

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

ROZPRAWY NAUKOWE Nr 33

Roman Niesteruk

WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNE ŻYWNOSCI

Część 1

BIAŁYSTOK 1996

WYDAWNICTWA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ

SPIS TREŚCI

Recenzenci:

doc.dr hab.inż. Bohdan Krajewski
doc.dr hab.inż. Marian Trela

<i>Opracowanie redakcyjne</i>	Jadwiga Żukowska
<i>Skład komputerowy</i>	Anna Czernicka
<i>Prace korektorskie</i>	Tadeusz Romuald Malewicz
<i>Korekta</i>	Maria Antonia Łaniewska

ISSN 0867-096 X

Skład komputerowy w Dziale Wydawnictw Politechniki Białostockiej.
Drukowano w Zakładzie Poligrafii Politechniki Białostockiej. Nakład 100 egz. Format B-5.
Ark. wyd. 5,5. Ark. druk. 8,5. Oddano do druku w marcu 1996 r.
Druk ukończono w kwietniu 1996 r. Zam. 31/96

	Strona
Przedmowa	7
Wykaz stosowanych oznaczeń	9
 1. Definicje właściwości termofizycznych	 11
Literatura	15
 2. Mięso i produkty mięsne	 17
2.1. Ciepło właściwe mięsa	17
2.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa	22
2.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa	28
2.4. Gęstość mięsa	30
2.5. Ciepło właściwe farszów mięsnych	33
2.6. Współczynnik przewodzenia ciepła farszów mięsnych	33
2.7. Współczynnik wyrównywania temperatury farszów mięsnych	34
2.8. Gęstość farszów mięsnych	35
2.9. Ciepło właściwe podrobów	36
2.10. Współczynnik przewodzenia ciepła podrobów	36
2.11. Współczynnik wyrównywania temperatury podrobów	38
Literatura	38
 3. Ryby i inne produkty pochodzenia morskiego	 41
3.1. Ciepło właściwe mięsa ryb	41
3.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa ryb	45
3.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa ryb	49
3.4. Gęstość mięsa ryb	52
3.5. Właściwości termofizyczne ryb w blokach	53
3.6. Właściwości termofizyczne głowonogów	53
3.7. Właściwości termofizyczne mięczaków	55
3.8. Właściwości termofizyczne skorupiaków	56
Literatura	58

	Strona
4. Mleko i produkty mleczne (wraz z masłem)	62
4.1. Ciepło właściwe mleka	62
4.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mleka	63
4.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mleka	63
4.4. Gęstość mleka	64
4.5. Ciepło właściwe śmietany	65
4.6. Współczynnik przewodzenia ciepła śmietany	66
4.7. Współczynnik wyrównywania temperatury śmietany	66
4.8. Gęstość śmietany	67
4.9. Ciepło właściwe twarogu	67
4.10. Współczynnik przewodzenia ciepła twarogu	68
4.11. Współczynnik wyrównywania temperatury twarogu	69
4.12. Gęstość twarogu	69
4.13. Ciepło właściwe serów	69
4.14. Współczynnik przewodzenia ciepła serów	70
4.15. Współczynnik wyrównywania temperatury serów	71
4.16. Ciepło właściwe masła	72
4.17. Współczynnik przewodzenia ciepła masła	72
4.18. Współczynnik wyrównywania temperatury masła	72
4.19. Gęstość masła	73
4.20. Ciepło właściwe mleka w proszku	74
4.21. Współczynnik przewodzenia ciepła mleka w proszku	75
4.22. Współczynnik wyrównywania temperatury mleka w proszku	76
4.23. Gęstość mleka w proszku	77
4.24. Ciepło właściwe serwatki	78
4.25. Współczynnik przewodzenia ciepła serwatki	79
4.26. Współczynnik wyrównywania temperatury serwatki	80
4.27. Gęstość serwatki	80
4.28. Równania uniwersalne opisujące właściwości termofizyczne ciek- łych produktów mlecznych	81
Literatura	84

	Strona
5. Oleje, tłuszcze spożywcze, margaryna	88
5.1. Ciepło właściwe olejów jadalnych	88
5.2. Współczynnik przewodzenia ciepła olejów jadalnych	89
5.3. Współczynnik wyrównywania temperatury olejów jadalnych	92
5.4. Gęstość olejów jadalnych	93
5.5. Ciepło właściwe tłuszczów pochodzenia zwierzęcego	94
5.6. Współczynnik przewodzenia ciepła tłuszczów pochodzenia zwie- rzęcego	96
5.7. Współczynnik wyrównywania temperatury tłuszczów pochodzenia zwierzęcego	97
5.8. Gęstość tłuszczów pochodzenia zwierzęcego	98
5.9. Ciepło właściwe margaryny	98
5.10. Współczynnik przewodzenia ciepła margaryny	99
5.11. Współczynnik wyrównywania temperatury margaryny	100
5.12. Gęstość margaryny	100
Literatura	100
6. Warzywa i owoce	103
6.1. Warzywa cebulowe	103
6.2. Warzywa dyniowate	104
6.3. Warzywa kapustne	105
6.4. Warzywa liściowe	106
6.5. Warzywa psiankowe	107
6.5.1. Papryka	107
6.5.2. Pomidory	108
6.5.3. Ziemniaki	108
6.6. Warzywa rzepowate	111
6.6.1. Brukiew	111
6.6.2. Buraki	112
6.6.3. Marchew	115
6.6.4. Pasternak	117
6.6.5. Rzepa	118
6.6.6. Pietruszka	118
6.6.7. Rzodkiewka	119
6.6.8. Seler	120

