.97)	[8]

cd. tablicy 2.4.

1	2	3	4	5	6	7
Kremogen z:						
bananów	293÷353	0,251		$\lambda = -0{,}08 + 0{,}0195T$	(2.98)	[31]
jabłek		0,104		$\lambda = 0{,}42 + 0{,}00048T$	(2.90)	
marchwi		0,0053		$\lambda = 0{,}0025 + 0{,}00187T$	(2.100)	
Galaretka jabłkowa	295		0,819	0,219		[29]
Powidło jabłkowe	273		0,323	$\lambda = -0{,}367 + 2{,}45 \cdot 10^{-3} T$	(2.101)	
Dżem z:						
agrestu	273÷373		0,38	$\lambda = 0{,}338 + 6{,}24 \cdot 10^{-4} T$	(2.102)	
czarnej porzeczki			0,417	$\lambda = -0{,}495 + 2{,}78 \cdot 10^{-3} T$	(2.103)	
śliwki			0,412	$\lambda = -0{,}272 + 1{,}99 \cdot 10^{-3} T$	(2.104)	
truskawki			0,407	$\lambda = -0{,}384 + 3{,}17 \cdot 10^{-3} T$	(2.105)	

Współczynnik przewodzenia ciepła soków, syropów i nektarów, jako cieczy zasocjowanych [12] może być także określany z równania uniwersalnego (równanie (4.70) w: Niesteruk R.: Właściwości termofizyczne żywności. Część I. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1996, str. 83):

$$\lambda_T = \frac{B}{\alpha_T} \cdot \rho_T^{4/3} .$$

Wzory do określania stałej B dla soku buraczanego, puree z pomidorów i jabłek znajdują się w tablicy 2.5 [12]:

Tablica 2.5.

Wzory do obliczania stałej B

Produkt	Zawartość suchej substancji n	$10^4 \cdot B$	Numer wzoru
Sok buraczany	$0{,}05 < n < 0{,}25$	$0{,}701 - 0{,}606\, n$	(2.106)
Sok i koncentrat pomidorowy	$0{,}05 < n < 0{,}20$	$0{,}6785 - 0{,}810\, n$	(2.107)
	$0{,}20 < n < 0{,}40$	$0{,}646 - 0{,}6475 n$	(2.108)
Puree z jabłek	$n \le 0{,}22$	$0{,}711 - 0{,}780\, n$	(2.109)
	$0{,}23 < n < 0{,}64$	$0{,}641 - 0{,}46 n$	(2.110)

2.3. Współczynnik wyrównywania temperatury

Współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) przetworów owocowych i warzywnych zmienia się, przede wszystkim, pod wpływem temperatury i zawartości w nich suchej substancji. Dyfuzyjność cieplna wzrasta ze wzrostem temperatury (dla przedziału $T > T_k$) i maleje ze wzrostem n (tablica 2.6).

Tablica 2.6.

Współczynnik wyrównywania temperatury przetworów owocowych i warzywnych

Produkt	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Sucha substancja n	Współczynnik wyrównywania temperatury a [m^2/s]	Numer wzoru	Literatura
1	2	3	4	5	6	7
Pulpa z:						
batatów	303÷393			$a \cdot 10^7 = 0{,}99 + 1{,}12 \cdot 10^{-3} T$	(2.111)	[12]
batatów z dodatkiem skrobi				$1{,}32 \cdot 10^{-7}$		[36]
jabłek	300÷291			$1{,}50 \cdot 10^{-7}$		[10]
pomidorów	277÷299			$1{,}48 \cdot 10^{-7}$		[14]
pomidorów	303		0,291	$1{,}17 \cdot 10^{-7}$		[8]
winogron				$1{,}23 \cdot 10^{-7}$		[12]
wiśni	300	0,923		$1{,}15 \cdot 10^{-7}$		[12]
ziemniaków		0,70		$0{,}83 \cdot 10^{-7}$		[1]
		0,80		$1{,}00 \cdot 10^{-7}$		
		0,90		$1{,}10 \cdot 10^{-7}$		
Przecier z porzeczki	273÷373	0,417		$a \cdot 10^7 = 0{,}886 + 5{,}46 \cdot 10^{-4} T$	(2.112)	[29]
Puree z:						
brzoskwini	293÷353		0,110	$a \cdot 10^7 = 0{,}447 + 2{,}50 \cdot 10^{-3} T$	(2.113)	[33]
gruszy			0.160	$a \cdot 10^7 = 0{,}483 + 2{,}33 \cdot 10^{-3} T$	(2.114)	
jabłek			0,089	$a \cdot 10^7 = 0{,}611 + 2{,}08 \cdot 10^{-3} T$	(2.115)	
moreli			0,108	$a \cdot 10^7 = 0{,}456 + 2{,}54 \cdot 10^{-3} T$	(2.116)	
pigwy			0,079	$a \cdot 10^7 = 0{,}179 + 3{,}37 \cdot 10^{-3} T$	(2.117)	
śliwy			0,188	$a \cdot 10^7 = 0{,}509 + 2{,}27 \cdot 10^{-3} T$	(2.118)	

cd. tablicy 2.6.

1	2	3	4	5	6	7
Kremogen z:						
bananów	293÷353		0,251	$a\cdot10^7 = 0{,}536 + 0{,}003T$	(2.119)	[31]
jabłek			0,104	$a\cdot10^7 = 0{,}716 + 0{,}0022T$	(2.120)	
marchwi			0,053	$a\cdot10^7 = 0{,}878 + 0{,}002T$	(2.121)	
Sok z:						
czarnej jagody	289	0,872		$1{,}367\cdot10^{-7}$		[8]
czereśni	293÷353		0,1161	$a\cdot10^7 = -0{,}735 + 6{,}9\cdot10^{-3}T$	(2.122)	[25]
jabłek	298÷343		0,1÷0,7		(2.123)	[32]
jabłek i czereśni	293÷353		0,135	$a\cdot10^7 = -0{,}2 + 5{,}2\cdot10^{-3}T$	(2.124)	[25]
malin		0,885		$1{,}367\cdot10^{-7}$		[8]
pomarańcz	303÷343			$a\cdot10^7 = -0{,}1704 + 9{,}15\cdot10^{-3}T$	(2.125)	[20]
		0,89		$1{,}367\cdot10^{-7}$		[8,12]
pomidorów	293÷423		0,05÷0,8	$a = a_m m + a_n n$ $a_m\cdot10^7 = -1{,}186 + 0{,}0138T - 0{,}163T^2$ $a_n\cdot10^7 = 0{,}7687 - 0{,}0073T + 1{,}76\cdot10^{-5}T^2$	(2.126) (2.127) (2.128)	[35]
truskawek	288,8	0,917		$1{,}393\cdot10^{-7}$		[8]
winogron		0,847		$1{,}316\cdot10^{-7}$		
	273÷333			$a\cdot10^7 = -0{,}156 + 4{,}7\cdot10^{-3}T$	(2.129)	[12]
	233÷268		0,10	$a\cdot10^7 = -14{,}34 - 0{,}0533T$	(2.130)	
wiśni	293÷353		0,113	$a\cdot10^7 = 1{,}2 + 5{,}4\cdot10^{-3}T$	(2.131)	[25]
Nektar z:						
brzoskwini	293÷353		0,0965	$a\cdot10^7 = 0{,}688 + 1{,}69\cdot10^{-3}T$	(2.132)	[16]
gruszek			0,170	$a\cdot10^7 = 0{,}515 + 2{,}36\cdot10^{-3}T$	(2.133)	
jabłek i moreli			0,155	$a\cdot10^7 = 0{,}758 + 1{,}47\cdot10^{-3}T$	(2.134)	
pigwy			0,1088	$a\cdot10^7 = 0{,}318 + 2{,}9\cdot10^{-3}T$	(2.135)	
śliw			0,1419	$a\cdot10^7 = 0{,}682 + 1{,}75\cdot10^{-3}T$	(2.136)	

cd. tablicy 2.6.

1	2	3	4	5	6	7
Syrop z:						
czereśni		0,695		$a\cdot10^7 = 1{,}0{,}78 + 3{,}0\cdot10^{-4}T$	(2.137)	[25]
malin	293÷353	0,691		$a\cdot10^7 = 1{,}115 + 2{,}0\cdot10^{-4}T$	(2.138)	
truskawek		0,711		$a\cdot10^7 = 1{,}013 + 5{,}0\cdot10^{-4}T$	(2.139)	
wiśni		0,689		$a\cdot10^7 = 1{,}051 + 4{,}0\cdot10^{-4}T$	(2.140)	
Powidła z jabłek		0,325		$1{,}03\cdot10^{-7}$		[29]
Dżem z:						
agrestu		0,380		$a\cdot10^7 = 0{,}438 + 2{,}24\cdot10^{-3}T$	(2.141)	[29]
czarnej porzeczki	273÷373	0,376		$a\cdot10^7 = 0{,}891 + 5{,}09\cdot10^{-4}T$	(2.142)	
truskawek		0,407		$a\cdot10^7 = 1{,}047 + 8{,}85\cdot10^{-5}T$	(2.143)	
śliwek		0,412		$a\cdot10^7 = 0{,}942 + 4{,}43\cdot10^{-5}T$	(2.144)	
Marmolada	278÷338	0,450		$1{,}11\cdot10^{-7}$		[19]

Zależność dyfuzyjności cieplnej przetworów owocowych i warzywnych od dwóch podstawowych parametrów: temperatury i zawartości suchej substancji pozwoliła na sformułowanie na podstawie równań (2.113) ÷ (2.118) w tablicy 2.6 dla sześciu puree następującego równania:

$$a = (4{,}67 - 1{,}4n + 0{,}025T)\cdot10^{-8}, \tag{2.145}$$

które jest ważne dla 293 K < T < 353 K i 0,08 ≤ n ≤ 0,10 [33].

Minčev [25] opracował dla przedziału temperatury 293 K < T < 353 K i 0 ≤ n ≤ 0,70 następujące równanie dla soków i syropów owocowych:

$$a = (2{,}847 + 0{,}039T - 5{,}663n - 0{,}0375nT)\cdot10^{-8} \tag{2.146}$$

2.4. Gęstość

Gęstość przetworów owocowych i warzywnych była przedmiotem stosunkowo licznych badań [8,9,12,13,16,17,18,24,25,28], przy czym otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że gęstość zmienia się pod wpływem dwóch parametrów:

zawartości suchej substancji (n) i temperatury (T). Gęstość przetworów rośnie ze wzrostem T i obniżeniem wartości n. Zmiana gęstości jest najczęściej przedstawiana [3,8,12,13,16,17,18,22,24,25,33] w postaci równań liniowych. Natomiast w [5,6,7,9] zmianę gęstości w zależności od n zapisano w formie zależności potęgowej. Jednakże obie formuły dają praktycznie jednakowe wartości zmian gęstości przy jednakowej zmianie n. Zależność potęgowa ma zastosowanie dla większego przedziału zawartości suchej substancji. Wpływ n i T na gęstość nie jest jednakowy. Zawartość suchej substancji ma kilkadziesiąt razy większy wpływ na gęstość niż temperatura. Raičkov [33], na podstawie badań gęstości sześciu puree owocowych opracował następujący wzór ogólny, ważny dla przedziału temperatury 293÷353 K i gęstości $0{,}08 \le n \le 0{,}19$:

$$\rho = 579{,}87 + 255n + 3{,}238T - 6{,}03 \cdot 10^{-3} T^2, \qquad (2.147)$$

Zmianę gęstości 30 rodzajów pulp owocowych w zależności od zawartości w nich substancji suchej, opisano w pracy [3] równaniem:

$$\rho = 996 + 417n, \qquad (2.148)$$

które zweryfikowano dla $0{,}05 < n < 0{,}30$.

Przykładem zastosowania wzoru potęgowego do opisu zmian gęstości soku, w zależności od zawartości suchej substancji jest równanie dla soku jabłkowego [5]:

$$\rho = 977{,}50 + 350 \exp n - 0{,}564T, \qquad (2.149)$$

Powyższy wzór jest użyteczny dla przedziału temperatury $293\ \text{K} < T < 353\ \text{K}$ i zawartości suchej substancji $0{,}14 < n < 0{,}39$. Podobna zależność gęstości soku pomarańczowego od zawartości w nim suchej substancji znajduje się w [28]:

$$\rho = 994{,}4 + 307n + 282n^2 \qquad (2.150)$$

Wzór ten jest ważny dla $T = 294\ \text{K}$ i $0{,}1 < n < 0{,}65$.

Większa zawartość cukru (s) zwiększa gęstość soku owocowego [12]:

$$\rho = 978 + 574s \qquad (2.151)$$

Równanie opracowano dla soku jabłkowego o zawartości cukru $0{,}095 < s < 0{,}520$ i temperatury 293 K.

Gęstość soków nie zależy [13] od ich gatunku. Tłumaczy się to praktycznie jednakową gęstością ich substancji suchej oraz jednakową i niewielką zawartością w nich gazów. Gęstość soku klarowanego jest większa niż soku z miąższem. Według [12] gęstość soku jabłkowego klarowanego równa się 1060 kg/m^3, natomiast soku z miąższem –1050 kg/m^3. Równanie ogólne opisujące gęstość soków i syropów ma postać [25]:

$$\rho = 1132{,}9 + 558{,}8n - 0{,}49T - 0{,}241nT \qquad (2.152)$$

Wzór ma zastosowanie dla $293\ \text{K} \le T \le 353\ \text{K}$ i $0 < n < 0{,}71$. Dane o gęstości przetworów owocowych i warzywnych zawiera tablica 2.7.

Tablica 2.7.

Gęstość przetworów owocowych i warzywnych

Produkt	Temperatura T [K]	Zawartość suchej substancji n	Wilgotność m	Gęstość ρ [kg/m^3]	Numer wzoru	Literatura
1	2	3	4	5	6	7
Pulpa z:						
brusznicy			0,8397	1062		[12]
jabłek	302			990		
pomidorów	299			892		
wiśni	300		0,923	1010		
żurawin			0,851	1064		
Puree z:						
brzoskwiń	293÷353	0,08÷0,19		$\rho = -13{,}20 + 7{,}16T - 1{,}22 \cdot 10^{-2} T^2$	(2.153)	[33]
grusz		0,08÷0,19		$\rho = 765{,}5 + 2{,}15T - 4{,}86 \cdot 10^{-3} T^2$	(2.154)	
jabłek	293÷353	0,08÷0,19		$\rho = 645 + 2{,}84T - 5{,}2 \cdot 10^{-3} T^2$	(2.155)	
jabłek i brzoskwiń				$\rho = 1244 - 0{,}467T$	(2.156)	[12]
jabłek i wiśni				$\rho = 1178 - 0{,}282T$	(2.157)	
marchwi	265			897		
pigwy	293÷353	0,08÷0,19		$\rho = 795 + 1{,}94T - 3{,}74 \cdot 10^{-3} T^2$	(2.158)	[33]
pomidorów	299			1065		[12]
śliw	293÷353	0,08÷0,19		$\rho = 463 + 4{,}36T - 7{,}98 \cdot 10^{-3T} T^2$		[33]

cd. tabeli 2.7.

1	2	3	4	5	6	7
Sok z:						
brusznicy			0,8818	1048		[7]
buraków	293		0 ÷1,0	$\rho = 998 + 415n$	(2.160)	
czereśni	293÷353	0,16		$\rho = 1379 - 0{,}475T$	(2.161)	[9]
cytryny	293		0 ÷1,0	$\rho = 1404 - 406m$	(2.162)	[7]
jabłek	273÷363	0,12÷0,74		$\rho = 1084 + 600n - 0{,}308T - 0{,}407\,nT$	(2.163)	
	293	0,09÷0,74		$\rho = 986 + 498n$	(2.164)	
	$T < T_k$	0,11÷0,64		$\rho = 987{,}5 + 46{,}5n$	(2.165)	
jabłek i czereśni	293÷353	0,1352		$\rho = 1192 - 0{,}495T$	(2.166)	[7]
malin		0÷1,0		$\rho = 1084 + 665n - 0{,}31T - 0{,}62nT$	(2.167)	
mandarynek	293		0÷1,0	$\rho = 1417 - 419m$	(2.168)	[7]
pomarańcz	293÷343			$\rho = 1549 - 0{,}67T$	(2.169)	
pomidorów	293÷433	0,05÷0,80		$\rho = 1136 + 412n - 0{,}464T + 0{,}245\,nT$	(2.170)	[3]
porzeczki: czarnej	T_k	0,135÷0,54		$\rho = 994 + 472n$	(2.171)	[7]
czerwonej	293		0÷1,0	$\rho = 1452 - 454m$	(2.172)	
truskawek			0,917	1033		[3]
śliw: śwież.				1033–1049		[7]
zamrożon.	$T<T_k$	0,14÷0,63		$\rho = 992 + 472n$	(2.173)	
wiśni	293÷353	0,113		$\rho = 1179 - 0{,}481T$	(2.174)	[9]
wiśni (kwaśny)		0,14÷0,39		$\rho = 790 + 350\exp(1{,}08n) - 5{,}41 \cdot 10^{-4} T$	(2.175)	[38]
winogron	273÷343	0,15÷0,75		$\rho = 1037 + 686n - 0{,}25T - 0{,}42nT$	(2.176)	[7]
żurawin			0,886	1052		
Nektary z:						
brzoskwini	293÷353	0,0965		$\rho = 1182{,}6 - 0{,}489T$	(2.177)	[14]
gruszki		0,170		$\rho = 1220{,}1 - 0{,}518T$	(2.178)	
jabłek i moreli	293÷353	0,1514		$\rho = 1215{,}9 - 0{,}53T$	(2.179)	
moreli		0,1493		$\rho = 1207{,}6 - 0{,}506T$	(2.180)	
pigwy		0,1088		$\rho = 1207{,}7 - 0{,}549T$	(2.181)	
śliwki		0,1419		$\rho = 1176{,}1 - 0{,}412T$	(2.182)	

cd. tablicy 2.7.

1	2	3	4	5	6	7
Syropy z:						
czereśni	293÷353	0,695		$\rho = 1519 - 0{,}67T$	(2.183)	[9]
jabłek	293÷343			$\rho = 1503 - 0{,}57T$	(2.184)	[7]
malin	293÷353	0,691		$\rho = 1531 - 0{,}635T$	(2.185)	[9]
pomarańcz	293÷343			$\rho = 1549 - 0{,}67T$	(2.186)	[7]
truskawek	293÷353	0,711		$\rho = 1529 - 0{,}682T$	(2.187)	[9]
wiśni		0,689		$\rho = 1523 - 0{,}66T$	(2.188)	
Powidło jabłkowe	273÷293		0,325	1341		[7]
Dżem z:						
agrestu	293		0,380	1250		[16]
czarnej porzeczki			0,376	1225		
śliwek			0,412	1256		
truskawek			0,407	1209		

Literatura

[1] **Albin F.V., Badari Narayana K., Srinivasa Murthy S., Krishna Murthy M.V.** 1979: *Thermal diffusivitics of some unfrozen and frozen food models*, Journal of Food Technology,Vol. 14, 361–367.

[2] **Alvarado de Dios J., Moreno C.C.** 1987: *Propiedades fizicas de fructas.III. Calor especifico de pulpa como function de su humedad*, Rev. latinoam. transf. cal. mat., 11, 131–139.

[3] **Alvarado de Dios J., Romero C.H.** 1989: *Physical Properties of Fruits I – II. Density and Viscosity of Juices as Functions of Soluble Solids Content and Temperature*, Latin American Applied Research,Vol.19, 15-21. Także: *Physikalische Eigenschaften von Früchten-Dichte und Viscosität von Fruchsäften in Abhängigkeit von löslicher Trockensubstanz und Temperatur*, Flüssiges Obst, Jahrgang 58, Heft 1/91, 18–22.

[4] **Alvarado de Dios J.** 1991: *Specific Heat of Dehydrates Pulps of Fruits*, Journal of Food Engineering, 14, 189–195.

[5] **Bayindirli L.** 1992: *Mathematical Analysis of Variation of Density and Viscocity of Apple Juice with Temperature and Concentration*, Journal of Food Processing and Preservation,Vol. 16, 23–28.

[6] **Bayindirli L.** 1992.: *Modeling of Thermophysical Properties of Sour Cherry Juice GIDA*, Vol. 17, 6, 405–407.

[7] **Bayindirli L.** 1993: *Density and Viscosity of Grape Juice as a Function of Concentration and Temperature*, Journal of Food Processing and Preservation, Vol. 17, 147–151.

[8] **Choi Y., Okos M.R.** 1986: *Thermal Properties of Liquid Foods – Review.* W: *Physical and Chemical Properties of Food.* Ed by Okos M.R. Published by American Society of Agricultural Engineers, ASAE Publication, 09 – 86, 35–77.

[9] **Constela D.T., Lozano J.E., Crapiste G.H.** 1987: *Thermophysical Properties of clarified Apple Juice as a Function of Concentration and Temperature*, „14 Jordanas invest. cienc. ing. Quim. Apl., Santa Fé, 26-29 oct., 1987: Actas. Vol. 2. [Santa Fé]", 467–462.

[10] **Gaffney J.J., Baird C.D., Eshelman W.D.** 1980: *Review and analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables*, ASHARE Transactions, Vol. 86, part 2, 261–280.

[11] **George R.M., Holdsworth S.D.** 1990: *A Literature Survey of Heat Capacity of Foods Products.* The Campden Food and Drink Research Association, Technical Bulletin №. 76, September 1990, 7–8.

[12] **Гинзбург А.С., Громов М.А.** 1987: *Теплофизические характеристики картофеля овощей и плодов.* В.О. „ Агропромиздат„ Москва.

[13] **Громов М.А.** 1987: *Обобщены формулы для расчета плотности и теплопроводности соков*, Вопросы ускорения научно-технического прогресса в общественном питании, Москва, 142–147.

[14] **Heldman D.R., Lund D.B.** 1992: *Handbook of Food Engineering*, Marcel Dekker, Inc. New York/ Basel/ Hong Kong, 254.

[15] **Ильясов С.Г., Ангерсбах А.К., Ангерсбах Н.И., Панин А.С.** 1987: *Теплофизические характеристики плодов и винограда*, Известия вузов. Пищевая техно-логия, № 4, 81–83.

[16] **Кименов Г., Раичков Г., Минчев М.С. Димитров Ч**. 1987: *Топлофизични характеристики на плодовы нектари*, Хранителнопромишлена наука,Т.3,№ 7,32–36.

[17] **Коларов К.М., Громов М.А.** 1973: *Универсально уравнение за изчисляване топлопроводности на плодовы и зеленчукови соки и сиропи*, Хранителна промышленост, т.22, 10.

[18] **Коларов К.М., Гарчева Т.В., Попов Г.И.** 1989: *Физические характеристики на суровины и полуфабрикаты и хранительны продукты*, Земиздат, София.

[19] **Kostaropoulos A.E., Spiess W.E.L., Wolf W.** 1975: *Anhaltswerte für die Temperaturleitfähigkeit von Lebensmitteln*, Lebensm.- Wiss.- u.- Technol., Vol. 8, 108–110.

[20] **Kroužilová Z., Budiček L.** 1972: Přispevek do meření fýzikalnich vlastnosti kapalnych a těstovitych materiálu, Potravinařská a chladici techniká, № 5,138–140.

[21] **Lau A.K.,March A.C., Lo K.V., Cumming D.B.** 1992: *Physical Properties of Celery Juice*. Canadian Agricultural Engineering, Vol. 34, № 1, January / February/March, 105–110.

[22] **Lopez–Ramos A., Palmisano E., Dombey A., Pimentel J.A., Fayés D., González-Mendizabal D.** 1993: *Propiedades térmicas de frutas y hortalizas tropicales*, Revista Española y Tecnologia de Alimentos, Vol. 33, № 3, 271–283.

[23] **Луднева Д., Коларов К.М.** 1994: *Реологична и топлофизична характеристика на пюре и нектари от тропични плодове*, Хранителна промишленост, Т. 8, 27–28.