6.7. Warzywa strączkowe	120
6.7.1. Bób	120
6.7.2. Fasola	121
6.7.3. Groch	122
6.8. Owoce ziarnkowe	123
6.8.1. Jabłka	123
6.8.2. Gruszki	126
6.9. Owoce pestkowe	127
6.9.1. Śliwy	127
6.9.2. Czereśnie	128
6.9.3. Wiśnie	128
6.9.4. Brzoskwinie	129
6.9.5. Morele	129
6.10. Owoce południowe	130
6.10.1. Cytryny	130
6.10.2. Grejpfruty	130
6.10.3. Pomarańcze i mandarynki	131
Literatura	132

Przedmowa

Projektowanie procesów technologicznych, konstruowanie maszyn i urządzeń przemysłu spożywczego jest utrudnione, a czasem wręcz niemożliwe, gdy nie są znane właściwości surowców, półfabrykatów i produktów spożywczych.

Zanim zbuduje się dziś maszynę czy aparat przetwórczy prowadzi się długotrwałe próby prototypów, po czym się te prototypy udoskonala wykorzystując coraz dokładniejsze metody obliczeniowe wsparte techniką komputerową.

Właściwości termofizyczne surowców spożywczych mają ścisły związek z jakością wytwarzanych produktów. Zmiany organoleptyczne, chemiczne i mikrobiologiczne przetwarzanego produktu winny być brane pod uwagę przy wyborze optymalnego rozkładu temperatury, wilgotności itp. wewnątrz surowca podczas całego cyklu przetwarzania. Dane o zmianach właściwości termofizycznych mogą stanowić podstawę do sterowania liniami technologicznymi przemysłu spożywczego.

W kraju nie ma publikacji, która byłaby zbiorem danych o właściwościach termofizycznych możliwie największej liczby surowców, półproduktów i produktów spożywczych czy też zbiorem danych o zmianach jakie wykazują one pod wpływem najważniejszych parametrów procesów przetwórczych.

Opublikowane w Wydawnictwie Politechniki Gdańskiej w 1983 roku „Tablice właściwości fizycznych surowców i produktów spożywczych” są potwierdzeniem powyższego stanu. Ze względu na upływający czas wymagają uzupełnień o najnowsze wyniki badań.

Klasyfikacja produktów spożywczych obejmuje najczęściej 14 grup. Niniejsza praca zawiera dane o właściwościach termofizycznych tylko 5 grup żywności. Są to:

- mięso i produkty mięsne,
- ryby i inne produkty spożywcze pochodzenia morskiego,
- mleko i jego produkty,
- tłuszcze spożywcze,
- owoce i warzywa.

Właściwości termofizyczne pozostałych grup produktów spożywczych będą zawarte w dalszych częściach pracy.

Pozostaje mi miły obowiązek serdecznego podziękowania wszystkim, którzy mi pomogli w napisaniu tej części pracy. Szczególne wyrazy podziękowania składam moim najbliższym współpracownikom, mgr inż. Leonowi Demianiu-kowi i technikowi Adamowi Kuryłowiczowi, za wszechstronną pomoc w budowie i kompletowaniu aparatury badawczej, wykonaniu pomiarów właściwości termofizycznych licznych produktów spożywczych a także za opracowanie rysunków.

Białystok, grudzień 1995

Autor

Wykaz stosowanych oznaczeń

- A* — powierzchnia, m^2 ,
- a* — współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna), $m^2 \cdot s^{-1}$,
- B* — stała w równaniu Predwoditelewa – Wargaftika,
- b* — stała w równaniu Phama i Willixa, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$,
- C* — stała w równaniu Phama i Willixa, $W \cdot m^{-1}$,
- c* — ciepło właściwe, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- D* — stała w równaniu Schwartzberga, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
- d* — stała w równaniu Phama i Willixa, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$,
- E* — stała w równaniu Raoulta (Cziżowa), $kJ \cdot kg^{-1}$,
- F* — stała w równaniu Raoulta (Cziżowa), $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K$,
- f* — zawartość tłuszczu w produkcie, ułamek wagowy,
- H* — entalpia, $J \cdot kg^{-1}$,
- k* — współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna), $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- L* — ciepło przemiany wody, $J \cdot kg^{-1}$,
- l* — zawartość lodu w zamrażanym produkcie, ułamek wagowy,
- m* — masa, kg,
- m* — zawartość wody w produkcie (wilgotność), ułamek wagowy,
- n* — zawartość suchej masy w produkcie, ułamek wagowy,
- n* — wykładnik potęgi w równaniu Schwartzberga,
- nf* — zawartość suchej masy beztłuszczowej w produkcie, ułamek wagowy,
- P* — ciśnienie, Pa,
- p* — zawartość białek (protein) w produkcie, ułamek wagowy,
- Q* — ilość ciepła, J,
- R* — współczynnik korekcji,
- r* — zawartość popiołu w produkcie, ułamek wagowy,
- S* — stała w równaniu Schwartzberga (podczas przemiany wody w lód), $kg \cdot m^{-3} K$ lub $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$,
- s* — zawartość cukrów w produkcie, ułamek wagowy,
- T* — temperatura, K,
- t* — temperatura, $^{\circ}C$,

U – energia wewnętrzna, J,
 V – objętość, m^3 ,
 w – udział wody nie wymrożonej w produkcji, ułamek wagowy,
 X – stała w równaniu Schwarzbarga, $kg \cdot m^{-3}$,
 x – kierunek normalny do powierzchni izotermicznej,
 α – współczynnik asocjacji molekuł wody,
 Δ – różnica (temperatur), K,
 δ – grubość, mm,
 ε – porowatość,
 ϕ – średnica,
 ξ – zawartość gazów w produkcji, g powietrza na kg wody lub %,
 ρ – gęstość, $kg \cdot m^{-3}$.

Indeksy

ef – efektywne,
 f – tłuszcz,
 g – koniec strefy intensywnego wymrażania wody w produkcji,
 k – krioskopowa,
 l – lód,
 m – woda,
 n – sucha masa,
 u – nasypowa (usypowa),
 p – białko,
 p – przy stałym ciśnieniu,
 r – popiół,
 rz – rzeczywiste,
 sw – początek zamrażania czystej wody,
 $„T”$ – w temperaturze T ,
 v – przy stałym ciśnieniu,
 $vol.$ – objętościowe,
 z – produkt zamrożony,
 $\perp$ – prostopadły do kierunku przepływu ciepła,
 $\parallel$ – równoległy do kierunku,
 1 – produkt nie zamrożony ($T > T_k$),
 $1-2$ – w przedziale temperatur $T_1 - T_2$.

1. DEFINICJE WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNYCH

Projektowanie procesów i linii technologicznych, konstruowanie nowych maszyn i aparatów przetwórczych opiera się na znajomości i analizie właściwości fizycznych surowców jako obiektów tego przetwórstwa.

Właściwości fizyczne dzieli Jowitt [7] na: mechaniczne, termiczne, dyfuzyjne, elektromagnetyczne i elektrostatyczne.

Do właściwości termofizycznych zaliczane są różne wielkości [1, 2, 3, 7]. Największe znaczenie w projektowaniu procesów technologicznych i konstruowaniu nowych maszyn i urządzeń przetwórczych mają [3, 7]:

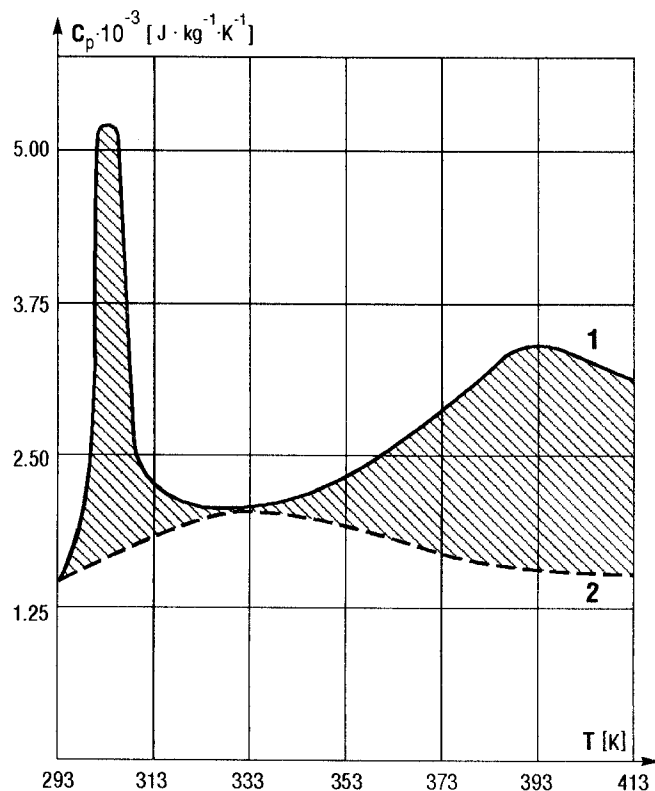
- ciepło właściwe – c ,
- współczynnik przewodzenia ciepła – k ,
- współczynnik wyrównywania temperatury – a ,
- gęstość – ρ .