[24] **Масликов В.А., Медведев О.К.** 1967: *Некоторые физические константы томатопродуктов*, Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 78 –79.

[25] **Минчев М.С., Кименов Г., Раичков Г., Кармъзова П., Попов Г.** 1988: *Топлофизични характеристики на плодови сокове и сиропы*, Научни трудове на Висшия институт по хранителна и вкусова промышленост – Пловдив, Том XXXV, св. 1, 301–312.

[26] **Минчев М.С., Кименов Г., Раичков Г.** 1989: *Обобщены зависимости за топлофизичните характеристики плодови сокове и сиропы*, Хранителна промишленост, Том 3, 24 –27.

[27] **Моисеев А.М.** 1963: *Теплопроводность яблочного и виноградного соков*, Консервная и овощесушильная промышленность, № 11, 21–23.

[28] **Moresi M., Spinosi M.** 1980: *Engineering factors in the production of concentrated fruit juices.* 1. Fluid physical properties of orange juices, Journal of Food Technology, № 3, 265–276.

[29] **Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A.** 1991: *Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych.* Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, Politechnika Białostocka, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

[30] **Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P.** 1980: *A Compilation of Thermal Properties of Foods*, Food Technology – November,76–92.

[31] **Popowski G.** 1994: *Badanie współczynnika przewodzenia ciepła i współczynnika wyrównywania temperatury kremogenów w zależności od składu i temperatury.* Praca dyplomowa, magisterska, Politechnika Białostocka, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

[32] **Раичков Г., Кименов Г.** 1984: *Топлофизични характеристики на ябълков концентрат. Изследование на коефициента на топлопроводност, температуропроводност, критерия на Прандтъл и повърхностного напрежение*, Научни трудове на Висшия институт по хранителна и вкусова промышленост – Пловдив, Том XXXI, св. II , 277–284.

[33] **Раичков Г., Кименов Г., Минчев М.** 1989: *Топлофизични характеристики на плодови пюрета*, Научни трудове на Висшия институт по хранителна и вкусова промышленост – Пловдив, Том XXXVI , св. I, 53–61.

[34] **Riedel L.** 1949: *Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Zückerlösungen*, Fruchtsäften and Milch, Chemie – Ingenieur – Technik, №. 17/18, 340 –341.

[35] **Ruciński M.** 1994: *Badanie efektywnego ciepła właściwego kremogenów w zależności od składu i temperatury*, Praca dyplomowa, magisterska, Politechnika Białostocka, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

[36] **Singh R.P., Medina A.G.** 1989: *Food Properties and Computer- Aided Engineering of Food Processing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dortrecht/Boston/, London, 51.

[37] **Sweat V.E.** 1986: *Thermal Properties of Foods*. Rao M.A., Rizvi S.S.H.ed. Marcel Dekker Inc. New York.

[38] **Virendra K. Bhumbla., Singh A.K., Singh Y.** 1989: *Prediction of Thermal Conductivity of Fruit Juices by a Thermal Resistance Model*, Journal of Food Science, Vol. 54, № 4, 1007–1012.

[39] **Ziegler G.R., Rizvi S.S.H.** 1985: *Thermal Conductivity of Liquid Foods by the Thermal Comparator Method*, Journal of Food Science, Vol. 50, 1458–1462.

3. JAJA I ICH PRODUKTY

3.1. Jaja

Eksperymentalna wartość ciepła właściwego jaja o wilgotności m = 0,664 w przedziale temperatury 277,6 K ÷ 305,4 K wynosi c = 3293 J/kg· K. Według [4] ciepło właściwe jaja o wilgotności m = 0,66, 0,67, 0,74 wynosi odpowiednio: 3056, 3098, i 3182 J/ kg·K. Ciepło właściwe jaja dla temperatury $T \geq 283$ K zaleca się obliczać [4] z reguły addytywności, przy czym zakłada się, że w jego skład wchodzi: białko, żółtko i skorupa. Zawartość tych składników jest zazwyczaj następująca: białko – 0,58, żółtko – 0,32, skorupka – 0,10. Średnia wartość ciepła właściwego wymienionych składników wynosi: białko (m=0,80)– c = 3642 J/kg·K, żółtko (m = 0,50) – 2832 J/kg·K, skorupka – c = 1005 J/kg·K. Ciepło właściwe jaja zamrożonego wynosi c = 1680 J/kg·K [1,7,8] lub c = 1660 J/kg·K [6].

Współczynnik przewodzenia ciepła jaja o zawartości białka 0,652, żółtka 0,348 i wilgotności m = 0,74 wynosi 0,432 W/m·K. Przewodność cieplna jaja zamrożonego (263K÷267K) równa się 0,969 W/m·K [1,11]. Natomiast współczynnik wyrównywania temperatury jaja równa się $a = 1{,}23 \cdot 10^{-7}$ m^2/s. Gęstość jaja według [4] wynosi 1083 kg/m^3.

3.2. Białko

Ciepło właściwe białka jest stałe w dużym przedziale temperatury. Według Riedela [10] wartość (średnia) ciepła właściwego białka w przedziale temperatury 275 K ÷ 310 K równa się odpowiednio: 3642 J/kg·K (dla m = 0,80) i 3890 J/kg· K dla białka o wilgotności m = 0,90. Do obliczeń ciepła właściwego białka o $m > 0{,}268$ [10] stosuje się regułę addytywności, przy czym jego wartość wzrasta ze wzrostem wilgotności, np. dla T = 293 K [10]:

$$c = 1717 + 2480\ \mathrm{m}. \qquad (3.1)$$

W przedziale wilgotności $0{,}268 < m < 1{,}00$ ciepło właściwe białka zamrożonego ($T = 233$ K) zmienia się według zależności [10]:

$$c = 1961 - 165\ \mathrm{m}. \tag{3.2}$$

Ciepło właściwe białka wysuszonego rozpyłowo ($m = 0{,}06$) wynosi 1050 J/kg·K [1,8,9].

Współczynnik przewodzenia ciepła wzrasta ze wzrostem temperatury. W przedziale temperatury 272 K ÷ 323 K zmienia się on [4] zgodnie z równaniem:

$$\lambda = 0{,}117 + 1{,}42 \cdot 10^{-3} T\,. \tag{3.3}$$

W przedziale temperatury 306 K ÷ 311 K przewodność cieplna białka ($m = 0{,}883$) wynosi 0,562 W/m·K [9] lub 0,557 W/m·K [11].

Współczynnik wyrównywania temperatury białka zmienia się zgodnie z wzorami [4]:

$$a = (354{,}6 - 1{,}18T) \cdot 10^{-8} \quad \text{dla } 233\ \mathrm{K} < T < 272\ \mathrm{K}\,, \tag{3.4}$$

$$a = (-2{,}45 + 0{,}05T) \cdot 10^{-8} \quad \text{dla } 279\ \mathrm{K} < T < 323\ \mathrm{K}\,. \tag{3.5}$$

Według [2] współczynnik wyrównywania temperatury białka jaja ($m = 0{,}88$) wynosi $a = 1{,}267 \cdot 10^{-7}$ m^2/s ($T = 278$ K) i $a = 1{,}452 \cdot 10^{-7}$ m^2/s ($T = 338$ K).

Gęstość białka o wilgotności $m = 0{,}85 \div 0{,}87$ waha się od 1042 kg/m^3 do 1080 kg/m^3. Ze wzrostem temperatury, szczególnie przy T > 273 K, gęstość białka maleje [4]: dla $T = 273$ K otrzymano $\rho = 1048$ kg/m^3, natomiast dla 353 K $\rho = 1015$ kg/m^3. Gęstość białka maleje w procesie jego przechowywania, szczególnie w temperaturze wyższej od 293 K [4].

3.3. Żółtko

Ciepło właściwe żółtka jest zależne od wilgotności i temperatury. W przedziale temperatury 273 K ÷ 313 K i wilgotności $0{,}115 < m < 1{,}00$ zależność jest następująca [5,6]:

$$c = 2655 + 11{,}80\ \mathrm{m}\,. \tag{3.6}$$

Ciepło właściwe żółtka rośnie także ze wzrostem temperatury [4]:

$$c = 2326 + 2{,}20\ \mathrm{T}, \tag{3.7}$$

przy czym, wzór jest ważny dla $273 < T < 323$ K i $m = 0{,}50$.

Ciepło właściwe proszku żółtka o wilgotności $m = 0{,}03$ wynosi $c = 879$ J/kg·K dla $T < T_k$ a dla $T > T_k$ $c = 921$ J/kg·K [8].

Współczynnik przewodzenia ciepła żółtka rośnie ze wzrostem temperatury. W przedziale temperatury 279 K ÷ 323 K wzrost ten opisany jest równaniem [4]:

$$\lambda = 0{,}345 + 2{,}0 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{3.8}$$

Według [1,8] przewodność cieplna żółtka wynosi 0,339 W/m·K (dla T = = 308 K) bądź 0,420 W/ m·K dla żółtka o wilgotności $m = 0{,}51$ i zawartości tłuszczu $f = 0{,}327$ [9].

Przewodność cieplna żółtka zamrożonego (223 K < T < 272 K) zmienia się następująco [4]:

$$\lambda = 0{,}766 - 6 \cdot 10^{-5} T\,. \tag{3.9}$$

Dyfuzyjność cieplna żółtka w przedziale temperatur 273 ÷ 323 K wzrasta według wzoru:

$$a = (6{,}6 + 0{,}011T) \cdot 10^{-8}. \tag{3.10}$$

Gęstość żółtka (m =0,5) zawiera się w granicach 1020÷1075 kg/m^3 [4] i jest mniejsza od gęstości białka, co wynika z większej w żółtku zawartości tłuszczu [5].

3.4. Masa jajowa

Zwiększenie wilgotności masy jajowej powoduje wzrost jej ciepła właściwego. W przedziale $m = 0{,}147 \div 0{,}74$ ciepło właściwe zmienia się według wzoru:

$$c = 2048 + 1550\ \mathrm{m}. \tag{3.11}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła tego produktu w zależności od temperatury opisany jest wyrażeniem [4]:

$$\lambda = 0{,}11 + 1{,}25 \cdot 10^{-3} T\,. \tag{3.12}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła masy zamrożonej (223 K ÷ 272 K) zmniejsza się zgodnie z równaniem [4]:

$$\lambda = 3{,}07 - 7{,}8 \cdot 10^{-3} T\,. \tag{3.13}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury jest zaś opisany następującym równaniem (dla 279 K < T < 323 K) [4]:

$$a = (0{,}043T - 1{,}14) \cdot 10^{-8}; \tag{3.14}$$

natomiast dla przedziału temperatury 223 K < T < 272 K:

$$a = (305{,}9 - 1{,}03T) \cdot 10^{-8}\,. \tag{3.15}$$

Gęstość masy jajowej maleje ze wzrostem temperatury. W przedziale temperatury 283 K ÷ 323 K gęstość zmienia się w następujący sposób:

$$\rho = 1049 - 0{,}05T\,. \tag{3.16}$$

3.5. Skorupa

Ciepło właściwe skorupy (m = 0,026) prawie nie zależy od temperatury. W przedziale 277 K ÷ 311 K równa się ono 1005 J/ kg·K [10] lub 1000 J/kg·K [7].

Literatura

[1] **ChoKyun R.,** red.1975: *Theory, Determination, and Control of Physical Properties of Food Materials,* D. Riedel Publ.Comp., 300 –307.

[2] **George R.M.** 1990: *A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products.* Campden Food and Drink Research Association,Technical Bulletin, № 73, 20.

[3] **George R.M.** 1990**:** *A Literature Survey of Heat Capacity of Food Products.* Campden Food and Drink Research Association,Technical Bulletin, №. 76, 9–10.

[4] **Громов М.А.** 1984: *Теплофизические характеристики яйцепродуктов*, Мясная индустрия СССР, № 10, 39–41.

[5] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1990.: *Теплофизические характеристики пищевых продуктов.* Справочник. Издание 3-е, дополненное и переработанное, Москва, В.О. „Агропромиздат" 160 –173.

[6] **Kong J – Y., Miyawaki O., Nakamura K., Yano T.** 1982: *The "Intrinsic" Thermal Conductivity of Some Wet Proteins in Relation to Their Average Hydrophobicity: Analyses on Gels of Egg- albumin, Wheat Gluten and Milk Casein*, Agricultural and Biological Chemistry, 46 (3), 789–794.

[7] **Moshenin N.N.** 1980: *Thermal Properties of Food and Agricultural Materials.* Gordon and Breach Publ., New York, 301–337.

[8] **Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P.** 1980: *A Compilation of Thermal Properties of Foods*, Food Technology – November, 76–94.

[9] **Quashou M.S.,Vachon R.I., Touloukian Y.S.** 1972: *Thermal Conductivity of Foods*, Transactions of the ASHRAE, Vol. 15, № 2, 165–183.

[10] **Riedel L.** 1957: *Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Eiklar und Eigelb*, Kältetechnik, 9 Jahrgang, Heft 11, 342 –345.

[11] **Woodams E.E., Norwey J.E.** 1968: *Literature Values of Thermal Conductivities of Foods*, Food Technology – April, Vol. 22, 494–502.

4. ZIARNA ZBÓŻ I PRODUKTY ICH PRZETWÓRSTWA

4.1. Pszenica

4.1.1. Ciepło właściwe

Ciepło właściwe pszenicy zmienia się w zależności od wilgotności i temperatury [5,25]. W badaniu eksperymentalnym ciepła właściwego uwzględniano także gatunek ziarna. Wyniki badań [5,14,27,36,49] wskazują, że gatunek i odmiana pszenicy praktycznie nie wpływają na ciepło właściwe. Ponadto, ciepło właściwe pojedynczego ziarna i warstwy są jednakowe [5,45]. Ciepło właściwe pszenicy rośnie ze wzrostem wilgotności i temperatury. Zależność $c = c\,(m)$ w różnych pracach jest różnie opisywana, zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym. Według prac [26,36,37] ciepło właściwe pszenicy w przedziale wilgotności 0 – 0,28 wzrasta liniowo. Wzory podane w pracach [5,14] wskazują, że funkcja $c = c\,(m)$ ma wprawdzie charakter liniowy, lecz przy $m = 0{,}12 - 0{,}13$ zmienia się jej współczynnik kątowy. W pracy [6] zależność $c = c\,(m)$ w przedziale wilgotności 0 – 0,336 opisano 4 prostymi o zmiennych współczynnikach kątowych (równania: 4.9 i 4.12 w tablicy 4.1). Wartości ciepła właściwego pszenicy obliczone za pomocą różnych wzorów zestawionych w pracy [14] różnią się o około 35%. Złożony przebieg funkcji $c = c\,(m)$ ziarna pszenicy dla małych wilgotności jest wynikiem zmian stanu wody [5,27,47,48]. Białka i węglowodany wiążą część wody będącej podstawowym składnikiem ziarna. W ziarnie obok wody wolnej znajduje się także woda silnie związana ze strukturą produktu. Jej ilość w ziarnach pszenicy wynosi 0,231 kg/(kg suchej substancji) [48]. Woda związana ma odmienne właściwości niż woda wolna i wyraźnie wpływa [5,47] na właściwości fizyczne ziarna. Krytyczna wilgotność ziarna pszenicy wynosi $m = 0{,}13$ [61] i odpowiada drugiemu punktowi krytycznemu izotermy sorpcji wody. Zależność $c = c\,(m)$ ziarna pszenicy różnych gatunków i typów opisana jest następującymi równaniami [14]:

$$c = 1418 + 1690\,m, \tag{4.1}$$

$$c = 1143 + 4440\,m, \tag{4.2}$$

które są ważne dla temperatury $T = 293$ K i przedziałów wilgotności: $0 < m < 0{,}10$; $0{,}11 < m < 0{,}30$. Wpływ wilgotności na ciepło właściwe poszczególnych gatunków pszenicy ilustrują równania zestawione w tablicy 4.1.

Tablica 4.1.

Wpływ wilgotności na ciepło właściwe pszenicy

Gatunek	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer równania	Literatura
Manitoba 2, czerw. twarda	273,8÷294	0,01÷0,19	$c = 1088 + 4522\,m$	(4.3)	[37]
Biała miękka	284,2÷305	0,007÷0,20	$c = 1388 + 4064\,m$	(4.4)	[26]
Grana		0 ÷0,35	$c = 1321 + 3047\,m$	(4.5)	[61]
Meljanopus 69		0,1÷0,2	$c = 1026 + 4187\,m$	(4.6)	[14]
Caribo		0 ÷0,27	$c = 1276 + 3640\,m$	(4.7)	[36]
Pirotriks 28	293	0÷0,065	$c = 1470 + 2290\,m$	(4.8)	[5,14]
Bersee		0÷0,018	$c = 1285 + 2470\,m$	(4.9)	[6,14]
		0,018÷0,07	$c = 1243 + 2470\,m$	(4.10)	
		0,07÷0,237	$c = 1101 + 4340\,m$	(4.11)	
		0,24÷0,336	$c = 1407 + 3060\,m$	(4.12)	

Mühlbauer i inni [36] opisali zmianę ciepła właściwego pszenicy w przedziale temperatury 288 K ÷ 333 K (wilgotność $m = 0{,}158$) równaniem:

$$c = 7{,}60\,T - 531. \tag{4.13}$$

Z danych [5,14,36] wynika, że ciepło właściwe ziarna pszenicy zależy od temperatury tym wyraźniej, im wyższa jest jego wilgotność. Analiza danych o wpływie wilgotności i temperatury na ciepło właściwe ziarna pszenicy pozwoliła na sformułowanie następujących wzorów:

$$c = 2{,}36\,T - 1870\,m + 11{,}3\,mT + 756, \tag{4.14}$$

$$c = 0{,}70\,T - 3150\,m + 27{,}9\,mT + 884, \tag{4.15}$$

które są ważne dla: 243 K$<T<$333 K oraz odpowiednio: $0<m<0{,}10$ i $0{,}10<m<0{,}3$.

Ciepło właściwe ziarna pszenicy może być obliczane z reguły addytywności. Sucha substancja ziarna składa się najczęściej [14] z kompleksu białkowo-węglowodanowego, błonnika i tłuszczu. Wartości ciepła właściwego tych składników ziarna są równe [14]: c_p = 1422 J/kg·K, c_b = 1340 J/kg·K, c_f = 2014 J/kg·K. Tablica 4.2 zawiera wartości eksperymentalne ciepła właściwego suchej substancji pszenicy.

Tablica 4.2.

Ciepło właściwe suchej substancji pszenicy

Gatunek	Temperatura T [K]	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Literatura
Pirotriks	293	1470	[5]
		1485	[7]
		1465	[16]
	273	1425	[49]
	284	1097	[37]
Caribo	303	1276	[36]
Grana		1320,6	[61]
		1470÷1550	[27]

4.1.2. Współczynnik przewodzenia ciepła

W obliczeniach procesów przewodzenia ciepła pszenicy rozróżnia się [5,14,16] zdolność do przewodzenia ciepła pojedynczego ziarna i jego warstwy. Współczynnik przewodzenia ciepła pojedynczego ziarna pszenicy jest 2 razy, według pracy [16], lub 3÷5 razy, według pracy [5], większy niż warstwy ziarna.

Współczynnik przewodzenia ciepła pszenicy zmienia się pod wpływem wilgotności, temperatury i gęstości nasypowej. Równania opisujące zależność współczynnika przewodzenia ciepła pojedynczego ziarna trzech gatunków pszenicy od wilgotności są następujące [5]:

$$\lambda = 2{,}0 \cdot 10^{-3} T + 0{,}02 mT - 4{,}9m - 0{,}246\,, \tag{4.16}$$

$$\lambda = 2{,}9 \cdot 10^{-3} T - 0{,}01 mT + 2{,}8m - 0{,}40\,, \tag{4.17}$$

przy czym obowiązują one dla: 273 K<T<328 K oraz 0,04<m<0,14 i 0,14< m <0,38.

Zależność $\lambda = \lambda(m,T)$ pojedynczego ziarna pszenicy dla przedziału temperatury 238 K ÷ 273 K opisana jest wzorami:

$$\lambda = 1{,}1 \cdot 10^{-3} T + 0{,}02 mT - 5{,}48m - 0{,}06 \quad (0{,}04 < m < 0{,}14), \tag{4.18}$$

$$\lambda = 1{,}7 \cdot 10^{-3} T + 8 \cdot 10^{-4} m - 0{,}073 \quad (0{,}14 < m < 0{,}24). \tag{4.19}$$

Wyniki badań wskazują, że współczynnik przewodzenia ciepła nie zależy od gatunku bądź odmiany pszenicy [11,14].

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy ziarna pszenicy wzrasta ze wzrostem wilgotności. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła warstwy ziarna w przedziale wilgotności m = 0 ÷ 0,35 opisano w [8,61] jednym równaniem liniowym. Jednakże wartości współczynnika przewodzenia ciepła obliczone z różnych [7,8,14] równań i podane w postaci tabelarycznej [11,14] różnią się o około 100% (tablica 4.3).

Tablica 4.3.

Współczynnik przewodzenia ciepła pszenicy w 293 K

Wilgotność m					Literatura
0,05	**0,10**	**0,15**	**0,20**	**0,25**	
0,172	0,189	0,205	0,183	0,178	[51]
0,082	0,093	0,105	0,117	0,128	[7]

Ginzburg i Gromow [14] podają kilka przyczyn tej różnicy. Przyczyną pierwszą są różnice w gęstości nasypowej (a więc porowatości) warstwy ziarna i prędkości tych zmian przy nawilgoceniu. Ze wzrostem gęstości nasypowej rośnie [4] przewodność cieplna warstwy ziarna. Duże prędkości nawilgocenia ziarna pszenicy powodują zmniejszenie gęstości nasypowej i w konsekwencji zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła ziarna.

Druga przyczyna tkwi w metodach badania współczynnika przewodzenia ciepła. Na wartość współczynnika przewodzenia ciepła warstwy ziarna pszenicy , jak każdego materiału wilgotnego, ma wpływ kierunek strumienia ciepła. Wpływ jest tym większy, im ziarno jest bardziej wilgotne [14]. Natomiast metoda obliczeniowa określania przewodności cieplnej ziarna wymaga znajomości dokładnych wartości: a, c, ρ_n. Błąd ich oszacowania ma wyraźny wpływ na wartość współczynnika przewodzenia ciepła. Warunki przygotowania ziarna do badań mają także wpływ na jego przewodność. Zmiana temperatury próbki ziarna w trakcie określa-

nia przewodności cieplnej może następować np. w naczyniu pomiarowym lub poza nim. Różnice w sposobie zmiany temperatury wpływają na intensywność migracji wilgoci w ziarnie i w rezultacie na jej przewodność cieplną.

Trzecią przyczyną są różne dokładności metod określania współczynnika przewodzenia ciepła. Procesowi nagrzewania bądź ochładzania ziarna podczas pomiarów przewodności cieplnej zawsze towarzyszy dodatkowa wymiana ciepła z migrującą wilgocią i konwekcja powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych. Ilość ciepła przenoszona w tych procesach zależy od warunków realizacji pomiarów, a szczególnie od warunków granicznych.

Kolejną przyczyną jest niemożność identycznego ułożenia ziaren w próbkach w czasie kolejnych pomiarów. W ten sposób jest także niemożliwe otrzymanie w czasie pomiarów stałego rozmieszczenia, wymiarów i liczby przestrzeni powietrznych wewnątrz warstwy oraz wielkości sumarycznej powierzchni styku poszczególnych ziaren, wpływających na przewodność cieplną warstwy ziarna. Ponadto należy zaznaczyć, że w czasie pomiarów wyżej opisane źródła różnic ujawniają się jednocześnie. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła otrzymywane w kolejnych pomiarach, nawet tą samą metodą, mogą więc wykazywać różnice, przy czym tym większe, im wyższa jest wilgotność i temperatura.

Większość [5,11,33,51] wyników badania zależności współczynnika przewodzenia ciepła warstwy pszenicy od wilgotności wskazuje na zmienne tempo przyrostu wartości tego współczynnika. Przewodność cieplna ziarna pszenicy szybko wzrasta ze wzrostem wilgotności do około $m = 0{,}18 \div 0{,}20$ [11] lub $m = 0{,}15 \div 0{,}16$ [14]. Następnie dla $m > 0{,}20$ wzrost przewodności jest mniejszy. Takie zmiany w wartościach λ wynikają ze zmian form wiązania wody w ziarnie i są zgodne ze zmianami w przebiegu funkcji $c = c(m)$ (patrz punkt 4.1.1).

Współczynnik przewodzenia ciepła ziarna pszenicy w temperaturze 293 K w zależności od wilgotności i przy założeniu, że gęstość nasypowa zmniejsza się podczas nawilżania, opisano w [14] następującymi równaniami:

$$\lambda = 0{,}05m + 0{,}116, \tag{4.20}$$

dla: $0 < m < 0{,}10$; $857\ \text{kg/m}^3 < \rho_n < 861\ \text{kg/m}^3$;

$$\lambda = 0{,}125m + 0{,}108, \tag{4.21}$$

dla: $0{,}10 < m < 0{,}30$; $857\ \text{kg/m}^3 < \rho_n < 861\ \text{kg/ m}^3$.

W temperaturze niższej od 273 K współczynnik przewodzenia ciepła ziarna pszenicy wzrasta ze wzrostem wilgotności i obniżeniem temperatury. Przewodność cieplna pszenicy twardej w przedziale temperatury 246 K ÷ 253 K i wilgotności 0,044 ÷ 0,225 zmienia się następująco:

$$\lambda = 0{,}12m + 0{,}139 \tag{4.22}$$

Równania do obliczania przewodności cieplnej wybranych gatunków pszenicy w zależności od wilgotności zawiera tablica 4.4.

Tablica 4.4.

Przewodność cieplna pszenicy w $T \cong 293$ K

Pszenica	Przedział temperatury	Przedział wilgotności	Przewodność cieplna [W/m·K]	Numer równania	Literatura
Miękka biała	304	0,007÷0,200	$\lambda = 0{,}113m + 0{,}117$	(4.23)	[26]
Manitoba	319	0,014÷0,137	$\lambda = 0{,}27m + 0{,}129$	(4.24)	[14]
Mironowskaja	293÷333	0,10÷0,26	$\lambda = 0{,}44m + 0{,}063$	(4.25)	

Wyniki badania przewodności cieplnej pszenicy, zależnej od wilgotności i temperatury, wskazują na duże różnice w przebiegu funkcji $\lambda = \lambda(m)$ dla temperatury $T > 273$ K. Współczynnik przewodzenia ciepła ziarna pszenicy wzrasta ze wzrostem temperatury i wilgotności [14], przy czym, dla $T = 278$ K ÷ 323 K i $m = 0{,}05 \div 0{,}22$:

$$\lambda = 0{,}17m + 0{,}000169T + 0{,}087 \tag{4.27}$$

Zależność przewodności cieplnej ziarna pszenicy od trzech parametrów, tzn.: temperatury T, wilgotności m i porowatości ε ilustruje wzór [32]:

$$\lambda = 0{,}1413 \cdot \frac{m}{1-m} - 3{,}97 \cdot 10^{-4} T - 0{,}0716\,\varepsilon + 0{,}254 \tag{4.28}$$

który jest ważny dla: $T = 318$ K ÷ 348 K , $0 < m < 0{,}265$, $0{,}46 < \varepsilon < 0{,}52$.

4.1.3. Współczynnik wyrównywania temperatury

Współczynnik wyrównywania temperatury pszenicy jest funkcją wilgotności, temperatury i gęstości nasypowej. Nie zależy on od odmiany pszenicy [14]. Jednakże doniesienia o zależności współczynnika wyrównywania temperatury od wymienionych parametrów są sprzeczne. Według jednej grupy wyników badań [15,29,58,62] wartość współczynnika wyrównywania temperatury maleje ze wzrostem wilgotności. Grupa druga wyników [7,14,49] wskazuje na odwrotną zależność. Analiza danych o współczynniku wyrównywania temperatury różnych gatunków ziarna i kasz pokazuje, że ta właściwość ziarna pszenicy maleje ze wzrostem wilgotności. Ziarno przy nawilżaniu do m = 0,20 ÷ 0,25 pęcznieje. W miejscach kontaktu poszczególnych ziaren zanika warstewka wody i pogarszają się warunki wymiany ciepła. Ponadto nawilżanie ziaren powoduje zwiększenie chropowatości ich powierzchni. Jest to druga okoliczność nie sprzyjająca wymianie ciepła. Uogólniony wzór na współczynnik wyrównywania temperatury ziarna pszenicy dla $T \approx$ 293 K i przedziału wilgotności $0{,}10 < m < 0{,}25$ ma postać [14]:

$$a = (10{,}3 - 7{,}5m) \cdot 10^{-8} \tag{4.29}$$

Podobne sprzeczności są widoczne przy analizie funkcji $a = a\ (m, T)$. Z prac [26,60] wynika, że współczynnik wyrównywania temperatury pszenicy w przedziale wilgotności 0,07 ÷ 0,203 [26], bądź 0,0 ÷ 0,18 [60] maleje przy T = idem. Wartość współczynnika a osiąga minimum dla m = 0,18 ÷ 0,23 [60]. Natomiast według [11] dla T = 293K = idem współczynnik wyrównywania temperatury w przedziale wilgotności $0{,}05 < m < 0{,}17$ rośnie, następnie maleje:

$$a = 6{,}76 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-1{,}4m},\ 0{,}05 < m < 0{,}17, \tag{4.30}$$

$$a = 1{,}07 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-1{,}2m},\ 0{,}17 < m < 0{,}35 \tag{4.31}$$

Różnice jakościowe w przebiegu funkcji $a = a\ (m, T)$ ziarna pszenicy są wynikiem wystąpienia wyżej opisanych okoliczności oraz różnych gęstości nasypowych [14]. W temperaturze niższej od 273 K współczynnik wyrównywania temperatury ziarna pszenicy o wilgotności $m > 0{,}17$ zmniejsza się ze wzrostem m i obniżeniem T. Natomiast dla ziarna o $m < 0{,}17$ współczynnik wyrównywania temperatury wzrasta z obniżającą się (do 233K) temperaturą [23]. Według [14] współczynnik wyrównywania temperatury pszenicy Aurora o wilgotności m = 0,038, w przedziale temperatury 233 K ÷ 333 K zmienia się następująco:

$$a = (21{,}86 - 4{,}125 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8} \tag{4.32}$$

4.1.4. Gęstość

Gęstość pojedynczego ziarna pszenicy maleje ze wzrostem jego wilgotności. Gęstość rzeczywista suchej substancji pszenicy równa się 1480 kg/m^3 [14] lub 1449 ÷ 1585 kg/m^3 [29]. Gęstość ziarna rośnie w miarę przechodzenia do wyższej formy dojrzałości. W fazie mlecznej gęstość równa się 1150 kg/m^{-3}, w fazie woskowej – 1240 kg/m^{-3}, w fazie pełnej dojrzałości – 1300 kg/m^{-3} [13]. Składniki tworzące ziarno mają także różne gęstości (tablica 4.5).

Tablica 4.5.

Gęstość składników ziarna pszenicy

Pszenica	Ziarno	Endosperm	Zarodek	Okrywa
Ozima	1374	1472	1275	1106
Jara miękka	1366	1471	1290	1066
Jara twarda	1383	1482	1285	1115

Z tablicy 4.5 widać, że największą gęstość ma endosperm, ponieważ składa się on w zasadniczej części ze skrobi. Okrywa, zawierająca stosunkowo dużo tłuszczu, odznacza się najmniejszą gęstością.

Gęstość ziarna pszenicy wyraźnie maleje wraz ze zwiększeniem w nim zawartości powietrza. Powietrze w ziarnie znajduje się w porach oraz kanałach kapilarnych i wypełnia od 1,8 do 10,9% (lub 6 – 13%) [14] jego objętości. Zwiększenie wilgotności ziarna od 0 do około 0,12 [6,33] (0,14 [14]) powoduje wyciśnięcie z niego powietrza bez zwiększenia objętości i w konsekwencji zwiększenie gęstości. Dalsze zwiększenie wilgotności ziarna od około 0,14 do 0,28 powoduje obniżenie gęstości, gdyż gęstość wody jest mniejsza od gęstości suchej substancji. Oprócz tego w procesie nawilgocenia zwiększa się objętość ziarna (ziarno pęcznieje). Nawilgocenie ziarna do $m > 0{,}28$ [14] powoduje równomierny wzrost zarówno masy jak i objętości. Wzór na gęstość ziarna pszenicy różnych gatunków i odmian, w zależności od wilgotności ($0{,}11 < m < 0{,}20$), ma następującą postać [14]:

$$\rho = 1464 - 770\,m \tag{4.33}$$

Ziarno o większej grubości, a więc bardziej dorodne, niezależnie od wilgotności ma zawsze [31] większą gęstość niż ziarno drobne.

Gęstość nasypowa warstwy ziarna pszenicy jest różna w różnych latach [14]. Zależy ona także od gatunku i typu. Według [14] gęstość nasypowa pszenicy miękkiej jest większa niż twardej. Autorzy monografii [14], na podstawie analizy danych empirycznych, polecają następujące wzory do określania gęstości nasypowej warstwy ziarna pszenicy:

$$\rho_n = 904 - 1020\,m\,,\ 0{,}10 < m < 0{,}20, \tag{4.34}$$

$$\rho_n = 772 - 387m\ ,\ 0{,}20 < m < 0{,}35. \tag{4.35}$$

Przy zwiększeniu wilgotności w warunkach, gdy gęstość nasypowa ziarna pszenicy ulega zmniejszeniu, następuje zwiększenie porowatości jego warstwy i zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła.

4.2. Żyto

Ustalona eksperymentalnie wartość ciepła właściwego suchej substancji żyta wynosi 1507 J/kg·K [24], natomiast obliczona z prawa Koppa-Neumanna – 1436 J/kg·K [14]. Zmianę ciepła właściwego żyta odmiany Tero [36] o wilgotności $0 \div 0{,}27$ w przedziale temperatury 283 K ÷ 323 K przedstawia równanie:

$$c = 3760\,m + 1272, \tag{4.36}$$

a dla odmiany Puławskie [60] o wilgotności $0 \div 0{,}266$

$$c = 3737\,m + 1017\,. \tag{4.37}$$

Ciepło właściwe żyta rośnie ze wzrostem temperatury. Ciepło właściwe ziarna o wilgotności $m = 0{,}203$ w przedziale temperatury 303 K ÷ 343 K opisane jest wzorem:

$$c = 6{,}45\,T + 23 \tag{4.38}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła żyta zmienia się przede wszystkim pod wpływem wilgotności i temperatury. W przedziale wilgotności $0{,}05 < m < 0{,}22$ i temperatury 278 K ÷ 323 K współczynnik przewodzenia ciepła żyta zmienia się w następujący sposób [14]:

$$\lambda = 0{,}084 + 0{,}095m + 1{,}72 \cdot 10^{-4} T \tag{4.39}$$

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności ma postać ($0 < m < 0{,}23$; $T = 303$ K):

$$\lambda = 0{,}28m + 0{,}16 \tag{4.40}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury żyta jest równy:

$$a = (6{,}97 + 4m + 0{,}0056T) \cdot 10^{-8} \tag{4.41}$$

Równanie jest ważne dla przedziału wilgotności $0{,}05 < m < 0{,}22$ i zakresu temperatury 278 K ÷ 323 K [14].

Gęstość pojedynczego ziarna żyta rośnie w miarę przechodzenia do wyższej fazy dojrzałości. Jeżeli w fazie mlecznej gęstość ziarna równa się 1123 kg/m^3, to w fazie woskowej – 1195 kg/m^3,a w fazie pełnej dojrzałości – 1280 kg/m^3 [14]. Ze wzrostem wilgotności zwiększa się także gęstość ziarna ($0 < m < 0{,}50$) [14]:

$$\rho = 1483 + 643m \tag{4.42}$$

Zależność gęstości nasypowej warstwy żyta od wilgotności ($0{,}17 < m < 0{,}50$) opisana jest wzorem [14]:

$$\rho_n = 975 - 2050m + 2850m^2 \tag{4.43}$$

Z równania wynika, że zwiększenie wilgotności ziarna do 0,35 obniża jego gęstość nasypową. Porowatość warstwy ziarna żyta wzrasta do wilgotności $m = 0{,}25$ a następnie maleje.

4.3. Pszenżyto

W literaturze istnieją nieliczne [61] doniesienia na temat właściwości termofizycznych tego zboża. Ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik wyrównywania temperatury pszenżyta odmian zimowych Grado i Lasko w zależności od wilgotności zmieniają się następująco:

- odmiana Grado ($m = 0 \div 0{,}26$):

$$c = 997 + 5724\, m\,, \tag{4.44}$$

$$\lambda = 0{,}091 + 0{,}002m\,, \tag{4.45}$$

$$a = (0{,}1355 - 0{,}2271m + 0{,}3911m^2)\cdot 10^{-6}\,; \tag{4.46}$$

- odmiana Lasko ($m = 0 \div 0{,}237$):

$$c = 1273 + 3463\, m\,, \tag{4.47}$$

$$\lambda = 0{,}109 + 0{,}002m\,, \tag{4.48}$$

$$a = (0{,}1383 - 0{,}4613m + 0{,}1311m^2)\cdot 10^{-6}\,. \tag{4.49}$$

4.4. Owies

Eksperymentalnie określone ciepło właściwe suchej substancji owsa wynosi: 1277 J/kg·K [14], 1287 J/kg·K [36], 1510 J/kg·K [24,27], natomiast obliczone z równania Koppa i Neumanna – 1435 J/kg·K [14].

Ciepło właściwe owsa wzrasta ze wzrostem temperatury i wilgotności. Zależność $c = c\,(T)$ owsa o wilgotności $m = 0{,}203$ i w przedziale 303 K < T < 348 K ma następującą postać [14]:

$$c = 6{,}45\, T + 23 \tag{4.50}$$

Zmianę ciepła właściwego owsa pod wpływem wilgotności opisuje wzór:

$$c = 3550\, m + 1282\,, \tag{4.51}$$

który obowiązuje dla $0 < m < 0{,}29$ oraz $T = 283\text{K} \div 313$ K.

Współczynnik przewodzenia ciepła owsa zmienia się pod wpływem zmian wilgotności i temperatury [14]:

$$\lambda = 0{,}0989 + 0{,}40\, m\,. \tag{4.52}$$

Podobną zależność uzyskano [56] dla ziarna o wilgotności $0 < m < 0,\ 26$:

$$\lambda = 0{,}084 + 0{,}349\, m\,. \tag{4.53}$$

Wzór uwzględniający wpływ obu parametrów na przewodność cieplną ziarna owsa ($0{,}05 < m < 0{,}22$; 278 K < T < 323 K) [14]:

$$\lambda = 0{,}054 + 0{,}221m + 1{,}82\cdot 10^{-4}T \tag{4.54}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury ziarna owsa w zależności od wilgotności ($0 < m < 0{,}222$) i temperatury (278 K < T < 323 K) opisany jest wzorem [14]:

$$a = (8{,}06 + 4{,}3m + 0{,}0055T)\cdot 10^{-8} \tag{4.55}$$

Gęstość pojedynczego ziarna owsa zwiększa się wraz z fazą dojrzałości. Gęstość ziarna w fazie mlecznej równa się 907 kg/m^3 [14], w fazie woskowej – 1005 kg/m^3 i ziarna dojrzałego 1087 kg/m^3. Gęstość zależy także od gatunku. Zależność gęstości pojedynczego ziarna owsa od wilgotności ($0 < m < 0{,}5$) ma postać [14]:

$$\rho = 1513 - 691m \tag{4.56}$$

Gęstość nasypowa warstwy owsa zależy od kilku parametrów, między innymi od sposobu upakowania i wilgotności. Według pracy [14] związek między gęstością nasypową i wilgotnością jest następujący ($0{,}15 < m < 0{,}50$):

$$\rho_n = 773 - 2310m + 3630m^2 \tag{4.57}$$

Ze wzoru wynika, że zwiększenie wilgotności ziarna owsa do $m = 0,3$ powoduje zmniejszenie jego gęstości nasypowej a przy dalszym wzroście wilgotności następuje przyrost ρ_n.

4.5. Jęczmień

Ciepło właściwe jęczmienia zmienia się przede wszystkim pod wpływem wilgotności. Ciepło właściwe jęczmienia Carina w przedziale wilgotności $0 < m < 0,25$ i temperatury $283\ \text{K} < T < 323\ \text{K}$ zmienia się według wzoru [36]:

$$c = 3970\,m + 1245 \tag{4.58}$$

W monografii Ginzburga i Gromowa [14] zależność ciepła właściwego jęczmienia od wilgotności $(0,1 < m < 0,35)$ przy $T = 313\ \text{K}$ zapisano równaniem:

$$c = 3350\,m + 1360 \tag{4.59}$$

Ciepło właściwe jęczmienia Maltina Barley o wilgotności $m = 0,094 \div 0,150$ i w temperaturze 273 K wynosi [6,36] 1500÷1830 J/kg·K.

Ze wzoru (4.58) wynika, że ciepło właściwe suchej substancji jęczmienia równa się 1245 J/kg·K Natomiast wartość jej ciepła właściwego obliczona z prawa Koppa i Neumanna wynosi 1429 J/kg·K. Według [36,47,48] ilość wody związanej w ziarnie jęczmienia wynosi 0,285 kg/kg suchej substancji.

Przewodność cieplna ziarna jęczmienia wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury [8,14]:

$$\lambda = 0,115 + 0,28m\,, \tag{4.60}$$

$$\lambda = 0,77 + 0,128m + 1,76 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{4.61}$$

Wzór (4.61) został zweryfikowany dla $0 < m < 0,23$.

Współczynnik przewodzenia ciepła jęczmienia o wilgotności $m = 0 \div 0,23$ i w przedziale temperatury 245 K ÷ 302 K opisano w [1] równaniem:

$$\lambda = -0,032 + 7,51 \cdot 10^{-4} T + 0,151m \tag{4.62}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury jęczmienia zmienia się zgodnie ze wzorem [14]:

$$a = (6,80 + 6,50m + 0,0057T) \cdot 10^{-8} \tag{4.63}$$

Gęstość ziarna jęczmienia, podobnie jak innych zbóż, wzrasta przy przejściu do wyższej fazy dojrzałości. Gęstość (wartość średnia) ziarna, na podstawie [14], w fazie mlecznej równa się 1050 kg/m^3, w fazie woskowej – 1140 kg/m^3, ziarna dojrzałego – 1230 kg/m^3.

Wpływ wilgotności na gęstość pojedynczego ziarna jest niejednoznaczny. Gęstość pewnych gatunków jęczmienia maleje ze wzrostem wilgotności $(0 < m < 0,50)$ [14]:

$$\rho = 1352 - 3160m \tag{4.64}$$

Natomiast gęstość ziarna innych gatunków jęczmienia rośnie w początkowej fazie procesu nawilżania (do około $m = 0,10$), następnie maleje [14].

Zależność gęstości nasypowej ziarna jęczmienia od wilgotności ma także skomplikowany charakter. W dużym przedziale wilgotności $(0,15 < m < 0,50)$ zmianę charakteryzuje wzór:

$$\rho_n = 705 - 1142\,m + 1950\,m^2 \tag{4.65}$$

Równanie pokazuje, że przy zwiększeniu wilgotności od 0,15 do 0,30 gęstość nasypowa zmniejsza się, następnie wzrasta. Gęstość nasypowa zależy także od sposobu upakowania. Ze zwiększeniem wilgotności do 0,30 gęstość pojedynczego ziarna i gęstość nasypowa maleją, dlatego porowatość warstwy pozostaje prawie stała i wynosi $\varepsilon = 0,43$ [14].

4.5.1. Właściwości termofizyczne słodu jęczmiennego

Ciepło właściwe słodu o wilgotności $0,094 < m < 0,165$ w temperaturze $T = 273\ \text{K}$ zmienia się zgodnie ze wzorem [6]:

$$c = 3760\,m + 1150 \tag{4.66}$$

Ciepło właściwe suchej substancji słodu wynosi 1214 J/kg·K [14], czyli jest prawie równe ciepłu właściwemu ziarna.

Przewodność cieplna słodu wzrasta ze wzrostem temperatury [14]:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-4} T - 0{,}0735 \tag{4.67}$$

Równanie opisuje przewodność cieplną słodu o wilgotności $m = 0{,}19$ w przedziale temperatury $303\ \mathrm{K} < T < 333\ \mathrm{K}$. Przewodność cieplna słodu jest mniejsza niż ziarna, gdyż słód odznacza się mniejszą gęstością nasypową.

Gęstość pojedynczego ziarna słodu rośnie ze wzrostem wilgotności, ponieważ słód odznacza się dużą porowatością [14]. Gęstość nasypowa słodu suchego wynosi 443 kg/m^3, a słodu surowego – 513 kg/m^3.

4.6. Kukurydza

Wartości eksperymentalne ciepła właściwego suchej substancji kukurydzy zawierają się w przedziale od 903 J/kg·K dla ziarna odmiany Irna 258 [23] do 1679 J/kg·K [43]. Tak duże różnice tłumaczy się składem chemicznym suchej substancji ziarna kukurydzy, a przede wszystkim różną zawartością tłuszczu – 0,0636 ÷ 0,114 [14]. Ciepło właściwe suchej substancji ziarna kukurydzy obliczone z prawa Koppa-Neumanna równa się 1446 J/kg·K [14].

Ciepło właściwe ziarna kukurydzy zmienia się pod wpływem zmian wilgotności i temperatury. Analiza wartości eksperymentalnych ciepła właściwego ziarna kukurydzy różnych gatunków14] pozwoliła na sformułowanie następującego wzoru:

$$c = 3000\, m + 1350\,, \tag{4.68}$$

uogólniającego zależność ciepła właściwego dla temperatury $T = 293$ K i $0 < m < 0{,}40$.

Ciepło właściwe ziarna kukurydzy rośnie ze wzrostem temperatury. Związek dla wyżej wymienionej odmiany Irna 258 ma postać ($m = 0{,}10$):

$$c = 9{,}32\, T - 1440 \tag{4.69}$$

Ciepło właściwe poszczególnych odmian kukurydzy zawiera tablica 4.6.

Tablica 4.6.