Ciepło właściwe jest nazywane pojemnością cieplną właściwą. Współczynnik przewodzenia ciepła jest nazywany także współczynnikiem przewodnictwa ciepła [12], współczynnikiem przewodności cieplnej [8], przewodnością cieplną [10] lub przewodnością cieplną właściwą [6].

Innymi określeniami współczynnika wyrównywania temperatury są: współczynnik wyrównania temperatury [9], współczynnik przewodzenia temperatury [5], dyfuzyjność cieplna [10], stała dyfuzyjności cieplnej [13], przewodnictwo temperatury [11].

Wyróżnia się [3, 11] pojęcia właściwości termofizycznych rzeczywistych (istotnych) i efektywnych.

Wartość rzeczywista (istotna) odnosi się do określonej temperatury ciała jednorodnego i wymiany ciepła tylko przez przewodzenie. W odróżnieniu od wartości rzeczywistych, **wartość efektywna** uwzględnia niejednorodność badanego ciała i wszystkie [3] sposoby wymiany ciepła, np. przewodzenie, konwekcję i promieniowanie a także wymianę ciepła w warstwie materiału dyspersyjnego (rysunek 1.1), [3].



Rys. 1.1. Zależność temperaturowa ciepła właściwego C_p ziarna kakao: 1 – efektywne, 2 – rzeczywiste

Ciepło właściwe jest pojemnością cieplną odniesioną do jednostki masy ciepła:

$$c = \frac{dU}{dT dm} \quad (1.1)$$

Ciepło właściwe jest ilością ciepła, którą należy doprowadzić (lub odprowadzić) przy nagrzewaniu (chłodzeniu) masy 1 kg o 1 K. Ciepło właściwe rzeczywiste otrzymuje się w warunkach, gdy masa ciała nie zmienia się w określonej temperaturze i gdy nie ma żadnych efektów termicznych.

Ciepło właściwe efektywne jest sumą ciepła rzeczywistego i ciepła wydzielanego przez jednostkę masy podczas zachodzącej przemiany fazowej (w określonej temperaturze) (rys. 1.1) [3].

$$c_{ef} = c_{rz} + \frac{\Delta H}{m \Delta T} \quad (1.2)$$

Istnieje pojęcie średniego ciepła właściwego, odnoszącego się do określonego przedziału temperatury:

$$c \Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{Q_{1-2}}{m \cdot \Delta T} \quad (1.3)$$

W badaniu właściwości termofizycznych produktów spożywczych oprócz ciepła właściwego masowego c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) ma zastosowanie ciepło właściwe objętościowe $c_{vol.}$ ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$), przy czym:

$$c_{vol.} = c \rho \quad (1.4)$$

Przyjęto, że w badaniu ciepła właściwego stałych i ciekłych produktów spożywczych nie będzie się wyróżniać ciepła właściwego c_p (przy stałym ciśnieniu) i ciepła właściwego c_v (przy stałej objętości). Ta zasada wynika stąd, że przetwarzanie surowców odbywa się we względnie niskiej temperaturze i przy niskim ciśnieniu. Przyjmuje się, że ciepło właściwe c produktu spożywczego jest ciepłem właściwym c_p przy stałym ciśnieniu:

$$c = c_p \quad (1.5)$$

Współczynnikiem przewodzenia ciepła k jest charakteryzowana zdolność przewodzenia ciepła przez substancję. Wartość tego współczynnika określa ilość ciepła dQ przechodzącego przez jednostkową powierzchnię dA , przy gradiencie temperatury $\frac{dT}{dx}$ równym jedności:

$$k = \frac{dQ}{dA \Big| \frac{dT}{dx} \Big|} \quad (1.6)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła jest właściwością ciała liczbowo wyrażającą jej zdolność do przekazywania ciepła, wynikającą z samego mechanizmu procesu przewodzenia ciepła. Jest to wartość rzeczywista (istotna) [4] współczynnika k . Jednakże w olbrzymiej większości przypadków, przede wszystkim w przypadku ciał stałych, mechanizm przekazywania ciepła może być bardziej złożony. I tak np. przewodzenie ciepła w wilgotnym piasku może następować siedmioma sposobami [4]. Do takich ciał zalicza się większość produktów spożywczych. Niemniej i do nich ma zastosowanie prawo Fouriera, ale współczynnik przewodzenia ciepła ma tutaj sens wartości efektywnej ujmującej wszystkie mechanizmy przekazywania ciepła.

Współczynnik wyrównywania temperatury charakteryzuje inercję cieplną ciała, tzn. jego zdolność (intensywność) do nagrzewania (chłodzenia). Współczynnik wyrównywania temperatury jest charakterystyką kinetyczną [3] ciała w procesach nagrzewania bądź chłodzenia. Jeżeli współczynnik przewodzenia ciepła opisuje stacjonarną wymianę ciepła, to współczynnik wyrównywania temperatury charakteryzuje wymianę niestacjonarną. Istnieją także pojęcia rzeczywistego i efektywnego współczynnika wyrównywania temperatury. Współczynnik wyrównywania temperatury wyraża się też równaniem:

$$a = \frac{k}{c \cdot \rho} \quad (1.7)$$

Gęstość substancji dzieli się na [3]: rzeczywistą, fizyczną, nasypową.

Gęstość rzeczywista, nazywana także gęstością monolitu, jest gęstością produktu bez wtrąceń gazowych (porowatość równa 0):

$$\rho_{rz} = \frac{m}{V_n + V_m} \quad (1.8)$$

Gęstość fizyczna (lub gęstość) jest stosunkiem masy produktu do objętości rzeczywistej (w określonej temperaturze):

$$\rho = \frac{m}{V_n + V_m + V_g} \quad (1.9)$$

Gęstość ta jest mniejsza od gęstości rzeczywistej, gdyż we wzorze (1.9) istnieje człon V_g uwzględniający objętość gazów zawartych w produkcie.

Gęstość nasypowa jest stosunkiem sumarycznej masy warstwy produktu do sumarycznej objętości, składającej się z objętości cząstek produktu i objętości między nimi, wypełnionych gazem (powietrzem):

$$\rho_n = \frac{\Sigma m}{\Sigma V + \Sigma V_g} \quad (1.10)$$

Literatura

1. Adam M., Neumannova' I. 1967.: Tepelně fyzikální vlastnosti potravin. Průmysl potravin. 18, čís, 1, 26-29.
2. Constenla D.T., Lozano J.E., Crapiste G.H. 1987.: Thermophysical properties of clarified apple juice as function of concentration and temperature. „14 Jordanas invest. cienc. ing. quim. y quim apl., Santa Fe, 26-29 oct., 1987: Actas. Vol. 2” [Santa Fe], 457-462.
3. Гинзбург А.С., Громов М.А., 1987.: Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. Агропромиздат. Москва.
4. Gogół W. 1991.: Pomiary przewodności cieplnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 606. Ciepłne maszyny przepływowe. z. 101, 161-191.
5. Hobler T., 1979.: Ruch ciepła i wymienniki. Wydanie V zmienione i uaktualnione. WNT, Warszawa.
6. Jankowski T., 1989.: Modele właściwości fizycznych artykułów żywnościowych. Właściwości cieplne, dyfuzyjne i elektryczne. Przemysł Spożywczy. nr. 9-10, 234-237.
7. Jowitt R., 1987.: A Classification of Food and Physical Properties. Food Science Publishers Ltd. London.

8. Kneule F., 1978.: Suszenie. Arkady. Warszawa.
9. Pudlik W., 1974.: Wymiana ciepła dla studiów wieczorowych i zaocznych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej.
10. Staniszewski B., 1979.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa.
11. Strumiłło Cz., 1983.: Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa.
12. Wiśniewski S., 1979.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa.
13. Ziomba Z., 1980.: Podstawy cieplnego utrwalania żywności. WNT, Warszawa.

2. MIĘSO I PRODUKTY MIĘSNE

Właściwości termofizyczne mięsa i jego produktów są funkcją wielu parametrów. Do najważniejszych zalicza się: masową zawartość wody (m) i tłuszczu (f), temperaturę (T), kierunek przepływu strumienia ciepła względem włókien, zawartość gazów w tkance mięsnej, procesy gotowania i zamrażania.

2.1. Ciepło właściwe mięsa

Ciepło właściwe różnych gatunków mięsa (wołowina i cielęcina, wieprzowina, baranina, mięso drobiowe), w zakresie temperatury 273-303 K, $m > 0,26$ i $f < 0,30$, poleca się obliczać z następujących wzorów [4]:

$$c = 1675 + 2510 m \quad (2.1)$$

$$c = 3658 - 2510 f \quad (2.2)$$

Z równań wynika, że ciepło właściwe mięsa rośnie ze wzrostem wilgotności i maleje ze wzrostem zawartości tłuszczu. Ciepło właściwe mięsa dla temperatury $T > T_k$ rośnie ze wzrostem temperatury.