Ciepło właściwe ziarna kukurydzy

Odmiana	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer równania	Literatura
Brillant	0÷ 0,50	273÷333	$c = 3280\, m + 1247$	(4.70)	[38]
Inakorn			$c = 2720\, m + 1369$	(4.71)	
Velox			$c = 3440\, m + 1249$	(4.72)	
Yellow Dent	0÷0,30	277	$c = 3560\, m + 1463$	(4.73)	[29]
	0,05÷0,28		$c = 3400\, m + 1470$	(4.74)	[20]

Przewodność cieplna ziarna kukurydzy wzrasta pod wpływem wilgotności i temperatury. Wpływ na zmianę przewodności cieplnej pojedynczego ziarna ma także jego budowa anatomiczna, a w przypadku warstwy ziarna – jej porowatość. Współczynnik przewodzenia ciepła jądra i łuski ziarna kukurydzy Irna 258 w temperaturze $T = 293$ K i dla wilgotności $0 < m < 0{,}50$ opisują odpowiednio wzory:

$$\lambda = 0{,}0899 + 0{,}564m\,, \tag{4.75}$$

$$\lambda = 0{,}0796 + 0{,}623m\,. \tag{4.76}$$

Ze wzorów wynika, że do wilgotności około 0,175 przewodność cieplna jądra jest wyższa od przewodności cieplnej łuski. Przy dalszym nawilgoceniu łuska wchłania wilgoć szybciej niż jądro, w związku z czym przewodność łuski jest wyższa od przewodności cieplnej jądra. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła pojedynczego ziarna kukurydzy od dwóch parametrów dla $0{,}08 < m < 0{,}450$ i $278\ \mathrm{K} < T < 333\ \mathrm{K}$ wyrażona jest wzorem:

$$\lambda = 0{,}5843m + 4{,}43 \cdot 10^{-4} T - 0{,}041\,. \tag{4.77}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy ziarna kukurydzy rośnie ze zwiększeniem wilgotności i temperatury [7,8,14,19,26,30,43]. Współczynnik przewodzenia ciepła kukurydzy Yellow Dent zmienia się w następujący sposób ($0{,}009 < m < 0{,}302$; $294\ \mathrm{K} < T < 326\ \mathrm{K}$) [26]:

$$\lambda = 1{,}12 \cdot 10^{-3} m + 0{,}1409\,. \tag{4.78}$$

Jednoczesny wpływ wilgotności i temperatury na przewodność cieplną warstwy ziarna kukurydzy ilustruje ($0,05 < m < 0,45$; $278\ \mathrm{K} < T < 323\ \mathrm{K}$) wzór [14]:

$$\lambda = 0,18m + 1,78 \cdot 10^{-4} T + 0,059 . \tag{4.79}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury ziarna kukurydzy zależy od wilgotności, temperatury i porowatości. Ze wzrostem wilgotności (w zakresie od 0 do 0,30) ziarna kukurydzy maleje jego dyfuzyjność cieplna. Wzór ujmujący wpływ wilgotności ($0,05 < m < 0,45$) i temperatury ($278\ \mathrm{K} < T < 323\ \mathrm{K}$) na dyfuzyjność cieplną ziarna kukurydzy ma postać [14]:

$$a = (6,96 + 11,7m - 29,0m^2 + 0,006T) \cdot 10^{-8} \tag{4.80}$$

Wzrost porowatości warstwy od 0,42 do 0,50 ziarna kukurydzy o wilgotności $m = 0,11$ i w temperaturze 313 K prawie nie wpłynął na jej dyfuzyjność cieplną [14].Wzór (4.79) wskazuje także na mały wpływ temperatury na dyfuzyjność cieplną kukurydzy. Również budowa anatomiczna ma nieznaczny wpływ na współczynnik wyrównywania temperatury kukurydzy, jeśli tylko m = idem. Dyfuzyjność cieplna kolby kukurydzy równa się $1,24 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m^2/s}$ [45].

Gęstość suchej substancji masy ziarna kukurydzy równa się 1212 kg/ $\mathrm{m^3}$ [43]. Gęstość pojedynczego ziarna kukurydzy zależy od gatunku [14], ponieważ każdy z nich ma różną porowatość. Gęstość poszczególnych części składowych ziarna kukurydzy jest różna: największą ma jądro, najmniejszą łuska [14].

Gęstość nasypowa warstwy ziarna zależy od wielu czynników, między innymi od gatunku, temperatury i porowatości. Gęstość nasypowa ziarna o wilgotności $m = 0,1 \div 0,2$ zmienia się w przedziale $600 \div 850\ \mathrm{kg/m^3}$, a porowatość $\varepsilon = 0,35 \div 0,42$ [43]. Do określenia gęstości nasypowej ziarna kukurydzy o wilgotności $0,15 < m < 0,45$ zaproponowano w [14] równanie:

$$\rho = 1086 - 2971m + 4810m^2 . \tag{4.81}$$

4.7. Proso

Ciepło właściwe suchej substancji ziarna prosa równa się 1418 J/kg·K [24] lub 1424 J/kg·K [14]. Wartość ciepła właściwego obliczona z prawa Koppa-Neumanna wynosi natomiast 1427 J/kg·K [14]. Ciepło właściwe pojedynczego ziarna prosa w przedziale temperatury $293\ \mathrm{K} < T < 333\ \mathrm{K}$ i wilgotności $0,107 < m < 0,231$ może być obliczone ze wzoru [14]:

$$c = 4270\, m + 3,80\, T + 84 . \tag{4.82}$$

Ciepło właściwe warstwy ziarna prosa w przedziale temperatury $T = 293\ \mathrm{K} \div 373\ \mathrm{K}$ i wilgotności $0,07 < m < 0,25$ zmienia się zgodnie z zależnością:

$$c = 2680\, m + 1591. \tag{4.83}$$

Przewodność cieplna jądra ziarna prosa rośnie ze wzrostem temperatury i wilgotności, np. dla temperatury $T = 293\ \mathrm{K}$ i wilgotności $0,107 < m < 0,231$:

$$\lambda = 0,138 + 1,0m . \tag{4.84}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy ziarna prosa o gęstości nasypowej $\rho_n = 820 \div 850\ \mathrm{kg/m^3}$ i wilgotności $0,12 < m < 0,48$ wyrażony jest wzorem [28]:

$$\lambda = 0,20m + 0,05 . \tag{4.85}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury ziarna prosa o wilgotności $m = 0,118$ równa się $1,00 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m^2/s}$.

Gęstość pojedynczego ziarna prosa równa się 1322 kg/$\mathrm{m^3}$ [14], natomiast gęstość nasypowa warstwy ziarna (o wilgotności średniej $m = 0,10 \div 0,20$) waha się od 680 kg/$\mathrm{m^3}$ do 850 kg/$\mathrm{m^3}$.

4.8. Gryka

Ciepło właściwe suchej substancji ziarna gryki równa się 1278 J/kg·K, a obliczone z prawa Koppa-Neumanna – 1430 J/kg·K [14]. Ciepło właściwe ziarna o wilgotności $0 < m < 0{,}14$ można określać ze wzoru:

$$c = 2360\,m + 1278 \tag{4.86}$$

W temperaturze $T = 293$ K współczynnik przewodzenia ciepła ziarna gryki o $m = 0{,}12$ wynosi 0,090÷0,098 W/m·K, natomiast współczynnik wyrównywania temperatury $a = (0{,}9 \div 1{,}01)\cdot 10^{-7}$ m^2/s.

Gęstość ziarna gryki (m = 0,14) wynosi 1293 kg/m^3, gęstość nasypowa 490÷ 614 kg/m^3.

4.9. Ryż

Wartość eksperymentalna ciepła właściwego suchej substancji ryżu wynosi 1314 J/kg·K, natomiast obliczona z reguły Koppa-Neumanna –1402 J/kg·K [14]. Ciepło właściwe ziarna wilgotnego zależy przede wszystkim, od wilgotności i temperatury. Zależność ciepła właściwego ryżu od wilgotności ma charakter liniowy [14,30] (tablica 4.7). Z tabeli wynika, że wilgotność około 0,10 jest wartością graniczną, przy której zmienia się współczynnik kierunkowy zależności $c = c\,(m)$. Taką zmianę można wyjaśnić różnymi sposobami wiązania wody w ziarnie ryżu. Uogólniony wzór na ciepło właściwe ryżu dla wilgotności $0{,}084 < m < 0{,}214$ i $T = 293$ K ma postać:

$$c = 4115\,m + 1166\,. \tag{4.87}$$

Zależność ciepła właściwego ziarna ryżu od dwóch parametrów, tzn. od wilgotności i temperatury, ma postać [14]:

$$c = 1840\,m + 11{,}70\,T - 2114\,. \tag{4.88}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła ziarna ryżu o wilgotności $0{,}12 < m < 0{,}25$, gęstości nasypowej 520 ÷ 660 kg/ m^3 i w temperaturze $T \approx 293$ K opisany jest równaniem:

$$\lambda = 0{,}10m + 0{,}085\,, \tag{4.89}$$

przy czym wzór nie obejmuje ryżu krótkoziarnistego.

Tablica 4.7.

Zależność ciepła właściwego ryżu od wilgotności

Odmiana ryżu	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
Ziarno łuszczone	0,098÷0,176	$c = 3810\,m + 1202$	(4.90)	[14]
Ziarno nie łuszczone	0,11÷0,25	$c = 3488\,m + 1269$	(4.91)	
Ziarno	0,10 ÷0,20	$c = 3335\,m + 1167$	(4. 92)	[17]
Saturn	0,12 ÷0,20	$c = 5447\,m + 921$	(4.93)	[36]
Long rice	0,102÷ 0,17	$c = 2251\,m + 1120$	(4.94)	
Nihonbare łuszczony	< 0,092	$c = 4880\,m + 1000$	(4.95)	[59]
	0,092÷0,14	$c = 3355\,m + 1134$	(4.96)	
Koshihikari łuszczony	< 0,092	$c = 4544\,m + 975$	(4.97)	
	0,092÷0,15	$c = 3347\,m + 1092$	(4.98)	

Współczynnik przewodzenia ciepła tej odmiany, w zależności od wilgotności, ma postać [14]:

$$\lambda = 0{,}10m + 0{,}10\,. \tag{4.99}$$

Wzór ma zastosowanie dla temperatury 293 K, wilgotności $0{,}112 < m < 0{,}237$ i gęstości nasypowej $\rho_n = 632 \div 664$ kg/m^3.

Współczynnik wyrównywania temperatury ziarna ryżu maleje ze wzrostem wilgotności $(0{,}12 < m < 0{,}20)$ i temperatury [14]:

$$a = (1{,}35 - 2{,}50m)\cdot 10^{-7}\,. \tag{4.100}$$

Gęstość pojedynczego ziarna ryżu wzrasta ze wzrostem wilgotności (do około $m = 0{,}20$):

$$\rho = 930m + 1034 . \tag{4.101}$$

Wzrost wilgotności jest wynikiem procesu usuwania powietrza znajdującego się między okrywą i jądrem podczas nawilżania ziarna. Po usunięciu powietrza, dalsze nawilżanie prowadzi do obniżania [14] gęstości.

Gęstość nasypowa warstwy ziarna ryżu zwiększa się ze wzrostem wilgotności. Dla jej przedziału $0{,}09 < m < 0{,}12$ zmianę gęstości opisuje równanie:

$$\rho_n = 120m + 519 \tag{4.102}$$

Gęstość ziarna łuszczonego, w odróżnieniu od surowego maleje ze wzrostem wilgotności [18] ($0{,}057 < m < 0{,}25$):

$$\rho_n = -3{,}3m + 1498 \tag{4.103}$$

4.10. Soja

Ciepło właściwe suchej substancji soi określone eksperymentalnie [14] wynosi 1577 J/kg·K, natomiast obliczone na podstawie znajomości składu chemicznego – 1490 J/kg·K. Ciepło właściwe soi w przedziale temperatury 285 K ÷ 301 K i wilgotności 0 ÷ 0,28 scharakteryzowane jest zależnością [14]:

$$c = 2547\, m + 1640 . \tag{4.104}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła ziarna soi w przedziale temperatury $283\ \text{K} < T < 338\ \text{K}$ i przy wilgotności $m = 0{,}112$, zmienia się [56] następująco:

$$\lambda = 6{,}9 \cdot 10^{-4} T + 0{,}0984 . \tag{4.105}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła ziarna rozdrobnionego lub zmielonego jest mniejszy niż całego, ponieważ maleje udział kondukcyjnej wymiany ciepła w związku ze wzrostem porowatości warstwy. Jeżeli w 283 K przewodność cieplna ziarna soi równa się 0,097 W/m·K, to ziarna rozdrobnionego – 0,087 W/m·K, a ziarna zmielonego (wymiar cząstek 0,58 mm) odpowiednio 0,066 W/m·K (przy praktycznie niezmiennej wilgotności).

Współczynnik wyrównywania temperatury ziarna soi wynosi $a = (0{,}89 \div 0{,}91) \cdot 10^{-7}$ m^2/s (dla $T > 273$ K). Natomiast w przedziale temperatury 255 K ÷ 300 K równa się $a = 1{,}49 \cdot 10^{-7}$ m^2/s [14].

Gęstość różnych gatunków soi (przy $m = 0{,}07 = \text{idem}$) waha się od 1168 kg/m^3 do 1326 kg/m^3 [14]. Przy zwiększaniu wilgotności ziarna do od 0 do 0,50 jego gęstość zmniejsza się:

$$\rho = 1332 - 518m . \tag{4.106}$$

Gęstość nasypowa ziaren soi waha się od 720 do 748 kg/m^3 i zmniejsza ze wzrostem wilgotności.

4.11. Właściwości termofizyczne produktów przetwórstwa zbóż

4.11.1. Śruta

Doniesienia na temat właściwości termofizycznych śrut są nieliczne [25,27]. Wartości średnie ciepła właściwego (dla temperatury około 293 K) śrut są następujące:

- jęczmiennej 1842 J/kg·K,
- kukurydzianej 1926 J/kg·K,
- owsianej 1423 J/kg·K,
- pszennej 1968 J/kg·K.

4.11.2. Mąka

Ciepło właściwe suchej substancji mąki pszennej zawiera się w przedziale od 1256 J/kg·K [15] do 1884 J/kg·K [6]. Wartość średnia ciepła właściwego suchej masy mąki pszennej określona z reguły Koppa-Neumanna, na podstawie znajomości jej składu chemicznego, wynosi 1423 J/kg·K [14].Wartości ciepła właściwego

suchej substancji poszczególnych gatunków mąk zawiera tablica 4.8. Ciepło właściwe suchej substancji mąki jest funkcją temperatury (dla 273 K < T < 333 K):

$$c = 2{,}26\,T + 620\,. \tag{4.107}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik wyrównywania temperatury suchej substancji mąki rosną ze zwiększeniem gęstości nasypowej [14]. Dla $\rho_n = 400$ kg/m^3, $\lambda = 0{,}08$ W/m·K, $a = 1{,}05 \cdot 10^{-7}$ m^2/s, a dla gęstości nasypowej $\rho_n = 890$ kg/m^3, $\lambda = 0{,}12$ W/m·K, $a = 1{,}11 \cdot 10^{-7}$ m^2/s.

Tablica 4.8.

Ciepło właściwe suchej substancji mąki

Gatunek mąki	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Literatura
Pszenna:		[20]
krupczatka,	1419	
wyższego gatunku,	1426	
I gatunku	1409	
Razowa	1438	
Kukurydziana	1411	[14]

Ciepło właściwe mąki na ogół nie zależy od gatunku i miejsca zbioru ziarna [24,27,39], zmienia się natomiast pod wpływem wilgotności i temperatury. Jednakże wartości eksperymentalne ciepła właściwego znacznie się różnią: od 1256 [15] do 3277 J/kg·K [32] (dla m = 0). Źródłem takich różnic jest wpływ konwekcji swobodnej na proces wymiany ciepła, stwierdzany podczas pomiarów ciepła właściwego i przewodności cieplnej materiałów drobnodyspersyjnych [40,42]. Ciepło właściwe mąki o wilgotności 0 < m < 0,165 i T= 293 K opisane jest równaniem:

$$c = 2764\,m + 1423\,. \tag{4.108}$$

Zmianę ciepła właściwego pięciu gatunków mąki produkowanych w Polsce (pszenna: typ 500, 850, Graham, żytnia: typ 720, 2000) w zależności od wilgotności (0,065 < m < 0,165) charakteryzuje wzór [39]:

$$c = 3280\,m + 1414\,. \tag{4.109}$$

Ciepło właściwe mąki wzrasta także pod wpływem temperatury, np. dla mąki pszennej o wilgotności m = 0,14 i w przedziale temperatury 268 K < T < 308 K, zmienia się w następujący sposób [20]:

$$c = 8{,}40\,T - 661\,. \tag{4.110}$$

Wpływ obu parametrów na ciepło właściwe ilustruje wzór [31] (0 < m < 0,10; 273 K < T < 333 K):

$$c = 4800\,m^2 + 1846\,m + 2{,}31\,T + 604\,. \tag{4.111}$$

Ciepło właściwe poszczególnych gatunków mąki zawiera tablica 4.9.

Tablica 4.9.

Ciepło właściwe mąki

Gatunek	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
Pszenna	0,065 ÷0,12		$c = 5945\,m + 1149$	(4.112)	[14]
	0,12	298 ÷351	1709		[54]
Pszenna tortowa	0,088	273 ÷373	$c = 6{,}58\,T - 450$	(4.113)	[40]
Pszenna, typ 500	0,078 ÷0,16	250 ÷320	$c = 14{,}33\,T - 2353$	(4.114)	[39]
			$c = 3890\,m + 1349$	(4.115)	
Pszenna, typ 850	0,08 ÷0,162	250 ÷320	$c = 2735\,m + 1485$	(4.116)	[39]
Z pszenicy:					[38]
twardej,	0,1353		1237		
średniej,	0,1284		1524		
miękkiej	0,1321		1497		
Graham, typ 1850	0,086 ÷0,16	250 ÷320	$c = 3404\,m + 1348$	(4.117)	
			$c = 12{,}08\,T - 1717$	(4.118)	
Żytnia: typ 720,	0,083 ÷0,16	250 ÷320	$c = 4100\,m + 1367$	(4.119)	
			$c = 14{,}07\,T - 2200$	(4.120)	
typ 2000	0,065 ÷0,165	250 ÷320	$c = 2497\,m + 1490$	(4.121)	
			$c = 14{,}02\,T - 2232$	(4.122)	
Żytnia	0,1311		1484		
Ryżowa	0,1346		1433		
Sojowa odtłuszczona	0,136 ÷0,362	330 ÷360	$c = 3197\,m + 1521$	(4.123)	[54]

Współczynnik przewodzenia ciepła mąki zależy od temperatury, wilgotności, gęstości nasypowej (porowatości). Ze wzrostem temperatury rośnie przewodność cieplna mąki (tablica 4.10).

Tablica 4.10.

Współczynnik przewodzenia ciepła różnych gatunków mąki

Gatunek mąki	Wilgotność m	Temperatura T [K]	Przewodność cieplna λ [W/m·K]	Numer wzoru	Literatura
Pszenna	0,140	268 ÷308	$\lambda = 4{,}6\cdot 10^{-4}T - 0{,}0156$	(4.124)	[14]
Pszenna gat. I	0,04 ÷0,46	298	$\lambda = 0.34m + 0{,}084$	(4.125)	
Pszenna: typ 500,	0,078 ÷0,158	250 ÷320	$\lambda = 5{,}52\cdot 10^{-4}T - 0{,}20$	(4.126)	[39]
			$\lambda = 3{,}60\cdot 10^{-3}m + 0{,}0756$	(4.127)	
typ 850, tortowa.	0,082 ÷0,162	250 ÷320	$\lambda = 6{,}23\cdot 10^{-4}T - 0{,}0683$	(4.128)	
			$\lambda = 3{,}86\cdot 10^{-3}m + 0{,}0165$	(4.129)	
	0,088	273-373	$\lambda = 8{,}94\cdot 10^{-4}T - 0{,}165$	(4.130)	[41]
Graham typ 1850	0,086-0,166	250-320	$\lambda = 6{,}23\cdot 10^{-4}T - 0{,}0687$	(4.131)	[39]
			$\lambda = 4{,}76\cdot 10^{-3}m + 0{,}0467$	(4.132)	
Żytnia	0,04÷0,46	298	$\lambda = 0{,}20m + 0{,}083$	(4.133)	[14]
Żytnia, typ 720	0,083÷0,163	250÷320	$\lambda = 6{,}21\cdot 10^{-4}T - 0{,}0548$	(4.134)	[32]
			$\lambda = 4{,}76\cdot 10^{-3}m + 0{,}0467$	(4.135)	
Żytnia, typ 2000	0,065÷0,165	250÷320	$\lambda = 4{,}30\cdot 10^{-4}T - 0{,}0142$	(4.136)	[39]
			$\lambda = 4{,}56\cdot 10^{-3}m + 0{,}043$	(4.137)	
Sojowa odtłuszczona $\rho_n = 950 \div 1300$	0,092÷0,391	298÷423	$\lambda = 0{,}141 + 2{,}69\cdot 10^{-4}\rho_n + 1{,}19m + 0{,}70m^2 + 6{,}7\cdot 10^{-4}T$	(4.138)	[19,53]

Równania opisujące zależność przewodności cieplnej pięciu gatunków mąki produkowanej w kraju (pszenna typ: 500, 850; Graham; żytnia typ: 720, 2000) od temperatury i wilgotności są następujące [39]:

$$\lambda = 5{,}64\cdot 10^{-4}T - 0{,}0468, \tag{4.139}$$

$$\lambda = 4{,}06\cdot 10^{-3}m + 0{,}058. \tag{4.140}$$

Wyniki badań eksperymentalnych przewodności cieplnej mąki pszennej I gatunku pozwoliły [14] na sformułowanie wzoru uwzględniającego wpływ obu parametrów ($0 < m < 0{,}20$; $293\ \mathrm{K} < T < 333\ \mathrm{K}$; $\rho_n = 700\ \mathrm{kg/m^3}$):

$$\lambda = 0{,}285m + 3{,}0\cdot 10^{-4}T + 0{,}029. \tag{4.141}$$

W odróżnieniu od temperatury gęstość nasypowa ma duży wpływ na przewodność cieplną mąki. Zwiększenie gęstości nasypowej mąki pszennej od 440 do 680 kg/m^3 powoduje wzrost przewodności cieplnej od 0,08 W/m·K do 0,16 W/m·K [14]. Wpływ gęstości nasypowej wymienionych pięciu gatunków mąki krajowej na przewodność cieplną [39] określony jest wzorem:

$$\lambda = 2{,}45\cdot 10^{-4}\rho_n - 0{,}0532, \tag{4.142}$$

który jest ważny dla $\rho_n = 530 \div 880\ \mathrm{kg/m^3}$.

Mąka jest produktem o dużej porowatości. Mąka pszenna ma porowatość $\varepsilon = 0{,}60$, a porowatość mąki żytniej równa się 0,704 [38]. W produktach porowatych obserwuje się [32,38] wpływ prądów konwekcji naturalnej na współczynnik przewodzenia ciepła mąki. Większa porowatość zmniejsza zdolność mąki do przewodzenia ciepła.

Wartości współczynnika wyrównywania temperatury mąki zawiera tablica 4.11.

Tablica 4.11.

Współczynnik wyrównywania temperatury mąki

Mąka	Wilgotność m	Temperatura T[K]	Gęstość nasypowa ρ_n [kg/m^3]	Współczynnik $a\cdot 10^7$ [m^3/s]	Literatura
Pszenna:					
„Golden Fleece",	0,127		784	1,00	[33]
I gatunku,	0,129÷0,130	293	788	0,95	[14]
		303		0,46	[32]
z pszenicy twardej,	0,135		555	0,52	[38]
z pszenicy miękkiej.	0,132		457	0,526	
Żytnia	0,131		460	0,60	[38]
Sojowa odtłuszczona	0,131	340	950	3.87	[19]

Z tablicy widać jak duża jest rozbieżność w wartościach dyfuzyjności cieplnej maki, będącej wynikiem wpływu konwekcji naturalnej [32] na proces wyrówny-

wania temperatury. Dyfuzyjność cieplna mąki wzrasta ze wzrostem wilgotności [41]:

$$a = (2{,}32 + 0{,}45m)\cdot 10^{-7}. \tag{4.143}$$

Wzór ma zastosowanie dla temperatury T = 293 K i wilgotności 0,02 < m < 0,47. Zmianę dyfuzyjności cieplnej mąki tortowej (m = 0,088, ρ_n = 753 kg/m^3 i żytniej m = 0,098, ρ_n = 708 kg/m^3) w przedziale temperatury 273 K < T < 373 K ilustrują równania [43]:

$$a = (15{,}57 - 1{,}573\cdot 10^{-2}T)\cdot 10^{-8}, \tag{4.144}$$

$$a = (15{,}25 - 1{,}83\cdot 10^{-2}T)\cdot 10^{-8} \tag{4.145}$$

Gęstość endospermu ziarna jest znacznie większa niż okrywy. Z tego powodu różne gatunki i typy maki, charakteryzujące się określonym stosunkiem części anatomicznych zmielonego ziarna mają odmienną gęstość (tablica 4.12.

Tablica 4.12.