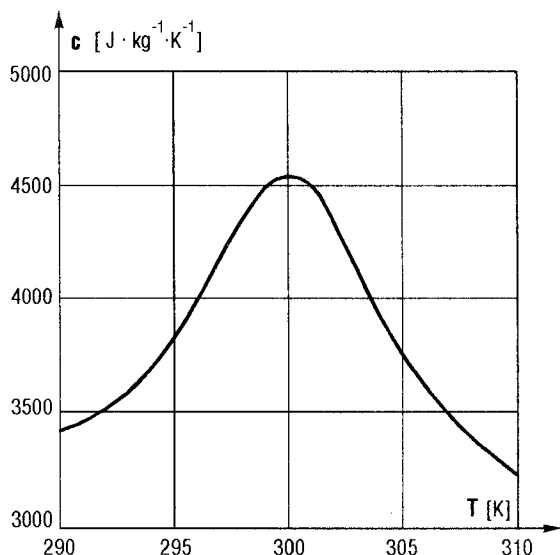
Dla $m = 0 - 1$ i $T = 273 \text{ K} - 320 \text{ K}$ ciepło właściwe wołowiny zmienia się według równania [4]:

$$c = (977 + 1,74 T)(1 - m) + 4187 m \quad (2.3)$$

Ciepło właściwe mięsa jagnięcego, dla temperatury $T > T_k$, jest opisane wzorem [2]:

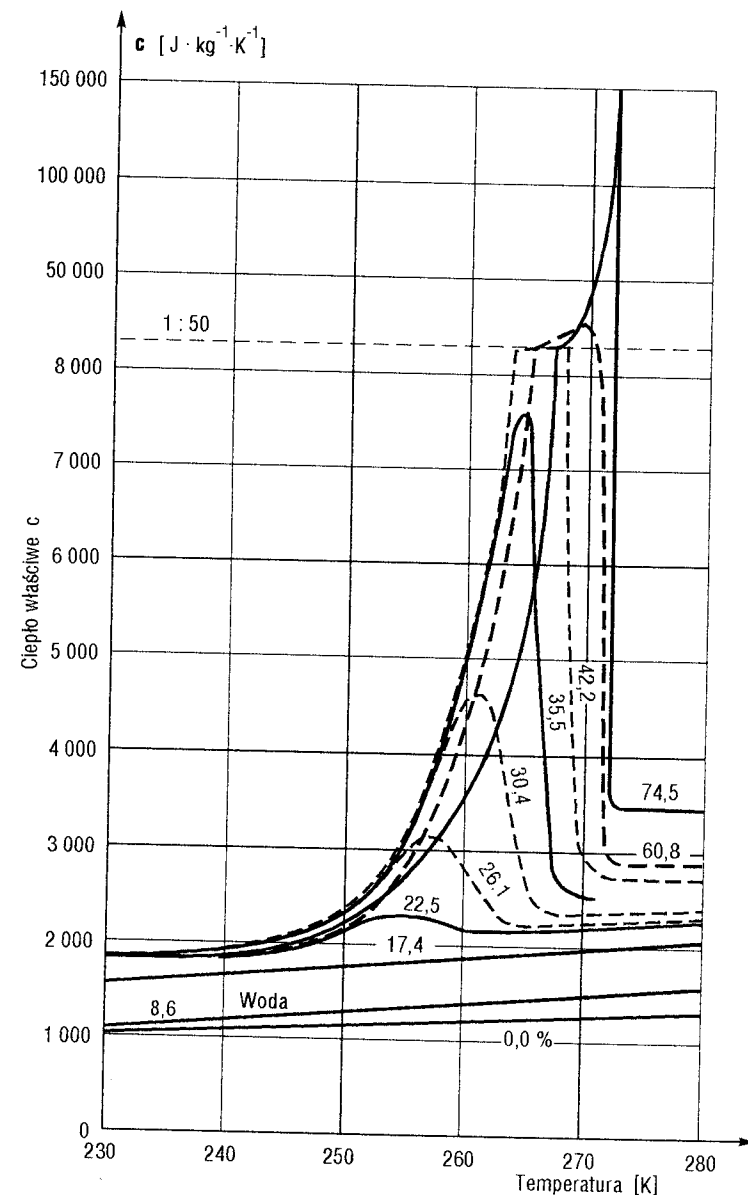
$$c = 1447,4 (1 - m) + 4184 m \quad (2.4)$$

Większość wzorów jest ważna dla stosunkowo wąskiego zakresu temperatury. Takie ograniczenie jest wynikiem wpływu przemian fazowych składników mięsa na jego ciepło właściwe. Przemiany fazowe zachodzą zarówno w temperaturze wyższej od T_k (topnienie tłuszczów, rys. 2.1 [14]) jak i w niższej od T_k (zamrażanie, rys. 2.2 [22]).