Gęstość mąki

Gatunek i typ mąki	Wilgotność m	Gęstość ρ [kg/m^3]	Gęstość nasypowa ρ_n [kg/m^3]		Literatura
			luźno usypanej	zagęszczonej	
Pszenna: I gatunku, „Golden Fleece",	0,136	1460	484	770–900	[14]
	0,127			784	[33]
z pszenicy twardej,	0,135	1478	555		[38]
z pszenicy średniej,	0,128	1537	503		
z pszenicy miękkiej,	0,132	1514	457		
typ 500,	0,130		559	880	[39]
typ 850.	0,130		549	830	
Graham, typ 1850	0,130		608	790	
Żytnia: typ 720,	0,130		512	830	
typ 2000.	0,130		542	770	
Żytnia	0,131	1559	460		[38]
Jęczmienna	0,149		375	462	[14]
Ryżowa	0.134	1530	610		[38]

Gęstość nasypowa mąki zależy od wielu czynników [14]: w pierwszej kolejności od sposobu ułożenia cząstek. Podczas przechowywania mąki w silosie jej

gęstość nasypowa rośnie ze wzrostem wysokości. Gęstość nasypowa mąki pszennej w silosie na wysokości 0 m równa się ρ_n = 549 kg/m^3. Natomiast na głębokości 12 m – ρ_n = 841 kg/m^3 [14]. W czasie pierwszych 50 dni przechowywania mąki w silosie jej porowatość zmniejsza się, następnie stabilizuje.

Porowatość zmniejsza się także z wielkością obciążenia pionowego na warstwę mąki [14] oraz ze zmniejszeniem średnicy jej cząstek [41].

4.11.3. Kasza

Ciepło właściwe substancji suchej kasz: gryczanej, jaglanej, jęczmiennej, kukurydzianej, owsianej, pszennej obliczone z równania Koppa-Neumanna zawiera się w przedziale od 1437 J/kg·K do 1481 J/kg·K [14]. Średnia wartość ciepła właściwego substancji suchej kasz równa się 1450 J/kg·K.

Ciepło właściwe kasz rośnie ze wzrostem temperatury (tablica 4.13). Z tablicy tej widać, że ciepło właściwe kasz zmienia się, przede wszystkim, pod wpływem wilgotności. Mniejszy wpływ ma temperatura.

Tablica 4.13.

Ciepło właściwe kasz

Kasza	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
gryczana	283÷333	0÷0,20	$c = 16\,mT - 408\,m + 1047$	(4.146)	[14,58]
jaglana			$c = 18\,mT - 2404\,m + 1340$	(4.147)	
jęczmienna: perłowa, wiejska					
			$c = 40\,mT - 9160\,m + 879$	(4.148)	
		0,108	$c = 9{,}206\,T - 1380$	(4.149)	[13]
manna		0÷0,20	$c = 16\,mT - 1268\,m + 1005$	(4.150)	[14,38]
		0,118	$c = 6{,}392\,T - 307$	(4.151)	[41]
owsiana		0÷0,20	$c = 43\,mT - 9479\,m + 963$	(4.152)	[14,38]

Współczynnik przewodzenia ciepła substancji suchej kasz zależy od wilgotności, temperatury i porowatości. Zmiany porowatości, wynikające ze sposobu ułożenia ziaren w warstwie, są jednak nieznaczne. Ze względu na porowatość warstwy substancji suchej kasze są takimi materiałami dyspersyjnymi, w których przewodność cieplna cząsteczek wpływa na przewodność warstwy. W analizie procesu wymiany ciepła należy więc uwzględniać nie tylko współczynnik przewo-

dzenia ciepła cząstek (0,072 ÷ 0,097 W/m·K) [14], lecz także współczynnik przewodzenia ciepła powietrza zamkniętego między nimi.

W przedziale temperatury 273 K ÷ 373 K przewodność cieplna kaszy jęczmiennej wiejskiej ($m = 0{,}108$, $\rho_n = 856$ kg/m^3) i kaszy manny (m = 0,118, $\rho_n = 717$ kg/m^3) [41] zmienia się odpowiednio według równań:

$$\lambda = 9{,}17 \cdot 10^{-4} T - 0{,}17, \tag{4.153}$$

$$\lambda = 2{,}29 \cdot 10^{-4} T - 0{,}04. \tag{4.154}$$

Dyfuzyjność cieplna kasz maleje ze wzrostem temperatury. Porowatość ma także wpływ na dyfuzyjność cieplną. Jej zwiększenie podnosi [14,32] wartość współczynnika wyrównywania temperatury. Dyfuzyjność cieplną kaszy jęczmiennej Wiejskiej i kaszy manny w zakresie temperatury 273 K ÷ 373 K charakteryzują równania [41]:

$$a = (16{,}73 - 2{,}38 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8}, \tag{4.155}$$

$$a = (13{,}80 - 1{,}34 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8}. \tag{4.156}$$

Gęstość suchej substancji kasz (tablica 4.14) zależy od ich składu chemicznego i porowatości. Gęstość kaszy owsianej jest mniejsza niż gęstość innych kasz, ponieważ kasza owsiana ma więcej tłuszczu i skrobi.

Tablica 4.14.

Gęstość suchej substancji kasz

Kasza	Gęstość ρ [kg/m^3]	Gęstość nasypowa ρ_n [kg/m^3]	
		swobodnie nasypanej	zagęszczonej
Gryczana	1256	755	815
Jaglana	1406	787	877
Jęczmienna perłowa	1315	810	878
Kukurydziana	1380		
Manna	1380	733	814
Owsiana	1245	695	783
Ryżowa	1407	825	880

Substancja sucha kasz ma właściwości sprężyste i „przeciwstawia się" ściskaniu. Z tego powodu kasze odznaczają się małym przedziałem zmienności gęstości nasypowej i porowatości.

Zależność opisująca zmianę gęstości kasz od wilgotności, podobnie jak analogiczne związki dla ziaren odpowiednich zbóż, dzieli się na trzy charakterystyczne przedziały. Przy wzroście wilgotności do 0,10 ÷ 0,15 zwiększa się gęstość ziarna kasz, ponieważ woda wyciska zawartą w nich fazę gazową. Przy dalszym powiększeniu wilgotności do 0,20 ÷ 0,25 gęstość ziarna maleje, gdyż przy pęcznieniu jego objętość rośnie szybciej niż masa. Natomiast dalsze zwiększenie wilgotności nie zmienia gęstości ziarna, albowiem jednakowo zwiększają się masa i objętość. Gęstość niektórych gatunków kasz opisują równania [14]:

- kasza gryczana ($0{,}123 < m < 0{,}180$):

$$\rho = 1331 - 200m; \tag{4.157}$$

- kasza jęczmienna perłowa ($0{,}167 < m < 0{,}375$):

$$\rho = 1477 - 770m; \tag{4.158}$$

- kasza manna ($0{,}118 < m < 0{,}235$):

$$\rho = 1516 - 1520m. \tag{4.159}$$

4.11.4. Ciasto

Ciasto należy do ciał koloidalno-kapilarno-porowatych [34] (ciasto biszkoptowe) lub koloidalno-quasikapilarno-porowatych [13] (ciasto makaronowe).Ciasto jest systemem heterogenicznym[13,34], w którym podstawowymi składnikami są [13]: gluten, skrobia, woda i powietrze. Właściwości termofizyczne takiego systemu zależą od składu chemicznego, wilgotności oraz zmian struktury i charakteru wiązania wody [12], następujących w czasie wypieku pod wpływem zmiennej temperatury.

W procesie przygotowania w cieście pozostaje dużo powietrza w postaci wtrąceń mikro- i makrodyspersyjnych, rozpuszczonych w fazie ciekłej. Powietrze zajmuje określoną część porów i kapilar. Ze wzrostem temperatury następuje

zmiana (zagęszczenie) struktury ciasta natywnego i zwiększenie udziału przestrzeni wypełnionych mieszaniną parowo-powietrzną, której dyfuzyjność cieplna jest prawie 200 razy większa od dyfuzyjności cieplnej ciasta [13]. Pod wpływem tych procesów rosną wartości liczbowe a i λ. Proces wzrostu kończy się w temperaturze około 333 K, tj. w temperaturze końca procesu kleikowania skrobi i denaturacji białek. Wówczas ciasto, jako system heterogeniczny, ulega stabilizacji i w temperaturze powyżej 343 K obserwuje się [12,34] obniżenie wartości ciepła właściwego, przewodności i dyfuzyjności cieplnej.

Ciepło właściwe suchej substancji ciasta w przedziale temperatury 273 K ÷ 393 K zmienia się zgodnie z równaniem:

$$c = 4{,}86\,T - 213{,}50\,. \tag{4.160}$$

Natomiast ciepło właściwe ciasta wilgotnego zmienia się pod wpływem temperatury (w przedziale 273 K ÷ 373 K) według wzoru [46]:

$$c = 0{,}013\,T^2 - 7{,}30\,T + 5208\,. \tag{4.161}$$

Ciepło właściwe ciasta makaronowego o wilgotności 0,13 ÷ 0,32 w przedziale temperatury 293 K ÷ 333 K, opisane jest wzorem:

$$c = 1549 \cdot \frac{m}{1-m} + 7{,}536\,T + 1649{,}7\,. \tag{4.162}$$

Ciepło właściwe skrobi i glutenu jest także funkcją temperatury (w przedziale 293 K ÷ 333 K):

$$c = 5{,}737\,T - 238{,}50\,, \tag{4.163}$$

$$c = 6{,}329\ \mathrm{T} - 263{,}8. \tag{4.164}$$

Ciepło właściwe meksykańskiego ciasta makaronowego (Tortillas) o wilgotności m = 0,5 ÷ 0,6 i w zakresie temperatury 328 K ÷ 348 K zmienia się [15] od 2773 J/kg·K do 3170 J/kg·K. Zmianę ciepła właściwego ciasta pszennego o wilgotności m = 0,5 podczas zamrażania ilustruje tablica 4.15.

Tablica 4.15.

Ciepło właściwe zamrażanego ciasta

Temperatura T [K]	250	255	260	265	270	272	293
Ciepło właściwe c [J/kg·K]	2452	2784	3515	5971	11 124	13 058	2970

Procesy opisane w tym punkcie na początku mają bardzo duży wpływ na przewodność i dyfuzyjność cieplną ciasta. Zależności $\lambda = \lambda(m)$ i $a = a(m)$ mają dwa punkty przegięcia (zależność ma kształt położonej litery s), wynikające ze zmiany charakteru wiązania wilgoci w materiale. Pierwszy punkt (m = 0,20) odpowiada [13] monomolekularnej warstwie wilgoci, drugi (m > 0,28) – wilgoci higroskopijnej. Położenie punktów nieznacznie zależy od temperatury. Badanie eksperymentalne zależności przewodności i dyfuzyjności cieplnej ciasta od temperatury wskazuje [12,13] na ich wzrost do T = 333 K. Po zakończeniu procesu kleikowania skrobi następuje zmniejszenie ich wartości.

Również zawartość cukru i tłuszczu wpływa na przewodność i dyfuzyjność cieplną. Zwiększenie zawartości cukru w cieście zmniejsza ilość wody wolnej, natomiast tłuszcz powoduje jej wzrost. Ma to określony wpływ na proces wymiany ciepła w czasie wypieku. Na jego początku jest usuwana woda wolna, wartości współczynników λ i a rosną. Następnie, przy usuwaniu z ciasta wody związanej, współczynniki te zmniejszają się. Przy zwiększonej zawartości cukru w cieście mniejsza ilość wody wolnej jest z niego usuwana w krótszym czasie. Dlatego maksymalne wartości λ, a obserwuje się już na początku wypieku. Natomiast większa ilość wody wolnej (większa zawartość tłuszczu) w cieście usuwa się dłużej. Maksymalne wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej obserwuje się przy końcu procesu wypieku [13]. Przedstawiony wyżej przebieg zmian przewodności i dyfuzyjności cieplnej ciasta z maksimum w T = 333 K nie zawsze znajduje potwierdzenie w wynikach innych badań. Na przykład, przewodność cieplna ciasta drożdżowego o wilgotności m = 0,45 i dla przedziału temperatury 293 K ÷ 363 K zmienia się następująco:

$$\lambda = 1{,}78 \cdot 10^{-3} T - 0{,}230. \tag{4.165}$$

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności na przykładzie ciasta makaronowego (m = 0,1 ÷ 0,4 ; T = 333 K) zilustrowane jest wzorem [2]:

$$\frac{1}{\lambda} = -1{,}69m + 3{,}25\,. \tag{4.166}$$

Wpływ wilgotności i temperatury na przewodność cieplną ciasta drożdżowego [35] zilustrowany jest równaniem:

$$\lambda = 1{,}3 \cdot 10^{-3} T - 0{,}32m + 0{,}31 . \tag{4.167}$$

Zmianę współczynnika przewodzenia ciepła ciasta pszennego (m = 0,50) podczas zamrażania ilustruje tablica 4.16 [21].

Tablica 4.16.

Współczynnik przewodzenia ciepła zamrażanego ciasta

Temperatura T [K]	250	255	260	265	270	272
λ [W/m·K]	1,060	1,052	1,046	1,010	0,783	0,476

Dyfuzyjność cieplna ciasta drożdżowego (4.168) rośnie ze wzrostem temperatury, natomiast ciasta makaronowego (4.169) – maleje [2]:

$$a = (1{,}615 - 0{,}113m + 1{,}26 \cdot 10^{-3} T) \cdot 10^{-7} , \tag{4.168}$$

$$a = (2{,}74 - 0{,}90m - 3{,}70 \cdot 10^{-3} T) \cdot 10^{-7} . \tag{4.169}$$

Gęstość ciasta drożdżowego maleje ze wzrostem wilgotności i temperatury. Gęstość ciasta drożdżowego ($m = 0{,}395 \div 0{,}40$) w zakresie temperatury 293 K ÷ 363 K zmienia się zgodnie ze wzorem:

$$\rho = 2272 - 4{,}97T . \tag{4.170}$$

Gęstość ciasta makaronowego z pszenicy twardej, w zależności od jego wilgotności ($m = 0{,}1 \div 0{,}4$), opisano w [2] równaniem:

$$\frac{1}{\rho} = (3{,}02m + 6{,}46) \cdot 10^{-4} . \tag{4.171}$$

Gęstość nasypowa meksykańskiego Tortillas zmieniała się od 1102 kg/m^3 do 1173 kg/m^3, w przedziale wilgotności m = 0,5 ÷ 0,6 i temperatury 328 K ÷ 348 K [15].

4.11.5. Chleb i pieczywo

Właściwości termofizyczne chleba i innych rodzajów pieczywa zależą od wilgotności, temperatury, struktury i składu chemicznego [3]. Chleb i pieczywo należą do substancji koloidalno-kapilarno-porowatych, w których na proces wymiany ciepła wpływa wymiana masy. Zwiększenie wilgotności pieczywa powoduje wzrost ekwiwalentnego ciepła właściwego, szczególnie w temperaturze 373 K, w której zachodzi intensywne odparowanie wody związanej adsorbcyjnie [3]. Powyżej tej temperatury następuje obniżenie wartości ciepła właściwego.

Badanie sucharów nie prasowanych i prasowanych pod ciśnieniem 10 MPa wykazało, że ich ciepło właściwe nie zależy na ogół od porowatości. Wyjaśnieniem tego zjawiska są niskie wartości ciepła właściwego powietrza zawartego w porach. Zwiększenie zawartości cukru i zmniejszenie zawartości tłuszczu powoduje wzrost ciepła właściwego chleba.

W przedziale temperatury 293 K ÷ 343 K i przy zwiększeniu gęstości od 425 kg/m^3 do 714 kg/m^3 ciepło właściwe miękiszu chleba pszennego wzrasta zgodnie ze wzorem [23]:

$$c = 3{,}7\rho + 37T - 10463 . \tag{4.172}$$

Ciepło właściwe miękiszu szwedzkiego chleba typu francuskiego o wilgotności m = 0,556 (zawartość soli i cukru – 0,07) opisane jest równaniem [23]:

$$c = 0{,}89\ T + 2945 . \tag{4.173}$$

Równanie to jest ważne dla przedziału temperatury 293 K ÷ 423 K. Odpowiednie równanie dla skórki tego chleba ma postać [23]:

$$c = 1{,}163\ T + 2896 . \tag{4.174}$$

Ciepło właściwe chleba żytniego o wilgotności m = 0,51 w temperaturze 293 K wynosi 2890 J/kg· K [50].

W procesie wypieku chleba maleje w nim zawartość wody i zmniejsza się gęstość. Te zmiany mają określony wpływ na jego przewodność i dyfuzyjność cieplną. W przedziale temperatury 293 K ÷ 343 K współczynnik przewodzenia ciepła miękiszu chleba pszennego zmienia się według wzoru [29]:

$$\lambda = 2{,}6 \cdot 10^{-4} \rho + 3{,}0 \cdot 10^{-3} T - 0{,}835 . \qquad (4.175)$$

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła miękiszu chleba od wilgotności ma następującą postać (T = 297 K, m = 0,55 ÷ 0,65):

$$\lambda = 0{,}31 - 0{,}278m . \qquad (4.176)$$

Współczynnik wyrównywania temperatury miękiszu chleba zmniejsza się liniowo w zależności od gęstości (293 K ÷ 343 K):

$$a = (288 - 0{,}26\rho) \cdot 10^{-3} . \qquad (4.177)$$

Ciepło właściwe i współczynnik wyrównywania temperatury chleba i ciastek zawiera tablica 4.17.

Tablica 4.17.

Ciepło właściwe i współczynnik wyrównywania temperatury chleba i ciastek

Produkt	Temperatura T [K]	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Współczynnik $a \cdot 10^7$ [m^2/s]	Literatura
Chleb słodowy	> 273	0,344		1,17	[1]
Skórka chleba	383			1,87	[25]
Ciastko: bananowe, czekoladowe, jabłkowe, kawowe, wiśniowe	296				[9,10]
		0,371	2590	1,35	
		0,319	2570	1,21	
		0,237	2250	1,17	
	> 273	0,250	2930	0,465	
	296	0,282	2470	1,08	

Gęstość chleba żytniego o wilgotności m = 0,468 równa się 527 kg/m^3, natomiast gęstość chleba pszennego (m = 0,395 ÷ 0,450) – 480 kg/m^3 [50].

Literatura

[1] **Alagusundaram K., Jayas D.S., Muir W.E., White N.D.G.** 1991: *Thermal Conductivity of Bulk Barley, Lentils and Peas*, Transactions of the ASAE, Vol.34 (4). July-August, 1784–1788.

[2] **Andrieu J., Gonnet E., Laurent M.** 1989: *Thermal Conductivity, Density, and -Thermal Diffusivity of Extruded Durum Wheat Pasta.* Lebensmittel – Wissenschaft- und Technology,Vol.22, 6–10.

[3] **Буляндра А.Ф., Кучерук И.М., Вербицкий Б.И., Грищенко Э.В.** 1976: *Исследование зависимости удельной теплоемкости сдобных сухарей от температуры,* Пищевая промышленность, (Республиканский межведомственный научно-технический сборник), Издательство „Техника", Киев,22–24.

[4] **Chang C.S.** 1986: *Thermal Conductivity of Wheat, Corn, and Grain Sorgum as Affected by Bulk Density and Moisture Content*, Tranactions of the ASAE, Vol. 29 (5), September- October, 1447–1449.

[5] **Дегтяренко Г.И.** 1976: *Исследование изменения теплофизических характеристик единочного зерна пшеницы в процессе гидротермической обработки.* Автореферат кандидатской диссертации, МТИПП, Москва.

[6] **Disney R.** 1954: *The Specific Heat of Some Cereal Grains*, Cereal Chemistry,Vol.31 (3), 229–239.

[7] **Егоров Г.А.** 1960: *Исследование теплофизических свойств сыпучих пищевых материалов*, Известия вузов, Пищевая технология, № 2,14–16.

[8] **Gadaj S., Cybulska W.** 1973: *Przewodność cieplna warstwy ziarna*, Roczniki Nauki Rolniczych, tom 70-C- 1, 7–15.

[9] **George R.M.** 1990: *A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products*, Camden Foof and Drink Research Association, Technical Bulletin, № 73, 18–20.

[10] **George R.M., Holdsworth S.D.** 1990: *A Literature Survey of Heat Capacity of Food Products,* Campden Food and Drink Research Association, Technical Bulletin, № 76, 6 – 7.

[11] **Гергесов Б.А., Серых Г.М.** 1977: *Теплофизические свойства зерна пшеницы в зависимости от влажности*, Известия вузов, Пищевая технология, № 1, 14–15.

[12] **Гинзбург А.С., Назаров Н.И., Цивцивадзе Г. В., Бархатова Л.П., Савина И.М.** 1973: *Влияние влаго – и термообработки на свойства макаронного теста*, Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 5, 37 – 38.

[13] **Гинзбург А.С., Назаров Н.И., Цивцивадзе Г.В., Савина И.М., Бахратова Л.П.** 1976: *Теплофизические характеристики макаронного теста*, Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 3, 32–33.

[14] **Гинзбург А.С., Громов М.А.** 1984: *Теплофизические характеристики зерна муки и крупы*, Колос, Москва.

[15] **Griffith C.** 1985: *Specific Heat, Thermal Conductivity*, Density and Thermal Diffusivity of Mexican Tortillas Dough, Journal of Food Science, Vol. 50, 1333–1337.

[16] **Громов М.А., Переверзев В.В.** 1973: *Теплофизические характеристики зернобобовых культур*, Реферативная информация, Серия „Элеваторная промышленность" № 2, 16 –19.

[17] **Громов М.А., Переверзев В.В.** 1973: *Теплофизические характеристики риса*, Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 10, 39.

[18] **Громов М.А., Переверзев В.В.** 1974: *Теплофизические характеристики зерна кукурузы*, Сборник: Хранение и переработка зерна,Серия „Элеваторная промышленность" вып. 1, 27 –29.

[19] **Громов М.А.** 1990: *Теплофизические характеристики обезжиренной соевой муки*, Хлебопродукты, № 7, 46 – 47.

[20] **Громов М.А.** 1993: *Удельная теплоемкость пшеничной муки*, Хлебопродукты, № 12, 15 – 17.

[21] **Jankowski T.** 1992: *Modelowe obliczenia właściwości cieplnych ciasta w procesie zamrażania,* Konferencja Naukowa „Postęp w technologii i chemii żywności", Poznań, 92, 184–185.

[22] **Jasansky A., Bilansky W.K.** 1973: *Thermal Conductivity of Whole Ground Soybeans*, Transactions of the ASAE, 100 – 103.

[23] **Johnsson C., Skjöldebrand C.** 1984: *Thermal Properties of Bread during Baking*, 8.

[24] **Kamiński E., Mulka C., Tylżanowski J.,** 1974: *Ciepło właściwe niektórych surowców paszowych*, Biuletyn Informacyjny Przemysłu Paszowego, Rok XII, zeszyt 1, 36–39.

[25] **Kamiński E.** 1984: *Cechy termofizyczne i suszarnicze ziarna kukurydzy*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych., zeszyt 287, 151–162.

[26] **Kazarian E.A., Hall C.W.** 1965: *Thermal Properties of Grain*, Transactions of the ASAE,Vol. 8, № 1, 33–37, 48.

[27] **Kluza F.** 1984: *Czynniki kształtujące ciepło właściwe nasion najważniejszych roślin uprawnych,* Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Zeszyt 320,143–149.

[28] **Ковалёв А.В., Теличкун В.И.,** 1988*: Влияние температуры и плотности теста и мякиша хлеба на их теплофизические характеристики*, Пищевая промышленность (Киев), № 4, 44–45.

[29] **Комышник Л.Д., Журавлев А.П., Тасибекова Р.Г., Гуревич В.М.** 1975: *Теплопроводность зернового слоя пшеницы,проса и гречихи*, Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 126–128.

[30] **Kusterman M., Scherer R., Kutzbach H.D.,** 1981: *Thermal Conductivity and Diffusivity of Shelled Corn and Grain*, Journal of Food Process Engineering, (4),137–153.

[31] **Lis T.** 1984: *Charakterystyka właściwości cieplnych ziarna pszenicy.* Rozprawa habilitacyjna (streszczenie), Seria Wydawnicza – Rozprawy Naukowe nr 84, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin.

[32] **Lis T., Mazurek B.** 1985: *Właściwości cieplne pszenicy oraz produktów jej przemiału*, Roczniki Nauk Rolniczych, Tom 76 - C – 1, 177–188.

[33] **Magee T.R.A., Bransburg T.,** 1995: *Measurement of Thermal Diffusivity of Potato*, Malt Bread and Wheat Flour, Journal of Food Engineerig, Vol.25, 223–232.

[34] **Мазур П.Я., Карпенко В.И.,** 1973: *Изменение теплофизических свойств теста – печеня*, Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 6, 22–23.

[35] **Метель С.Н., Микрюков В.В.,Каспаров М.Н.,** 1986: *Теплофизические характеристики дрожжевого теста*, Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 107–108.

[36] **Mühlbauer W., Scherer R.,** 1977: *Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten.* Grundlagen der Landtechnik, 27, № 2, 33–40.

[37] **Muir W.E., Viravanichai S.,** 1972: *Specific Heat of Wheat.* Journal of Agricultural Engineering Research, Vol.17, № 4, 338–342.

[38] **Murata S., Miyauchi K.,** 1992: *Measurement of Thermal Properties of Cereal Grain Powders*, Science Bulletin Faculty of Agriculture. Kyushu University, Vol.47, № 1-2, 93–99.

[39] **Nehryng A.,** 1990: *Charakterystyka właściwości fizykochemicznych surowców dla projektowania piekarń*, Etap II, Opracowanie dla Zakładu Badawczego Przemysłu Piekarskiego w Warszawie.

[40] **Niesteruk R., Matuszek T.,** 1981: *Spezifische Wärmekapazität von Krill im Temperaturbereich von 278 bis 363 K*, Zeitschrift für Lebensmittel – Technologie – und Verfahrenstechnik, 32 Jahrgang, Heft 4, Juni/Juli.139–141.

[41] **Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A.,** 1991: *Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych,* Sprawozdanie z pracy naukowo- badawczej, Politechnika Białostocka, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

[42] **Niesteruk R.,**1993: *Thermophysical Properties of Feed Meals*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Zeszyt 399, 163–166.

[43] **Пабис С., Биловицка Э.,Гадай С.П.** 1970: *Теплопроводность и коэффициент температуропроводности в слое зерна некоторых сельскохозяйственных продуктов*, Инженерно-физический журнал, том XIX, № 3, 501.

[44] **Pabis S.,** 1982: *Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 98–116.

[45] **Pentima J.H.D., Güemes D.R.,** 1987: *Thermal Diffusivity and Heat Transfer Characteristics of Husked Sweat Corn*, Lebensmittel – Wissenschaft – und Technologie, 20. Jahrgang, № 1, 12–15.

[46] **Polák M.,** 1984: *Specifická tepelná kapacita cesta*, Mlýnsko- pekárensky průmysl, č. 2, 42–44.

[47] **Riedel L.,** 1959.: *Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Weissbrot und anderen Mehlprodukten*, Kältetechnik, Band 11, Heft 2, 41–43.

[48] **Riedel L.,** 1966: *Versuche zur Bestimmung der spezifischen Wärme des gebundenen Wassers*, Kältetechnik- Klimatisierung, Band 18, Heft 5,193–195.

[49] **Schäfer W.,** 1955: *Die spezifische Wärme des Weizens*, Die Mühle, 92 Jahrgang, Heft 20, 247–250.

[50] **Селягин В.Е.,** 1985: *Теплофизические и диэлектрические характеристики хлеба из ржаной муки*, Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 3 ,23–25.

[51] **Серых Г.М., Гергесов Б.А.,** 1980: *Зависимость теплофизических характеристик зерна пшеницы от его температуры и влажности*, Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 26–28.

[52] **Tadano T.,** 1987: *Study on Thermal Conductivity of Solid in White Bread*, Bulletin Coll. Agr. and Vet. Med., Nihon University, № 44, 18–22.

[53] **Wallapapan K., Sweat V.E.,** 1982: *Thermal Conductivity of Defatted Soy Flour*, Transactions of the ASAE, 1440 –1444.

[54] **Wallapapan K., Sweat V.E., Diehl K.C., Engler C.R.,** 1983*: Thermal Properties of Porous Foods*, ASAE Paper, №. 83–6515.

[55] **Wallapapan K., Sweat V.E., Arce J.A., Dahm P.F.,** 1984: *Thermal Diffusivity and Conductivity of Defatted Soy Flour*, Transactions of the ASAE, 1610–1613.

[56] **Waszkiewicz C.,** 1987: *Badania właściwości cieplnych materiałów ziarnistych*, Roczniki Nauk Rolniczych, Tom 77- C- 2, 161–167.

[57] **Вышелесский А.Н., Громов М.А.,** 1967: *Теплофизические характеристики муки*, Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 4, 17 –18.

[58] **Вышелесский А.Н., Громов М.А., Переверзев В.В.,** 1974: *Теплофизические характеристики ядер круп*, Известия вузов, Пищевая технология, № 2, 152–154.

[59] **Yamada T.,** 1984: *Specific Heat of Rice*, Nippon Nôgeikagu Kaishi, Vol. 58, № 1, 31–33.

[60] **Zanoni B., Petronio M.,** 1991: *Effect of Moisture and Temperature of the Specific Heat of Bread,* Ital. Journal of Food Science, 3, 239–242.

[61] **Zaremba A.,** 1989: *Thermal Properties of Cereal Grain*, Proceedings of the 4 International Conference: Physical of Agricultural Materials and their Influence on Technological Processes, Rostock, Sept. 4–8. 1989, 4 ICPPAM, Vol. 2, Berlin 1989, 901–906.

5. WĘGLOWODANY

5.1. Cukier

Ciepło właściwe cukru zmienia się pod wpływem wilgotności i temperatury. Natomiast postać produktu nie ma w zasadzie wpływu (tablica 5.1) na ciepło właściwe, co wynika z nieznacznego wpływu gęstości na tę właściwość. Ciepło właściwe cukru jako mieszaniny dwukomponentowej (cukier – powietrze) poleca się obliczać ze wzoru [5]:

$$c = 1005 + 0{,}159\rho\,. \tag{5.1}$$

Wzór jest ważny dla temperatury T = 293 K i przedziału gęstości nasypowej 460 ÷ 1600 kg/m^3.

Tablica 5.1.

Ciepło właściwe cukru

Produkt	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Literatura
Monokrysztal cukru	1227 – 1467	[2,17]
Substancja sucha cukru	1027 –1231	[5,11]
Cukier kryształ	1234 – 1296	[1]
Cukier rafinowany	1237	
Cukier puder	1256 –1290	

Zmianę ciepła właściwego cukru w przedziale wilgotności 0,0023< m < 0,037 i dla temperatury T = 293 K ilustruje wzór [5]:

$$c = 1336 + 2840\,m\,. \tag{5.2}$$

Zależność ciepła właściwego cukru rafinowanego dla 0 < m < 0,04, w przedziale temperatury 293 K < T < 363 K, opisuje równanie [5]:

$$c = 7{,}20\,T + 2930\,m - 967\,. \tag{5.3}$$

Ciepło właściwe cukru kryształu (KN) o wilgotności m = 0,0032, gęstości nasypowej $\rho_n = 894$ kg/m^3 i w przedziale temperatury 273 K ÷ 373 K opisane jest wzorem [15]:

$$c = 6{,}56\,T - 744\,. \tag{5.4}$$

Z porównania wzorów (5.2) i (5.4) widać, że wilgotność ma większy wpływ na ciepło właściwe niż temperatura. Ciepło właściwe cukru pudru (PN-72/A/-74850) o wilgotności m = 0,0043 i gęstości nasypowej 890 kg/m^3 w tym samym przedziale temperatury zmienia się według zależności [15]:

$$c = 3{,}92\,T - 136\,. \tag{5.5}$$

Przewodność cieplna cukru wzrasta ze wzrostem jego wilgotności [5]:

$$\lambda = 0{,}15 + 3{,}77m\,. \tag{5.6}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła zależy nie tylko od wilgotności, ale także od temperatury i gęstości nasypowej. Wymienione parametry mogą być dokładnie określone. Ponadto zdolność cukru do przewodzenia ciepła zależy od innych, trudnych do opisania czynników, takich jak: kształt, wymiary kryształów i porów między nimi oraz pęcherzy powietrza w ich wnętrzu [5]. Z tych przyczyn wartości współczynnika przewodzenia ciepła cukru kryształu otrzymane przy niezmiennych wartościach m, T, ρ znacznie różnią się między sobą [5]. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła cukru od temperatury z wyżej wymienionych powodów jest różna zarówno w sensie ilościowym jak i jakościowym.

Współczynnik przewodzenia ciepła cukru kryształu według pracy [5] wzrasta ze wzrostem temperatury (od 293 K do 373 K):

$$\lambda = 3{,}6 \cdot 10^{-4} T + 0{,}065\,. \tag{5.7}$$

Natomiast według pracy [20] współczynnik przewodzenia ciepła cukru (m = 0,0015; 268 K < T < 308 K) maleje ze wzrostem temperatury:

$$\lambda = 0{,}248 - 3{,}49 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{5.8}$$

Wpływ temperatury i gęstości nasypowej na współczynnik przewodzenia ciepła cukru suchego ($m = 0$) ilustruje równanie:

$$\lambda = (9{,}21 + 0{,}66\rho_n - 1{,}77T) \cdot 10^{-3}\,. \tag{5.9}$$

Wzór ma zastosowanie dla przedziału temperatury 273 K < T < 308 K i gęstości nasypowej 960 kg/m^3 < ρ_n < 1590 kg/m^3 [5].

Wpływ temperatury na przewodność cieplną cukru kryształu (KN) i cukru pudru opisują odpowiednio równania [15]:

$$\lambda = 0{,}299 + 5{,}92 \cdot 10^{-4} T\,, \tag{5.10}$$

$$\lambda = 0{,}253 + 3{,}82 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{5.11}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury cukru zależy od tych samych parametrów od jakich zależy przewodność cieplna. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że dyfuzyjność cieplna cukru kryształu maleje ze wzrostem temperatury:

$$a = (2{,}3 - 0{,}028T) \cdot 10^{-8} \tag{5.12}$$

Wzór stosuje się dla przedziału temperatury 268 K ÷ 308 K, wilgotności m = 0,015 i gęstości nasypowej 836 kg/m^3.

Ze wzrostem wilgotności cukru kryształu od 0 do 0,037 wzrasta jego dyfuzyjność cieplna:

$$a = (9{,}50 + 225m) \cdot 10^{-8}\,. \tag{5.13}$$

Dyfuzyjność cieplna cukru kryształu normalnego (KN) i cukru pudru dla wyżej podanego przedziału temperatury i gęstości nasypowej zmienia się następująco [15]:

$$a = (26{,}10 - 5{,}147 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8} \tag{5.14}$$

$$a = (13{,}10 - 8{,}13 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8}\,. \tag{5.15}$$

Gęstość kryształu cukru równa się 1591 kg/m^3 [5], natomiast gęstość cukru kryształu (KN) waha się od 1538 do 1588 kg/m^3. Gęstość nasypowa cukru kryształu wynosi: 1050 ÷ 1100 kg/m^3 przy dużym upakowaniu i 550÷938 kg/m^3 przy swobodnym usypaniu [5]. Ze wzrostem wilgotności cukru rośnie jego gęstość nasypowa (dla $0{,}002 < m < 0{,}037$):

$$\rho_n = 2700m + 990 \tag{5.16}$$

Gęstość suchego cukru rafinowanego waha się od 1220 do 1298 kg/m^3 [5].

5.1.1. Roztwory sacharozy

Ciepło właściwe wodnego roztworu sacharozy zmienia się w zależności od koncentracji i temperatury [4]. Ze wzrostem koncentracji (s) sacharozy od 0,10 do 0,75 i temperatury od 293 K do 353 K ciepło właściwe zmienia się według wzoru:

$$c = 4187 - 4570\,s + 7{,}53\,sT. \tag{5.17}$$

Ciepło właściwe zamrożonego roztworu sacharozy maleje ze wzrostem koncentracji, wzrasta natomiast ze wzrostem temperatury, szczególnie w temperaturze bliskiej krioskopowej [18].

Współczynnik przewodzenia ciepła roztworu sacharozy o koncentracji $0{,}1 < s < 0{,}6$ (temperatura $T = 293$ K) maleje zgodnie z równaniem:

$$\lambda = 0{,}581(1 - 0{,}54s). \tag{5.18}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury roztworu sacharozy o wilgotności m = 0,98 w przedziale temperatury 234 K ÷ 268 K maleje od $12{,}70 \cdot 10^{-7}$ m^2/s do $5{,}31 \cdot 10^{-7}$ m^2/s.

Natomiast gęstość roztworu sacharozy w temperaturze $T = 293$ K, w zależności od koncentracji, zmienia się następująco [4]:

$$\rho = 30{,}9s^3 + 144{,}1s^2 + 384{,}1s + 1000. \tag{5.19}$$

5.2. Fruktoza

Przewodność i dyfuzyjność cieplną fruktozy handlowej, w przedziale temperatury 293 K ÷ 353 K i zawartości substancji suchej $n = 0{,}05 \div 0{,}40$, opisują równania [10]:

$$\lambda = 1{,}03n^{0{,}1225}, \tag{5.20}$$

$$a = 0{,}237 \cdot 10^{-6} \cdot n^{0{,}0945}. \tag{5.21}$$

Fruktoza handlowa zawierała 93,5% fruktozy i 6,3% glukozy [10].

5.3. Glukoza

Ciepło właściwe wodnego roztworu glukozy oblicza się z następującego wzoru [12]:

$$c = 4186 - (4752 - 8{,}75\,T)\,s. \tag{5.22}$$

5.4. Laktoza

Ciepło właściwe roztworu wodnego laktozy jest zależne od temperatury i zawartości suchej substancji [8]. W przedziale temperatury 298 K ÷ 353 K i zawartości suchej substancji $n = 0{,}05$ ciepło właściwe roztworu laktozy zmienia się według równania [8]:

$$c = 1{,}00\,T + 3812. \tag{5.23}$$

Wzrost zawartości suchej substancji do 0,4 powoduje obniżenie ciepła właściwego roztworu (dla przedziału temperatury 338 K ÷ 353 K):

$$c = 7{,}50\,T + 1028. \tag{5.24}$$

Wartość średnia ciepła właściwego roztworu laktozy w przedziale temperatury 244,3 K÷ 266,5 K zmienia się [13] od 2160 J/kg·K do 4458 J/kg·K. Zależność $c = c\,(T)$ roztworu laktozy jest podobna do zależności dla produktów spożywczych

o dużej wilgotności, tzn. obserwuje się duży przyrost ciepła właściwego dla temperatury bliskiej 273,15 K. W wyżej wymienionym przedziale temperatury ponad 3 razy maleje [13] współczynnik wyrównywania temperatury roztworu laktozy, od $8{,}10 \cdot 10^{-7}$ m^2/s do $2{,}60 \cdot 10^{-7}$ m^2/s.

5.5. Skrobia (krochmal)

Wartości ciepła właściwego suchej substancji różnych rodzajów skrobi zawiera tablica 5.2 [4,5]. Wartość ciepła właściwego suchej substancji skrobi ziemniaczanej i kukurydzianej obliczona z reguły Koppa-Neumanna równa się [5] odpowiednio: 1425 J/kg·K i 1426 J/kg·K. Wzór opisujący zależność temperaturową (od 233 K do 333 K) ciepła właściwego skrobi ryżowej i ziemniaczanej ma [5] następującą postać:

$$c = 3{,}56\,T + 158\,. \tag{5.25}$$

Tablica 5.2.

Ciepło właściwe suchej substancji skrobi

Skrobia	Ciepło właściwe c [J/kg·K]
kukurydziana	1227 ÷ 1867
pszenna	1710 ÷ 2010
ryżowa	1130 ÷ 1216
z sorgo	1758 ÷ 1884
ziemniaczana	1129 ÷ 1269

Ciepło właściwe suchej substancji skrobi ziemniaczanej natywnej i po skleikowaniu jest prawie jednakowe i wynosi [5]: 1214 i 1231 J/kg·K.

Współczynnik przewodzenia ciepła suchej substancji skrobi ziemniaczanej o gęstości nasypowej 650 kg/m^3 zmienia się nieznacznie w przedziale temperatury 243 K ÷ 333 K i wynosi od 0,10 do 0,125 W/m·K [5].

Natomiast jej dyfuzyjność cieplna w tym samym zakresie temperaturowym obniżyła się od $1{,}40 \cdot 10^{-7}$ m^2/s do $1{,}10 \cdot 10^{-7}$ m^2/s.

Gęstość suchej substancji skrobi ziemniaczanej, pszennej, ryżowej i ziemniaczanej zawiera się w przedziale od 1591 do 1648 kg/m^3 [5], gęstość nasypowa skrobi pszennej jest równa 671 kg/m^3.

Ciepło właściwe skrobi zależy od gatunku, wilgotności i temperatury. Ciepło właściwe skrobi ziemniaczanej nie zależy od jej postaci [5]:
– natywna, $T = 293$ K, $0{,}012 < m < 0{,}146$:

$$c = 2973\ m + 1214\,; \tag{5.26}$$

– po skleikowaniu ($T = 293$ K, $0{,}003 < m < 0{,}1336$):

$$c = 2956\,m + 1231\,. \tag{5.27}$$

Wyniki badania empirycznego ciepła właściwego skrobi ziemniaczanej wskazują, że jego zależność od wilgotności ma charakter liniowy [5,14], jednakże przy $m = 0{,}30$ zmniejsza się współczynnik kątowy prostej, np. dla $T = 293$ K:

$$c = 3767\,m + 1269\,, \qquad \text{dla } m = 0 \div 0{,}30 \tag{5.28}$$

$$c + 2567\,m + 1620\,, \qquad \text{dla } m = 0{,}30 \div 1{,}00 \tag{5.29}$$

O liniowej zależności ciepła właściwego skrobi granulowanej gatunku Amioca (w przedziale wilgotności $0 \div 0{,}288$ i w $T = 298$ K) świadczą także wyniki badań [18]:

$$c = 2441\,m + 1263\,. \tag{5.30}$$

Zmianę ciepła właściwego skrobi, opisaną wzorami (5.28) i (5.29), obserwuje się dla różnych wartości temperatury. Jest ona wynikiem zmiany charakteru wiązania wilgoci z materiałem. Taki przebieg $c = c\,(m)$ wyklucza możliwość zastosowania wartości ciepła właściwego substancji suchej skrobi i reguły addytywności do określania ciepła właściwego w przedziale wilgotności $0 < m < 1{,}0$.
Zmianę ciepła właściwego skrobi od dwóch parametrów (m, T) opisują wzory [6]:

$$c = -145 + 4{,}825\,T + 2250\,m + 5{,}15\,mT\,,\ 273\text{ K} < T < 313\text{ K}\,,\ 0 < m < 0{,}30; \tag{5.31}$$

$$c = -936 + 8{,}70\,T + 4880\,m - 7{,}75\,mT\,,\ 273\text{ K} < T < 313\text{ K},\ 0{,}3 < m < 0{,}5 \tag{5.32}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła skrobi wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury [3,5,21] (dla $T > 273{,}15$ K). Przewodność cieplna skrobi wzrasta także z obniżeniem temperatury, dla $T < T_k$ [4]. Współczynnik przewodzenia ciepła krochmalu, o wilgotności $0 \div 0{,}45$ zmienia się w następujący sposób (dla $T = 293$ K) [4]:

$$\lambda = 0{,}20m + 0{,}145 . \tag{5.33}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła krochmalu z kukurydzy [3], o wilgotności m = 0,80, w przedziale temperatury 293 K÷ 303 K , rośnie zgodnie ze wzorem:

$$\lambda = 0{,}014T + 0{,}1145 . \tag{5.34}$$

Jednoczesny wpływ wilgotności (m=0,50 ÷ 0,75) i temperatury (353 K ÷ 393K) na współczynnik przewodzenia ciepła krochmalu po procesie żelatynizacji ilustruje równanie [21]:

$$\lambda = 0{,}235 + 6{,}6 \cdot 10^{-4} T + 0{,}36m^3 - 9{,}5 \cdot 10^{-4} mT + 0{,}259m . \tag{5.35}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury krochmalu rośnie ze wzrostem jego wilgotności do $m = 0{,}4 \div 0{,}5$ [5].

Gęstość i gęstość nasypową krochmali zawiera tablica 5.3.

Tablica 5.3.

Gęstość i gęstość nasypowa krochmali

Krochmal	Gęstość ρ [kg/m^3]	Gęstość nasypowa ρ_n [kg/m^3]
kukurydziany	1528÷1530	515
pszeniczny	1528÷1542	671
ryżowy	1511÷1512	
batatowy	1518	
ziemniaczany	1500÷1503	640

5.6. Miód

Badanie eksperymentalne ciepła właściwego miodu było przedmiotem licznych prac [9,15,19]. W przedziale wilgotności $m = 0{,}1 \div 0{,}5$ ciepło właściwe miodu zmienia się zgodnie ze wzorem:

$$c = 1570\, m + 1884 . \tag{5.36}$$

Podwyższenie temperatury miodu przy m = idem. powoduje wzrost jego ciepła właściwego. W przedziale temperatury 238 K ÷ 348 K ciepło właściwe miodu jodłowego i sztucznego opisują odpowiednio równania [14]:

$$c = 6{,}03\, T + 656{,}46 , \tag{5.37}$$

$$c = 6{,}42\, T + 570{,}43 . \tag{5.38}$$

Wilgotność miodu jodłowego wynosiła m = 0,166, a – sztucznego była równa m = 0,214.

Ciepło właściwe miodu płynnego (patoki), o wilgotności m = 0,24, z wyłączeniem przedziału temperatury 304 K ÷ 312 K, zmienia się stosownie do równania [15]:

$$c = 5{,}46\, T + 759 . \tag{5.39}$$

W przebiegu funkcji $c = c\,(T)$ ustalonej metodą DSC zaobserwowano [15] lokalną nieciągłość – przyrost („pik") ciepła właściwego: dla miodu płynnego w przedziale temperatury 304 K ÷ 310 K, dla miodu skrystalizowanego (krupca) od 304 K do 340 K. Lokalne przyrosty ciepła właściwego są wynikiem procesów zmian jego konsystencji (dekrystalizacji). Otrzymano następujące maksymalne wartości [19]: 2694 J/kg·K dla miodu płynnego w T = 311 K i 2953 J/kg·K w T = 315 K dla miodu skrystalizowanego. Ciepło właściwego pyłku pszczelego wynosi 2200 J/kg·K [15].

Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła miodu wykazały jego zmniejszanie się w przedziale temperatury 263 K÷273 K i niezmienność (λ = 0,374W/m·K) w przedziale temperatury 273 K ÷ 293 K [1]. Współczynnik przewodzenia ciepła miodu wzrasta ze wzrostem temperatury [15] i wilgotności [7]:

$$\lambda = 0{,}000472\ T + 0{,}210, \tag{5.40}$$

$$\lambda = 8{,}0 \cdot 10^{-4} T + 0{,}29\ m + 0{,}071. \tag{5.41}$$

Wzór (5.41) jest ważny dla $m = 0{,}2 \div 0{,}9$ i $T = 275\ \text{K} \div 344\ \text{K}$.

Współczynnik wyrównywania temperatury miodu (m = 0,221) w przedziale temperatury 268 K ÷ 308 K maleje [11] według zależności:

$$a = (257{,}73 - 0{,}90\ T) \cdot 10^{-8} \tag{5.42}$$

Procesy zmiany konsystencji miodu, zachodzące powyżej 308 K, mają wpływ na jego dyfuzyjność cieplną [15]. Do temperatury około 308 K dyfuzyjność cieplna miodu płynnego zmniejsza się według wzoru [16]:

$$a = (36{,}17 - 8{,}93 \cdot 10^{-2} T) \cdot 10^{-8} \tag{5.43}$$

Po zakończeniu tych procesów współczynnik wyrównywania temperatury miodu płynnego wzrasta ze wzrostem temperatury [16]:

$$a = (-4{,}43 + 5{,}78 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^{-8} \tag{5.44}$$

Gęstość miodu maleje ze wzrostem wilgotności i temperatury. Gęstość miodu o wilgotności $m = 0{,}221$ maleje w przedziale temperatury 268 K ÷ 308 K zgodnie ze wzorem [4]:

$$\rho = 1251 - 0{,}40T \tag{5.45}$$

Związek między gęstością a wilgotnością miodu (T = 288 K, $m = 0{,}16 \div 0{,}25$) opisano w [9] wzorem:

$$\rho = 1551 - 680m \tag{5.46}$$

Literatura

[1] **Artecka E., Gogól E., Gogól W., Staniszewski B.** 1974: *Thermal conductivity measurements of food products by the heated thermocouple method*, Bulletin de l'Institut International du Froid, Annexe 1974- 3, 213-218.

[2] **ChoKyun R.** 1975: *Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials,* D. Riedel Publ. Comp., Boston.

[3] **Drouzas A.E.,Tassopoulos M.,Saravacos G.D.** 1986: *Thermal conductivity of gels.* W: Le Maguer M., Jelen P.: Food Engineering and Process Applications, Vol. 1, Transport Phenomena, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London, 141 –149.

[4] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1980: *Тепло-физические характеристики пищевых продуктов*, Справочник, Издание второе, дополненное и пере-работанное, Пищевая промышленность, Москва.

[5] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1990: *Теплофизические характеристики пищевых продуктов,* Справочник, Издание 3-е, дополненное и переработанное, В.О. „Агропромиздат" Москва.

[6] **Громов М.А.** 1979: *Теплофизические характеристики крахмала*, Сахарная промышленность, № 3, 48-51.

[7] **Gromow M.A., Niesteruk R.** 1987: *Właściwości cieplne miodu*, Przemysł Spożywczy, № 4-5, 128 –129.

[8] **Houška M.** red. 1994: *Milk, Milk Products and Semiproducts. Thermophysical and Rheological Properties of Foods*, Institute of Agricultural and Food Information, Prague, p. 168.

[9] **Helvey T.C.** 1954: *Study on Some Physical Properties of Honey*, Food Research, 19, 282 –292.

[10] **Кадыкова Н.С., Леончик Б.И., Сорокин А.И., Токарь Н.В.** 1984: *Некоторые физические и физико-химические свойства фруктозы*, Сахарная промышленность, № 1, 48 –49.

[11] **Карпов В.Д., Саруханов А.В.** 1987: *Теплофизические и физико-химические характеристики продуктов микробиологического синтеза*, Справочник, В.О. „Агропромиздат" Москва.

[12] **Кименов Г., Узунов Й., Костов А.** 1984: *Експерыментално изследване на топлината на смесване на водо – сахарни и водо – глюкозни растворы.* Висш институт по хранителна и вкусова промышленост. Пловдив, Научни трудове, том. XXXI, св II, 285 –290.

[13] **Keppeler R.A., Hall C.A.** 1968: *Determining Thermal Constants of Crystallizing Solutions,* Food Technology, Vol. 22, 784 –787.

[14] **Müller C.F.** 1960: *Enthalpie–Koncentrations-Diagramm für Kartofellstärke*, Kältetechnik, № 12, 8 –19.

[15] **Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A.** 1991: *Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych*, Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

[16] **Niesteruk R.** 1992: *Właściwości termofizyczne wybranych produktów pszczelarskich*, Szkoła Letnia PAN „Fizyczne właściwości surowców i produktów spożywczych oraz ich wpływ na pracę maszyn i przebieg procesów technologicznych", Akademia Rolnicza, Wydział Techniki Rolniczej, Lublin.

[17] **Попов В.Д., Терентьев Ю.А., Гончаренко Б.Н.** 1966.: Теплофизические свойства кристалла сахара, Известия вузов, Пищевая технология, № 1, 127–129.

[18] **Rahman S.** 1995: *Food Properties Handbook*. CRC Press. Boca Raton, New York, London, Tokyo, 255–297.

[19] **Riedel L.** 1977: Enthalpiemessungen von Lebensmitteln. Chemie, Mikrobiologie und Lebensmitteln, Vol. 5, № 4 , 118 –127.

[20] **Синат-Радченко Д.Е., Кожанов О.Ю.** 1983: *Теплофизические свойства кристалла сахарозы, Пищевая промышленность*, Республиканский межведомственный научно-технический сборник, Киев, № 29, 20 –22.

[21] **Wang J – J, Hayakawa K – i**, 1983: *Thermal Conductivities of Starch Gels at High Temperatures Influenced by Moisture*, Journal of Food Science,Vol. 58, № 4, 884–887.

6. HERBATA, KAWA, KAKAO, CZEKOLADA, CHAŁWA, WYROBY CUKIERNICZE

6.1. Herbata

Ciepło właściwe suchej substancji herbaty zielonej jest funkcją temperatury [11]. W przedziale $T = 200$ K ÷ 320 K funkcja ma następującą postać:

$$c = 7{,}552\,T - 750\,. \tag{6.1}$$

Wartość ciepła właściwego suchej substancji herbaty w T = 293 K, obliczona z tego wzoru, równa się 1462 J/kg·K, z reguły Koppa-Neumanna – 1379 J/kg·K, a z reguły addytywności – 1555 J/kg·K [3].

Ciepło właściwe surowej herbaty zielonej o wilgotności m = 0,789 w przedziale temperatury 80 K ÷ 320 K zmienia się nastepująco:

$$c = 8{,}79\,T - 203. \tag{6.2}$$

Zależność $c = c\,(T)$ czarnej herbaty (m = 0,078) w zakresie temperatury 234 K ÷ 304 K opisana jest równaniem [16]:

$$c = 5{,}71\,T - 287\,. \tag{6.3}$$

Funkcja $c = c\,(T)$ herbaty rozpuszczalnej (n = 0,90÷ 0,92) ma postać [6]:

$$c = 5{,}00\,T - 65{,}0\,. \tag{6.4}$$

Wzór (6.4) jest ważny w przedziale temperatury 283 K ÷ 353 K.

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy liści herbaty zależy od gęstości nasypowej (porowatości). Zmianę współczynnika przewodzenia ciepła warstwy

liści herbacianych w przedziale gęstości nasypowej 0 ÷ 600 kg/m^3 opisuje równanie:

$$\lambda = \frac{\lambda_{powietrza}}{1 - 0{,}0575\rho_n \cdot \lambda_{powietrza}}. \tag{6.5}$$

Powyższy przedział gęstości nasypowej odpowiada warunkom przechowywania herbaty w przemyśle przetwórczym. Jednakże nie jest to wzór dokładny [6] , gdyż nie uwzględnia wpływu temperatury i wilgotności.

Przewodność cieplną surowych liści herbaty (o wilgotności m = 0,74) w zależności od gęstości nasypowej (450 ÷ 700 kg/m^3) [3] charakteryzuje wzór:

$$\lambda = 8{,}099 \cdot 10^{-12} \rho_n^{3{,}72}. \tag{6.6}$$

Współczynnik wyrównywania temperatury, podobnie jak współczynnik przewodzenia ciepła, zależy od gęstości nasypowej. Wzrost gęstości nasypowej od 450 do 700 kg/m^3 powoduje zmianę współczynnika wyrównywania temperatury od $4{,}39 \cdot 10^{-8}$ m^2/s do $12{,}50 \cdot 10^{-8}$ m^2/s [3].

Gęstość rozpuszczalnej herbaty zielonej równa się 1210 kg/m^3, gęstość nasypowa 194 kg/m^3. Gęstość herbaty prasowanej waha się od 860 do 1200 kg/m^3.

6.2. Kawa

Badanie kalorymetryczne [7,8,16] surowych ziaren kawy wykazało istnienie dwóch lokalnych maksimów na krzywej $c = c\ (T)$. Wartość maksymalna ciepła właściwego ziarna kawy gatunku Ghana w T = 333 K wynosi 2250 J/kg·K, a w T = 403 K – 3900 J/kg·K [8]. Pierwsze maksimum dotyczy przemian fazowych składników ziarna – topnienia tłuszczów i wydzielania lotnych związków aromatycznych. Drugie maksimum ma związek z parowaniem wody. Ciepło właściwe ziarna kawy zwiększa się wskutek wzrostu wilgotności i temperatury [8,18]. Na podstawie wyników pracy [18] zmianę ciepła właściwego ziaren kawy gatunku Robusta w przedziale wilgotności 0 ÷ 0,375 i w temperaturze T = 293 K opisano wzorem:

$$c = 1584\, m + 2999. \tag{6.7}$$

Zmianę wartości rzeczywistej ciepła właściwego ziarna kawy gatunku Arabica o wilgotności m = 0,12, i w przedziale temperatury 293 K ÷ 413 K (na podstawie danych z [8]) ilustruje równanie:

$$c = 4{,}24\, T + 201{,}5. \tag{6.8}$$

Równanie ciepła właściwego substancji suchej kawy mielonej w przedziale temperatury 283 K ÷ 313 K ma postać [2]:

$$c = 3{,}00\, T + 276. \tag{6.9}$$

Ciepło właściwe kawy mielonej (m = 0,046 ÷ 0,089) rośnie liniowo w zakresie temperatury 318 K ÷ 423 K [17]:

$$c = 7{,}55\, T - 1142, \tag{6.10}$$

$$c = 6{,}46\, T - 491. \tag{6.11}$$

Wzór (6.10) opisuje zmianę ciepła właściwego kawy meksykańskiej, natomiast wzór (6.11) – kawy kolumbijskiej.Wartości ciepła właściwego kawy w T = 303 K zawiera tablica 6.1 [13].

Tablica 6.1.

Ciepło właściwe kawy

Gatunek	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]
Ziarno mielone gat. Arabica z Meksyku	0,075	1850
Ziarno mielone gat. Robusta z Togo	0,045	1460
Ziarno palone:		
słabo,	0,026	1460
średnio,	0,024	1420
mocno	0,022	1420
Proszek kawy rozpuszczalnej	0,045	1340

Zdolność przewodzenia ciepła ziarna kawy zwiększa się ze wzrostem wilgotności. W jej przedziale m od 0 do 0,375 współczynnik przewodzenia ciepła ziaren kawy gatunku Robusta zmienia się według wzoru [9]:

$$\lambda = 0{,}364m + 0{,}346. \tag{6.12}$$

W procesie palenia kawy następuje zmniejszenie jej wilgotności. Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy świeżego proszku kawy kolumbijskiej o wilgotności $m = 0{,}0867$ równa się 0,136 W/m·K. Natomiast współczynnik przewodzenia ciepła proszku kawy palonej przez 13,5 min. zmniejszył się do 0,117 W/ m·K a jego wilgotność zmalała do $m = 0{,}0494$.

Przewodność cieplna ziarna kawy zwiększa się ze wzrostem temperatury. Współczynnik przewodzenia ciepła kawy gatunku Arabica o wilgotności $m = 0{,}12$, gęstości 1450 kg/m^3 i w przedziale temperatury 293 K ÷ 413 K opisany jest wzorem:

$$\lambda = 3{,}38 \cdot 10^{-3} T - 0{,}773 . \tag{6.13}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy ziaren kawy o wilgotności $m = 0{,}128$ i gęstości nasypowej $\rho_n = 694$ kg/m^3, w zakresie temperatury 311 K ÷ 355 K zmienia się w następujący sposób:

$$\lambda = (0{,}436T - 2{,}17) \cdot 10^{-3} . \tag{6.14}$$

Przemiany fazowe zachodzące w ziarnach kawy wpływają także na przewodność cieplną.

Tablica 6.2.

Ekwiwalentna i rzeczywista przewodność cieplna kawy Arabica

T	293	313	333	353	373	393	413
$\lambda_{ek.}$ [W/m·K]	0,383	0,416	0,452	0,520	0,610	0,710	0,840
$\lambda_{rz.}$ [W/m·K]	0,383	0,416	0,452	0,476	0,480	0,491	0,492

Pod ich wpływem zmienia się wartość ekwiwalentna współczynnika przewodzenia ciepła. Natomiast jego wartość rzeczywista wzrasta liniowo ze wzrostem temperatury (tablica 6.2). Wpływ wilgotności, temperatury i gęstości nasypowej na współczynnik przewodzenia ciepła mielonej kawy liofilizowanej ilustrują równania [10]:

$$\lambda = 0{,}0715m + 0{,}00438 , \; 0{,}016 < m < 0{,}070, \; T = 283 \text{ K}, \; \rho_n = 235 \text{ kg/m}^3 ; \tag{6.15}$$

$$\lambda = 0{,}000124T + 0{,}0102 , \; m = 0{,}025, \; 298 \text{ K} < T < 313 \text{ K}, \; \rho_n = 240 \text{ kg/m}^3 ; \tag{6.16}$$

$$\lambda = 0{,}039 + 1{,}13 \cdot 10^{-4} \rho_n , \; m = 0{,}025, \; T = 313 \text{ K}, \; \rho_n = 200 - 310 \text{ kg/m}^3 . \tag{6.17}$$

Wzrost wilgotności ziarna kawy gatunku Robusta od 0 do 0,375 powoduje zmianę współczynnika wyrównywania temperatury [18] zgodnie z zależnością:

$$a = (1{,}87 + 2{,}37m) \cdot 10^{-7} \tag{6.18}$$

Ze wzrostem temperatury współczynnik wyrównywania temperatury kawy maleje, osiągając (tablica 6.3) wartość minimalną $1{,}34 \cdot 10^{-7}$ m^2/s w temperaturze T = = 403 K, co odpowiada maksymalnej wartości ciepła właściwego. Natomiast wartość rzeczywista współczynnika wyrównywania temperatury zmniejsza się liniowo z rosnącą wartością temperatury.

Tabela 6.3.

Efektywny i rzeczywisty współczynnik wyrównywania temperatury kawy Arabica [8]

Temperatura	293	313	333	353	373	393	403	413
$a_{ef.} \cdot 10^7$ [m^2/s]	1,90	1,89	1,78	1,84	1,65	1,40	1,34	1,50
$a_{rz.} \cdot 10^7$ [m^2/s]	1,90	1,89	1,88	1,86	1,84	1,82	1,81	1,80

Proces palenia przyczynia się do zwiększenia dyfuzyjności cieplnej proszku kawy. Świeży proszek kawy kolumbijskiej ma współczynnik wyrównywania temperatury $a = 6{,}16 \cdot 10^{-8}$ m^2/s. Współczynnik wyrównywania temperatury kawy palonej 13,5 min. zwiększył się do $a = 10{,}61 \cdot 10^{-8}$ m^2/s.

Współczynnik wyrównywania temperatury proszku kawy liofilizowanej o gęstości nasypowej $\rho_n = 240$ kg/m^3, w przedziale temperatury 273 K < T < 333 K, zmieniał się według wzoru:

$$a = (0{,}004T + 1{,}174) \cdot 10^{-7} . \tag{6.19}$$

Gęstość i gęstość nasypową ziaren kawy zawiera tablica 6.4. Gęstość kawy w proszku wzrasta liniowo ze wzrostem wilgotności [17]:
– dla kawy meksykańskiej:

$$\rho = 5100m + 872 ; \tag{6.20}$$

– dla kawy kolumbijskiej:

$$\rho = 6280m + 762\,. \tag{6.21}$$

Tabela 6.4.

Gęstość i gęstość nasypowa kawy

Rodzaj kawy	Gęstość ρ [kg/m^3]	Gęstość nasypowa ρ_n [kg/m^3]	Literatura
Arabica	1222		[6]
	1450		[8]
brazylijska:			[62]
surowa,		570	
palona		340	
etiopska:			[17]
surowa,		680	
palona		380	
kolumbijska w proszku:			
surowa,	1355		
palona	1092		
meksykańska w proszku:			
surowa,	1361		
palona	1162		
Robusta	1250		[6]
		500–620	[18]
Rozpuszczalna	1470	310	[6]

6.3. Kakao

Zmianę wartości rzeczywistej i ekwiwalentnej ciepła właściwego ziarna kakao gatunku Ghana o wilgotności m = 0,0575, w zależności od temperatury zawiera tablica 6.5 [2].

Tablica 6.5.

Ciepło właściwe kakao

T[K]	293	301	303	323	343	353	363	373	383	393	403	433
c_{rz}	1730	–	–	2095	–	2030	–	–	1760	–	–	–
c_{ek}	1730	5500	4230	2062	2240	2340	2660	3110	3370	3390	3280	2820

Z tablicy 6.5 wynika, że wartość rzeczywista ciepła właściwego ziaren kakao w małym stopniu zależy od temperatury. Ciepło właściwe ziarna rośnie przy wzroście wilgotności, np. w temperaturze 293 K ciepło właściwe ziarna o wilgotności m = 0,0295 równa się 1641 J/kg·K, a ziarna o wilgotności m = 0,0635 – odpowiednio 1716 J/kg·K [6,7].

Podczas nagrzewania w ziarnach kakao zachodzą reakcje chemiczne i przekształcenia polimorficzne rozpadu węglowodanów i aminokwasów oraz odparowanie wody, mające wpływ [6] na wartość efektywną ciepła właściwego. Z tablicy widać, że w przedziale temperatury 293 K ÷ 301 K ciepło właściwe szybko rośnie, osiągając wartość maksymalną 5500 J/kg·K (w T = 301 K) a następnie maleje. Przy dalszym ogrzewaniu, od około 328 K do 373 K ÷ 393 K, zachodzi stopniowe odparowanie wody zawartej w ziarnie i następuje ponownie powolny wzrost ciepła właściwego do 3390 J/kg·K (w T = 393 K). Ginzburg i Gromow [6] polecają następujący wzór na ciepło właściwe ziarna kawy dla przedziału temperatury 293 K ÷ 393 K:

$$c = 4187\,m + (262 + 4{,}43\,T)\,n. \tag{6.22}$$

Ze wzrostem temperatury ziarna kakao (od 293 K do 383 K) maleją ich współczynniki przewodzenia ciepła i wyrównywania temperatury. Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy ziaren kakao zmniejszył się od 0,105 W/m·K do 0,093 W/m·K [6], natomiast współczynnik wyrównywania temperatury od $8{,}19\cdot10^{-8}$ m^2/s do $7{,}50\cdot10^{-8}$ m^2/s. Współczynnik przewodzenia ciepła pojedynczego ziarna kakao wynosi 0,349 W/m·K [6].

Gęstość ziarna kakao wynosi 1010 kg/m^3, gęstość nasypowa w zależności od kształtu, wymiarów i sposobu ułożenia zmienia się od 500 do 700 kg/m^3.

Ciepło właściwe kakao w proszku (m = 0,064; f = 0,179; ρ_n = 600 kg/m^3) rośnie ze wzrostem temperatury [13]. W przedziale temperatury 273 K ÷ 293 K zmianę ciepła właściwego opisuje równanie:

$$c = 0{,}38\,T + 1409\,. \tag{6.23}$$

W zakresie temperatury 299 K ÷ 306 K w kakao zachodzi topnienie tłuszczu. Procesowi topnienia odpowiada szybki wzrost („pik„) ciepła właściwego, maksymalna wartość równa się $c_{\max.}$ = 7470 J/kg·K dla T = 303 K [13]. Natomiast po jego zakończeniu ciepło właściwe zmienia się liniowo według wzoru:

$$c = 9{,}09\,T - 1209\,. \tag{6.24}$$

Przewodność i dyfuzyjność cieplna kakao w proszku, w przedziale temperatury 273 K ÷ 370 K, zmienia się stosownie do równań:

$$\lambda = 1{,}19 \cdot 10^{-3} T - 0{,}253, \tag{6.25}$$

$$a = (0{,}304T - 5{,}945) \cdot 10^{-9}. \tag{6.26}$$

6.4. Czekolada i wyroby czekoladowe

Ciepło właściwe czekolady zmienia się ze wzrostem temperatury [2, 3, 6, 7, 11, 16]. Podobnie jak dla kakao, przemiana fazowa (topnienie tłuszczów), zachodząca w przedziale temperatury 299 K ÷ 301 K [14] lub 299 K ÷ 303 K [1], powoduje lokalny przyrost wartości ciepła właściwego do około 7200 J/kg·K. Wzory opisujące zależność ciepła właściwego czekolady od temperatury zawiera tablica 6.6.

Ciepło właściwe kremu czekoladowego (ρ_n = 1260 kg/m^3; m = 0,156, f = = 0,350) [6], w zakresie temperatury 273K ÷ 370 K, wyrażone jest wzorem:

$$c = 16{,}52\, T - 3490. \tag{6.27}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła czekolady wzrasta [6,13] ze wzrostem temperatury. Według pracy [13] zmianę współczynnika przewodzenia ciepła czekolady deserowej, pełnomlecznej „Finezja" i kremu czekoladowego opisują odpowiednio równania:

$$\lambda = 2{,}76 \cdot 10^{-3} T - 0{,}536, \tag{6.28}$$

$$\lambda = 0{,}98 \cdot 10^{-3} T - 0{,}055, \tag{6.29}$$

$$\lambda = 0{,}81 \cdot 10^{-3} T - 0{,}0081. \tag{6.30}$$

Wzory obowiązują w przedziale temperatury 273 K ÷ 370 K.

Współczynnik wyrównywania temperatury pełnomlecznej czekolady deserowej i kremu czekoladowego zwiększa się w przedziale temperatury 273 K ÷ 370 K [13]:

$$a = (0{,}367T + 1{,}61) \cdot 10^{-9}, \tag{6.31}$$

$$a = (0{,}368T - 1{,}26) \cdot 10^{-9}. \tag{6.32}$$

Tablica 6.6.

Ciepło właściwe czekolady

Rodzaj czekolady	Przedział temperatury	Gęstość ρ [kg/m^3]	Wilgotność m	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Numer wzoru	Literatura
deserowa	310÷373	1270	0,011	$c = 14{,}8\,T - 3020$	(6.33)	[13]
gorzka	233÷333			$c = 4{,}97\,T - 110{,}80$	(6.34)	[6]
mleczna				$c = 5{,}41\,T - 64{,}40$	(6.35)	
mleczna „Finezja"	310÷ 373	1213	0,022	$c = 8{,}90\,T - 1137$	(6.36)	[13]
czekolada	278÷298			1256		[1]
	305÷312			2344		
czekolada	$T > T_k$		0,005	2100		[5,16]
	$T < T_k$			1160		
Polewa czekoladowa	$T > T_k$		0,55	2300		[14]
	$T < T_k$			1260		
	$T > T_k$			2637		[12]
	$T > T_k$			2180		[16]
	$T < T_k$			1140		

6.5. Chałwa

Ciepło właściwe i przewodność cieplna chałwy są funkcją temperatury [13]:

$$c = 9{,}28T - 724, \tag{6.37}$$

$$\lambda = 1{,}14 \cdot 10^{-3} T - 0{,}154. \tag{6.38}$$

Wzory są ważne dla przedziału temperatury 273 K ÷ 370 K.

Współczynnik wyrównywania temperatury chałwy w wyżej podanym zakresie temperatury maleje zgodnie z zależnością:

$$a = 17{,}92 \cdot 10^{-8} - 2{,}66 \cdot 10^{-10} T. \tag{6.39}$$

Gęstość chałwy równa się 988 kg/m^3, wilgotność m = 0,049, zawartość tłuszczu f = 0,49.

6.6. Składniki do produkcji cukierków

Właściwości termofizyczne składników do produkcji cukierniczej zależą przede wszystkim od temperatury. Również zawartość cukru w syropie wpływa na ciepło właściwe i współczynnik przewodzenia ciepła.

Ciepło właściwe masy karmelowej w zależności od tych parametrów wyrażone jest wzorem [6]:

$$c = 3575 - 2705\,s + 2{,}09\,T. \tag{6.40}$$

Równanie jest spełnione dla 293 K < T < 353 K i 0,10 < s < 0,98.

Przewodność cieplna masy karmelowej w przedziale temperatury 293 K < T < < 353 K i s > 0,80 zmienia się w następujący sposób [6]:

$$\lambda = 0{,}59 - 0{,}17s - 5{,}8 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{6.41}$$

Przewodność cieplną masy karmelowej o wilgotności m = 0,025 w przedziale temperatury 288 K ÷ 368 K opisuje równanie [6]:

$$\lambda = 0{,}149 + 5{,}18 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{6.42}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła masy do produkcji irysów (m = 0,06; 298 K < < T < 368 K) równa się [4]:

$$\lambda = 0{,}29T - 79{,}4\,. \tag{6.43}$$

Dyfuzyjność cieplną wyżej wymienionych mas do produkcji karmelków i irysów charakteryzują równania:

$$a = (2{,}78 - 5{,}50 \cdot 10^{-3} T) \cdot 10^{-7}, \tag{6.44}$$

$$a = (2{,}22 + 3{,}2 \cdot 10^{-3} T) \cdot 10^{-7}\,. \tag{6.45}$$

Gęstość karmelków miętowych równa się 1550 kg/m^3, karmelków z nadzieniem owocowym – 1430 kg/m^3.

Literatura

[1] **Adam M., Balcar V., Oktábec Z.** 1964: *Některé tepelně fyzikalní vlastností potravin*, Přiloha časopisu, Průmysl potravin, Praha.

[2] **Агроскин А.А., Гончаров Е.И., Клешко Г.М.** 1973: *Теплофизические свойства какао бобов, какао тертого и какао масла*, Хлебопекарная промышленность, № 7, 17–19.

[3] **Бибилейшвили В.И., Скверчак В.Д., Гавчлиани В.В, Панин А.С.** 1982.: *Теплофизические характеристики слоя чайного листа*, Известия вузов, Пищевая технология, № 4, 84–88.

[4] **Данилова Г.Н., Бельский В.К., Богданов С.Н.** 1960: *Термические константы некоторых видов сырья и полуфабрикатов кондитерской промышленности*, Хлебопекарная и кондитерская промышленнность, № 4, 9–13.

[5] **George R.M., Holdsworth S.D.** 1990: *A Literature Survey of Heat Capacity of Food Products*, Campden Food and Drink Research Association, Technical Bulletin, № 76, 7–9.

[6] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1990: *Теплофизические характеристики пищевых продуктов*, Справочник,Издание 3-е, дополненное и переработанное, В.О. „Агропромиздат", 228–231.

[7] **Гончаров Е.И., Гончаров Ю.Е.** 1981: *Теплоемкость жиросодержащих ядер*, Хлебопекарная и кондитерская проьышленность, № 11, 32–34.

[8] **Гончаров Е.И., Гончаров Ю.Е.** 1984: *Теплофизические характеристики сырых зерен кофе*, Известия вузов, Пищевая технология, № 6, 83–86.

[9] **Kostaropoulos A.E., Spiess W.E.L., Wolf W.** 1975: *Anhaltswerte für die Temperturleitfähigkeit von Lebensmitteln*, Lebensmittel + Wissenschaft + Technologie, № 3, 108 –110.

[10] **Kostaropoulos A.E.,** 1975*: Die Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen gefriertrockneter Lebensmittel*, Lebensmittel + Wissenschaft + Technologie, № 5, 202–206.

[11] **Латышев В.П., Лебедев В.Ф., Медунов В.А.** 1976: *Калориметрическое исследование зеленого чайного листа*, Холодильная техника, № 10, 38–40.

[12] **Moshenin N.N.** 1980: *Thermal Properties of Food and Agricultural Materials*. Gordon and Beach Publishers, New York, 307.

[13] **Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A.** 1991: *Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych.* Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, Politechnika Białostocka,Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Białystok, 84–95.

[14] **Polley S.L., Snyder O.P.,Kotnour P.** 1980: *A Compilation of Thermal Properties of Foods*, Food Technology – November , 76–94.

[15] **Raemy A., Lambelet P.** 1982: *A calorimetric study of self- heating in coffe and chicory,* Journal of Food Technology, 17, 451–460.

[16] **Riedel L.** 1977: *Enthalpiemessungen an Lebensmitteln*, Chemie. Mikrobiologie und Technologie Lebensmitteln, 5, 118–127.

[17] **Singh P.C., Singh R.K., Bhamidipati S., Singh S.N., Barone P.** 1997: *Thermophysical Properties of Fresh and Roasted Coffe Powders*, Journal of Food Process Engineering, 20, 31–50.

[18] **Загоруйко В.А., Ковальчук В.И., Кривошеев Ю.И.** 1975: *Теплофизические характеристики кофе*, Известия вузов, Пищевая технология, № 3, 126–129.

7. DROŻDŻE

W odróżnieniu od mięsa, chleba i innych podobnych produktów spożywczych, drożdże są substancją żywą. Ten fakt ma swoje odzwierciedlenie w przebiegu zależności temperaturowej ich ciepła właściwego. Badania Riedela [3] wykazały, że zależność $c = c\,(T)$ drożdży świeżych jest różna od przebiegu $c = c\,(T)$ dla drożdży powtórnie ogrzewanych. Krzywa dla drożdży świeżych, w przedziale temperatury 293 K ÷ 303 K, ma wyraźną anomalię („pik"), charakterystyczną dla reakcji egzotermicznej. Reakcja przebiega szczególnie intensywnie w temperaturze około 303 K. Anomalii nie zaobserwowano natomiast dla drożdży poprzednio ogrzanych do temperatury wyższej od 330 K, których enzymy zostały zniszczone, a białka uległy denaturacji [3].

Ciepło właściwe suchej substancji drożdży w przedziale 213 K ÷ 293 K wyrażone jest równaniem [2]:

$$c = 4{,}60\,T - 16{,}7\,. \tag{7.1}$$

Natomiast w wyższej temperaturze (298 K÷ 353 K) ciepło właściwe suchej substancji drożdży zmienia się zgodnie z wzorem [3]:

$$c = 3{,}82\,T + 189\,. \tag{7.2}$$

Ciepło właściwe drożdży zależy od wilgotności i temperatury. Temperatura ma mniejszy wpływ na ciepło właściwe niż wilgotność [4]. Zależność ciepła właściwego drożdży od wilgotności dzieli się na dwa przedziały, uwarunkowane przemianami fizycznymi i chemicznymi substancji suchej w różnych przedziałach wilgotności [4]. Wartością graniczną jest $m = 0{,}54$ [4]. W pierwszym przedziale, tzn. dla $0{,}056 < m < 0{,}54$ ciepło właściwe drożdży zmienia się według wzoru [4]:

$$c = 1039 + 4500\frac{m}{1-m} + 5{,}3T\,. \tag{7.3}$$

Dla drugiego przedziału wilgotności ($0{,}55 < m < 0{,}75$) ciepło właściwe opisane jest wzorem:

$$c = 1230 + 2900\frac{m}{1-m} + 5{,}3T\,. \tag{7.4}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła zwiększa się pod wpływem wzrostu temperatury i wilgotności. W przedziale temperatury 288 K ÷ 328 K i wilgotności $0{,}23 < m < 0{,}54$ przewodność cieplna drożdży zmienia się zgodnie z następującą zależnością [2]:

$$\lambda = -0{,}015 + 0{,}12 \cdot \frac{m}{1-m} + 0{,}0007 \cdot T \tag{7.5}$$

W drugim przedziale wilgotności, tzn. $0{,}55 < m < 0{,}75$, współczynnik przewodzenia ciepła zmienia się natomiast w następujący sposób [2]:

$$\lambda = 0{,}0345 + 0{,}078\frac{m}{1-m} + 0{,}007T\,. \tag{7.6}$$

Zmianę wartości współczynnika wyrównywania temperatury drożdży w wyżej podanych przedziałach wilgotności i temperatury opisują równania:

$$a = (0{,}44 + 0{,}22\frac{m}{1-m} + 0{,}00073T) \cdot 10^{-7}, \tag{7.7}$$

$$a = (0{,}58 + 0{,}115\frac{m}{1-m} + 0{,}00073T) \cdot 10^{-7}\,. \tag{7.8}$$

Dyfuzyjność cieplna koncentratu drożdży o zawartości suchej substancji $0{,}0125 < n < 0{,}1625$ i w przedziale temperatury $275\ \mathrm{K} < T < 295\ \mathrm{K}$ jest równa:

$$a = (0{,}70 + 0{,}025T - 0{,}80n) \cdot 10^{-7}\,. \tag{7.9}$$

Gęstość drożdży o wilgotności $0{,}50 < m < 0{,}75$ w temperaturze 293 K zmienia się w następujący sposób:

$$\rho = 1113 - 14{,}5\frac{m}{1-m}\,. \tag{7.10}$$

Literatura

[1] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1980: *Теплофизические характеристики пищевых продуктов,* Справочник, Издание второе, дополненное и переработанное, Москва, 237.

[2] **Карпов А.М., Саруханов А.В.** 1987: *Теплофизические и физико-химические характеристики продуктов микробиологического синтеза*, ВО „Агропромиздат" Москва, 203–206.

[3] **Riedel L.** 1968: *Kalorimetrische Untersuchungen an Backhefe*, Kältetechnik, Heft 20, № 9, 291–293.

[4] **Шишацкий Ю.И., Волобуева Л.Н., Бочарова Г.А.** 1976: *Теплофизические характеристики хлебопекарных дрожжей,* Хлебопекарная и кондитерская промышленность, № 6, 37 –38.

8. SÓL KUCHENNA

Kryształ soli kuchennej charakteryzuje się [2] następującymi właściwościami termofizycznymi: c = 800 ÷ 880 J/kg·K, $\lambda = 9{,}92$ W/m·K, $\rho = 2160$ kg/m^3, $a = 5{,}468 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.

Ciepło właściwe soli zwiększa się pod wpływem wilgotności. Wartość ciepła właściwego soli o wilgotności m = 0,02 równa się 921 J/kg·K i wzrasta do 1100 J/kg·K dla wilgotności m = 0,08. W pracy [4] podano następujące wartości ciepła właściwego soli: c = 1130 ÷1340 J/kg·K dla temperatury wyższej od 273,15 K.

Ciepło właściwe wodnych roztworów soli (solanek) wzrasta ze wzrostem temperatury. Ciepło właściwe 10% roztworu soli, w przedziale temperatury 283 K ÷ 323 K, zmienia się zgodnie z równaniem:

$$c = 0{,}92\,T + 3433. \tag{8.1}$$

Zmianę ciepła właściwego 20% roztworu soli kuchennej w tym samym przedziale temperatury ilustruje zależność [1]:

$$c = 0{,}72\,T + 3393. \tag{8.2}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła wodnych roztworów soli zmniejsza się ze wzrostem ich koncentracji (z). Ilustracją są następujące równania:

$$\lambda = 0{,}581 - 0{,}18z, \quad \text{dla } z = 0{,}001 - 0{,}25 \text{ i } T = 273{,}15 \text{ K [4]}; \tag{8.3}$$

$$\lambda = 0{,}0013T + 0{,}21, \text{ dla } m = 0{,}20 \text{ i } 283 \text{ K} < T < 353 \text{ K [1]}. \tag{8.4}$$

W przedziale temperatury 253 K < T < 293 K współczynnik przewodzenia ciepła wodnego roztworu soli (z = 0,235) zmienia się według równania [6]:

$$\lambda = 0{,}0014T + 0{,}164. \tag{8.5}$$

Dyfuzyjność cieplna wodnych roztworów soli o wilgotności m = 0,20 i w przedziale temperatury 283 K ÷ 353 K [1] zmienia się zgodnie z wzorem:

$$a = (0{,}437 + 0{,}0033T) \cdot 10^{-7}. \tag{8.6}$$

Gęstość kryształu soli równa się 2160 kg/m^3. Gęstość suchej soli zależy od jej postaci [4] i waha się od 1025 kg/m^3 – dla soli otrzymanej metodą próżniową, do1267 kg/m^3 – dla soli drobnomielonej.

Gęstość wodnych roztworów soli rośnie ze wzrostem koncentracji i obniżeniem temperatury [1]:

$$\rho = 1118 + 746z - 0{,}411T. \tag{8.7}$$

Natomiast według pracy [3] wpływ obu parametrów na gęstość solanki uwzględnia równanie [3]:

$$\rho = 1000 + 689\,z\,(2{,}446 - 0{,}0053\,T). \tag{8.8}$$

Literatura

[1] **Choi Y., Okos M.R.** 1983: *Thermal Properties of Liquid Foods – Review*, American Society of Agricultural Engineers, Paper № 83 – 6516 ,18–36.

[2] **Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovská G.I.** 1985: *Termofyzikální vlastnosti potravinářských výrobků*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1985, 257–262.

[3] **Levy F.L.** 1982: *The Thermal Conductivity of commercial Brines and Seawater in the Freezing Range*, Internationale Journal of Refrigeration, Vol. 5, № 3, May 1982, 155–159.

[4] **Lewin D.N.** 1962: *Plant Handbook Data*, Food Engineering, March 1962, 89–104.

[5] **Quashou M.S., Vachon R.I., Touloukian Y.S.** 1972: *Thermal Properites of Foods*, Transactions of the ASHRAE, Vol. 15, № 2, 165–183.

[6] **Riedel L.** 1950: *Wärmeleitfähigkeitsmessungen an kältetechnischen wichtigen Salzlösungen*, Kältetechnik, Heft 4, 99–101.

9. NAPOJE ALKOHOLOWE

9.1. Spirytus etylowy

Ciepło właściwe spirytusu etylowego w przedziale temperatury 273 K÷ 423 K opisane jest wzorem [1]:

$$c = 13{,}72\,T - 1649\,. \tag{9.1}$$

W literaturze nie spotyka się wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej spirytusu z powodu występowania konwekcyjnej wymiany ciepła. Ginzburg [1] poleca obliczać współczynniki przewodzenia ciepła i wyrównywania temperatury spirytusu z uniwersalnego równania Wargaftika (s. 20), w którym wartości stałych B i α są następujące: $B = 0{,}273 \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 1{,}29 = \text{const}$. Po ich wprowadzeniu do równania otrzymuje się:

$$\lambda = 2{,}116 \cdot 10^{-4} \rho\,, \tag{9.2}$$

$$a = \frac{2{,}116}{c} \cdot 10^{-4}\,. \tag{9.3}$$

Równania mają zastosowanie w przedziale temperatury 273 K ÷ 353 K.

9.2. Wodne roztwory spirytusu

Ciepło właściwe wodnego roztworu spirytusu zależy od koncentracji E. Tablica 9.1. zawiera wzory na ciepło właściwe roztworów wodnych spirytusu [1].

Tablica 9.1.

Ciepło właściwe wodnego roztworu spirytusu

Koncentracja etanolu E	Ciepło właściwe c	Numer wzoru
0,1	$c = 18749 - 96{,}7\,T + 0{,}161\,T^2$	(9.4)
0,2	$c = 9955 - 37{,}34\,T + 0{,}063\,T^2$	(9.5)
0,3	$c = 3258 + 4{,}72\,T - 0{,}005\,T^2$	(9.6)
0,4	$c = -6848 + 69{,}38\,T - 0{,}11\,T^2$	(9.7)
0,5	$c = 14887 + 120{,}34\,T - 0{,}193\,T^2$	(9.8)
0,6	$c = -9118 + 78{,}42\,T - 0{,}120\,T^2$	(9.9)
0,7	$c = 2438 + 30{,}01\,T - 0{,}036\,T^2$	(9.10)
0,8	$c = -1858 + 8{,}58\,T$	(9.11)
0,9	$c = -2245 + 8{,}79\,T$	(9.12)

Współczynnik przewodzenia ciepła wodnych roztworów etanolu rośnie pod wpływem wzrostu temperatury. Wyższa koncentracja etanolu obniża natomiast współczynnik przewodzenia ciepła roztworu. Przewodność cieplną roztworu o koncentracji $E = 0{,}40$ i w przedziale temperatury 273 K ÷ 353 K wyraża wzór:

$$\lambda = 4{,}00 \cdot 10^{-4} T + 0{,}238\,. \tag{9.13}$$

Współczynnik przewodzenia ciepła roztworu o koncentracji $E = 1{,}0$ w tym samym przedziale temperatury ilustruje zależność:

$$\lambda = 0{,}240 - 2{,}50 \cdot 10^{-4} T\,. \tag{9.14}$$

Ze wzorów widać różny wpływ temperatury na przewodność cieplną roztworu spirytusu przy E = idem. Do $E = 0{,}80$ wpływ na współczynnik przewodzenia ciepła wodnego roztworu spirytusu ma stopień asocjacji [1]. Wartość współczynnika wzrasta z podwyższeniem temperatury. Przy $E > 0{,}80$ decydujący wpływ na przewodność cieplną ma gęstość. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła zmniejsza się ze wzrostem temperatury.

Gęstość roztworu wodnego spirytusu zmniejsza się ze wzrostem temperatury. Dla roztworów o koncentracji $E = 0{,}40$ i $0{,}95$ zależności $\rho = \rho(T)$ są następujące (dla $273\ \mathrm{K} < T < 353\ \mathrm{K}$):

$$\rho = 1160 - 0{,}769T, \tag{9.15}$$

$$\rho = 1093 - 0{,}980T. \tag{9.16}$$

9.3. Wino

Ciepło właściwe wina jest prawie niezależne od temperatury. W jej przedziale 273 K ÷ 333 K ciepło właściwe wina wytrawnego zmienia się od 3380 J/kg·K do 3789 J/kg·K, wina alkoholizowanego: 3680 ÷ 3726 J/kg·K, wina owocowego – 4095 J/ kg·K, Białego Muskatu – 3601÷ 3609 J/kg· K [1].

Ciepło właściwe wina czerwonego „Nemes Kadarka" w przedziale temperatury 275 K÷370 K wyrażone jest równaniem [2]:

$$c = 1{,}705\,T + 3211. \tag{9.17}$$

Wzrost temperatury zwiększa zdolność win do przewodzenia ciepła. Zmianę współczynnika przewodzenia ciepła win: Anana, Kagor, Portwein 13, Charte i Nemes Kadarka opisują wzory:

$$\lambda = 1{,}5 \cdot 10^{-3} T + 0{,}058, \tag{9.18}$$

$$\lambda = 1{,}5 \cdot 10^{-3} T + 0{,}031, \tag{9.19}$$

$$\lambda = 2.1 \cdot 10^{-3} T - 0{,}142, \tag{9.20}$$

$$\lambda = 2{,}0 \cdot 10^{-3} T - 0{,}249, \tag{9.21}$$

$$\lambda = 1{,}36 \cdot 10^{-3} T + 0{,}075. \tag{9.22}$$

Ginzburg i Gromow [1] zalecają obliczać przewodność i dyfuzyjność cieplną win w przedziale temperatury 293 K ÷ 353 K z uniwersalnego wzoru Wargaftika (s. 20). Wartości stałej B są następujące [1]: wino wytrawne – $B = 0{,}588 \cdot 10^{-3}$, alkoholizowane – $B = 0{,}453 \cdot 10^{-3}$, owocowe – $B = 0{,}464 \cdot 10^{-3}$. Dyfuzyjność cieplna wina Nemes Kadarka w przedziale temperatury 275 K÷370 K zmienia się zgodnie ze wzorem:

$$a = (0{,}0714T - 9{,}93) \cdot 10^{-8}. \tag{9.23}$$

Gęstość wina jest zależna od zawartości w nim alkoholu i temperatury. Ze wzrostem zawartości alkoholu wzrasta gęstość wina. Wino gatunku Riesling o zawartości alkoholu 0,09 ma gęstość 992 kg/m^3, natomiast gęstość wina o zawartości alkoholu 0,132 równa się 1046 kg/m^3 [1].

Literatura

[1] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.** 1980: *Тепло-физические характеристики пищевых продуктов*, Справочник, Издание второе, дополненное и переработанное, Пищевая промышленность, Москва, 248–254.

[2] **Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A.** 1991: *Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych.* Sprawozdanie z pracy naukowo- badawczej, Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Białystok.

10. MATERIAŁY OPAKOWANIOWE

Opakowanie utrudnia przepływ ciepła od powierzchni produktu do medium, co oznacza wydłużenie czasu jego obróbki termicznej, np. nagrzewania, zamrażania itp. Wydłużenie czasu obróbki wynika, w pierwszym rzędzie, nie z grubości materiału i wartości jego współczynnika przewodzenia ciepła, lecz z warstewki powietrza istniejącej między produktem i opakowaniem lub między jego poszczególnymi warstwami. Istniejące dane o właściwościach termofizycznych materiałów opakowaniowych są fragmentaryczne i najczęściej dotyczą ich przewodności cieplnej (tablica 10.1) w przedziale temperatury właściwym procesom chłodniczego utrwalania żywności.

Tablica 10.1.

Współczynnik przewodzenia ciepła i opór cieplny niektórych materiałów opakowaniowych

Materiał	Grubość δ [mm]	Przewodność cieplna λ [W/m·K]	Opór cieplny λ/δ [m^2·K/W]	Literatura
1	2	3	4	5
Aluminium (folia)	0,10	204	$4{,}9\cdot10^{-7}$	[2,4,5]
Miseczka aluminiowa	2,0	203	$9{,}8\cdot10^{-6}$	[2]
Celofan	0,28	0,100	0,00028	[2,3,4]
Celofan 4 warstwowy	0,12	0,100	0,0012	[2,3]
Celofan (folia)	0,146		0,00224	[3,4]
Karton: parafinowany, parafinowany-półpergamin, wyłożony folią aluminiową z woreczkiem celofanowym wewnątrz, parafinowany owinięty w celofan 4-warstwowy	0,27	0,075	0,0036	
			0,00506	[4]
	0,54	0,080	0,007	[2]
			0,0162	[4]
	0,737		0,0094	[4]
Papier do pakowania: pakowy, pergaminowy, woskowany, woskowany + karton.	0,10		0,00143	[2,4]
		0,07		[5]
	0,053	0,071	0,00075	[2]
			0,0052	[4]
			0,0155	[4]
Polietylen (folia)	0,004		0,000138	[4,5]
			0,0419-0,0628	[1]

cd. tablicy 10.1.

1	2	3	4	5
PCV (folia)	0,25	0,104	0,0025	[2,5]
Tektura falista	4	0,18	0,022	[2,4]
Warstwa powietrza między produktem i opakowaniem	0,0009	0,021	0,043	

Tablica 10.2 zawiera natomiast ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik wyrównywania temperatury niektórych materiałów opakowaniowych [1].

Tablica 10.2

Właściwości termofizyczne materiałów opakowaniowych

Materiał	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/m·K]	Ciepło właściwe c [J/kg·K]	Dyfuzyjność cieplna $a\cdot10^7$ [m^2/s]
Aluminium	202 ÷268	379 ÷1214	53670
Cyna	57,1 ÷ 62,3		
Szkło	1,1245	837	5,93
Nylon	0,242	1674	1,29
Polietylen wysokiej gęstości	0,484	2302	2,19
Polietylen małej gęstości	0,329	2302	1,55
Polipropylen	0,117	1925	0,67
Stal	36,3 ÷45	502	7280
Teflon	0,26	1046	1,18

Literatura

[1] **ChoKyun R.,** 1975: *Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials,* D. Riedel Publishers Company, 320–352.

[2] **Czapp M., Charun H.,** 1997: *Bilans cieplny pomieszczeń chłodni. Zasady opracowania*, Wydanie 3, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 35.

[3] **Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.,** 1980: *Тепло-физические характеристики пищевых продуктов*, Справочник, Издание 2-е, переработанное и дополненное, Пищевая технология, Москва, 258 –259.

[4] **Postolski J.,Gruda Z.,** 1985: *Zamrażanie żywności*, Wydanie drugie, zmienione. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne,Warszawa,101.

[5] **Szeffer A.P., Saatczan A.K., Konczakow G.D.,** 1977: *Intensyfikacja chłodzenia, zamrażania i rozmrażania mięsa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 147.