Rys. 2.1. Ciepło właściwe mięsa wieprzowego [14]

Topnienie tłuszczu (rys. 2.1) zachodzi w zakresie temperatury 295-305 K i powoduje lokalny wzrost wartości ciepła właściwego do $4550 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (dla około 300 K). Największe zmiany w przebiegu zależności $c = c(T)$ powoduje (rys. 2.2) przemiana fazowa wody (wymrażanie roztworu). W temperaturze intensywnego wymrażania roztworu w chudym mięsie wołowym ($m = 0,745$) [22] następuje wzrost ciepła właściwego do około $145 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ze zmniejszeniem wilgotności mięsa zmniejszają się wartości maksymalne ciepła właściwego (aż do $m = 0,174$) i obniża się temperatura odpowiadająca c_{max} . Poniżej tej wilgotności funkcja $c = c(T)$ ma liniowy charakter w całym zakresie temperatury.



Rys. 2.2. Ciepło właściwe wołowiny chudej [22]

Zmianę ciepła właściwego mięsa podczas przemiany fazowej wody opisuje zmodyfikowany wzór Schwartzberga [27] lub zespół 3 równań [17]. Wzór Schwartzberga ma postać:

$$c = c_z + \frac{D}{(T_{sw} - T)^n} \quad (2.5)$$

Wartości stałych empirycznych we wzorze Schwartzberga dla chudej wołowiny podane są w tabeli 2.1.

Tabela 2.1.

Wartości stałych empirycznych we wzorze Schwartzberga (dla chudej wołowiny) [27]

Wilgotność m	Temperatura początkowa zamarzania T_k (K)	D (kJ · K ⁿ⁻¹ kg ⁻¹)	c_z (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	n
0,74	272,16	216,04	1,876	1,968
0,70	272,14	169,56	1,545	1,717
0,63	271,39	311,50	1,737	1,981
0,57	271,13	161,61	0,984	1,497
0,45	269,06	165,38	0,569	1,416

Stałe w tabeli 2.1 są ważne dla $T_k \leq T < 233$ K.

W [17] zmianę ciepła właściwego mięsa wołowego ($m = 0,74$) podczas przemiany fazowej wody opisano trzema równaniami:

$$c = 3514 \quad \text{dla} \quad T > 272,15 \text{ K} \quad (2.6)$$

$$c = \frac{280,0217}{(273,3 - T)^2} \quad \text{dla} \quad 267,15 \text{ K} \leq T \leq 272,15 \text{ K} \quad (2.7)$$

$$c = \frac{14508 - 53,115 T}{(273,71 - T)^2} \quad \text{dla} \quad 243 \text{ K} \leq T \leq 267,15 \text{ K} \quad (2.8)$$

Zmianę ciepła właściwego baraniny bez kości ($0,70 \leq m \leq 0,76$) w temperaturze wyższej od krioskopowej do 233 K opisuje [2, 18] następujący układ równań:

$$T > T_k; \quad c = 1,4474 (1 - m) + 4,184 m \quad (2.9)$$

$$T_g \leq T \leq T_k; \quad c = \frac{334,107 + 67,857 m}{(276,64 - 4,043 - T)^2} \quad (2.10)$$

temperaturę T_g oblicza się ze wzoru:

$$T_g = \frac{-2098,07 + 273,15 m}{-7,8613 + m} \quad (2.11)$$

$$233 \text{ K} \leq T \leq T_g; \quad c = \frac{(6,785 m - 53,339)(T - 273,15)}{(276,64 - 4,043 m - T)^2} \quad (2.12)$$

Ciepło właściwe mięsa drobiowego (niezależnie od gatunku) poleca się [6] obliczać ze wzoru, (dla $0 < m < 1$ i $T = 293$ K):

$$c = 1645 + 2542 m \quad (2.13)$$

Wartości ciepła właściwego suchej masy mięs podane są w tabeli 2.2.

Ciepło właściwe suchej masy mięsa zwiększa się ze wzrostem temperatury. W przedziale temperatury 273-320 K ciepło może być określone z następujących [4] wzorów:

$$\text{wołowina} \quad c = 997 + 1,74 T, \quad (f = 0,042 - 0,105) \quad (2.14)$$

$$\text{wieprzowina} \quad c = 814 + 1,22 T, \quad (f = 0,215 - 0,373) \quad (2.15)$$

Tabela 2.2.

Ciepło właściwe suchej masy mięs

Rodzaj mięsa	Temperatura (K)	Wartość c ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Literatura
z gąsiąt	—	1662	[6]
gęsie	—	1683	[6]
z indycząt	—	1600	[6]
indycze	—	1639	[6]
z kacząt	—	1664	[6]
kacze	—	1684	[6]
z kurczaka	—	1609	[6]
kurze	—	1630	[6]
przepiórcze	—	1632	[6]
wieprzowe odłuszczone	293	1465	[4]
	273-293	1361	[12, 23]
wołowina	273-293	1472	[1]
	273-293	1758	[23]

2.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa

Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa zależy od wielu czynników. Do najważniejszych parametrów wpływających na przewodność cieplną zalicza się: wilgotność, temperaturę, przemiany fazowe składników mięsa, kierunek przepływu strumienia ciepła względem włókien, zawartość gazów w mięsie.

Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa rośnie ze wzrostem jego wilgotności. Dla mięsa wołowego, cielęcego, jagnięcego i końskiego, o wilgotności $m = 0,52 - 0,70$, podano w [21] wzór:

$$k = 0,57m + 0,056 \quad (2.16)$$

Ze wzrostem temperatury wzrasta przewodność cieplna mięsa (dla $T > T_k$):
mięso wołowe i wieprzowe (273–323 K) [19]

$$k = 0,044 + 1,56 \cdot 10^{-3} T \quad (2.17)$$

mięso baranie [2]

$$k = 0,195 + 1,0627 \cdot 10^{-3} T \quad (2.18)$$

mięso z kurczaka, ciemne ($T = 273 \text{ K} - 293 \text{ K}$) [28]

$$k = 0,245 + 8,65 \cdot 10^{-4} T \quad (2.19)$$

mięso z kurczaka, białe ($T = 273 \text{ K} - 293 \text{ K}$) [28]

$$k = -1,176 + 6,05 \cdot 10^{-4} T \quad (2.20)$$

Równania uwzględniające wpływ obu wyżej wymienionych parametrów na współczynnik k mięsa są podane na rysunku 2.3 [18, 29] (na rysunku zachowano zgodnie z oryginałem temperaturę w $^{\circ}\text{C}$). Przebiegi są ważne dla $m = 0,75$.

Z równań na rys. 2.3 widać, że dla $T > T_k$ przewodność cieplna mięsa bardziej zależy od wilgotności niż od temperatury. Natomiast dla $T < T_k$ współczynnik przewodzenia ciepła mięsa jest bardziej zależny od temperatury niż od wilgotności (rys. 2.4) [15]. Przewodność cieplna mięsa zamrożonego jest około 3 razy większa od przewodności mięsa nie zamrożonego. Zależność $k = k(T)$ mięsa zamrożonego nie ma charakteru liniowego, lecz potęgowy, np. dla wołowiny [18]

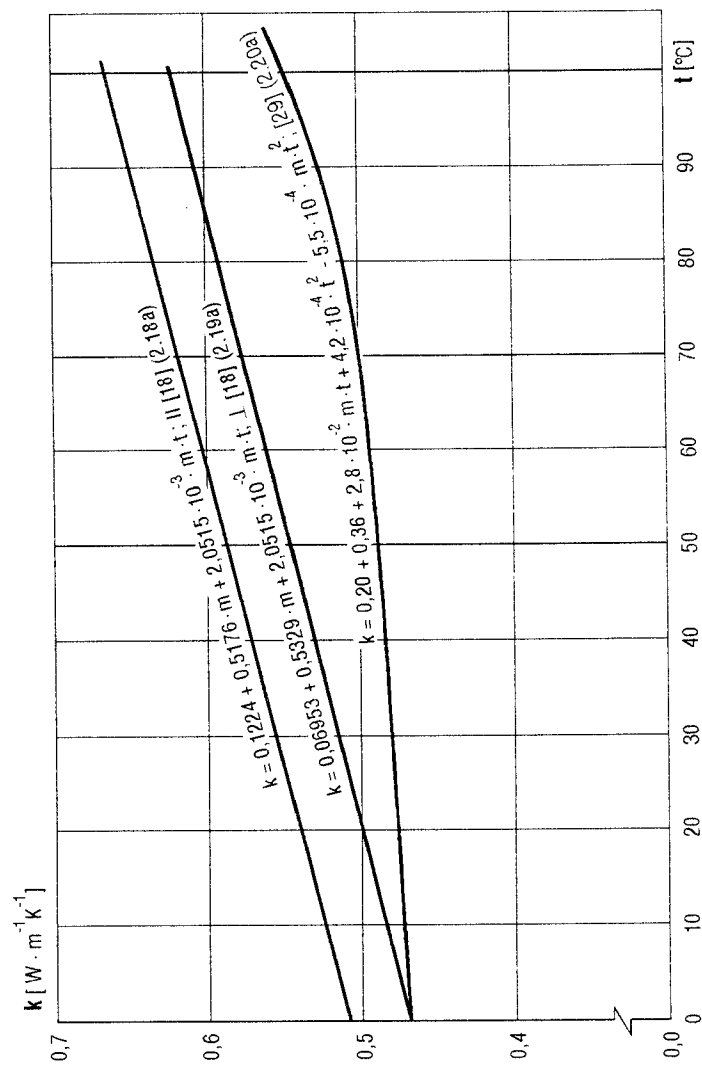
$$k_{\perp} = 0,3381 + 1,2123m + 0,78655 \frac{1}{(T - 273,15)} \quad (2.21)$$

$$k_{\parallel} = 0,3977 + 1,44663m + 0,9537 \frac{1}{(T - 273,15)} \quad (2.22)$$

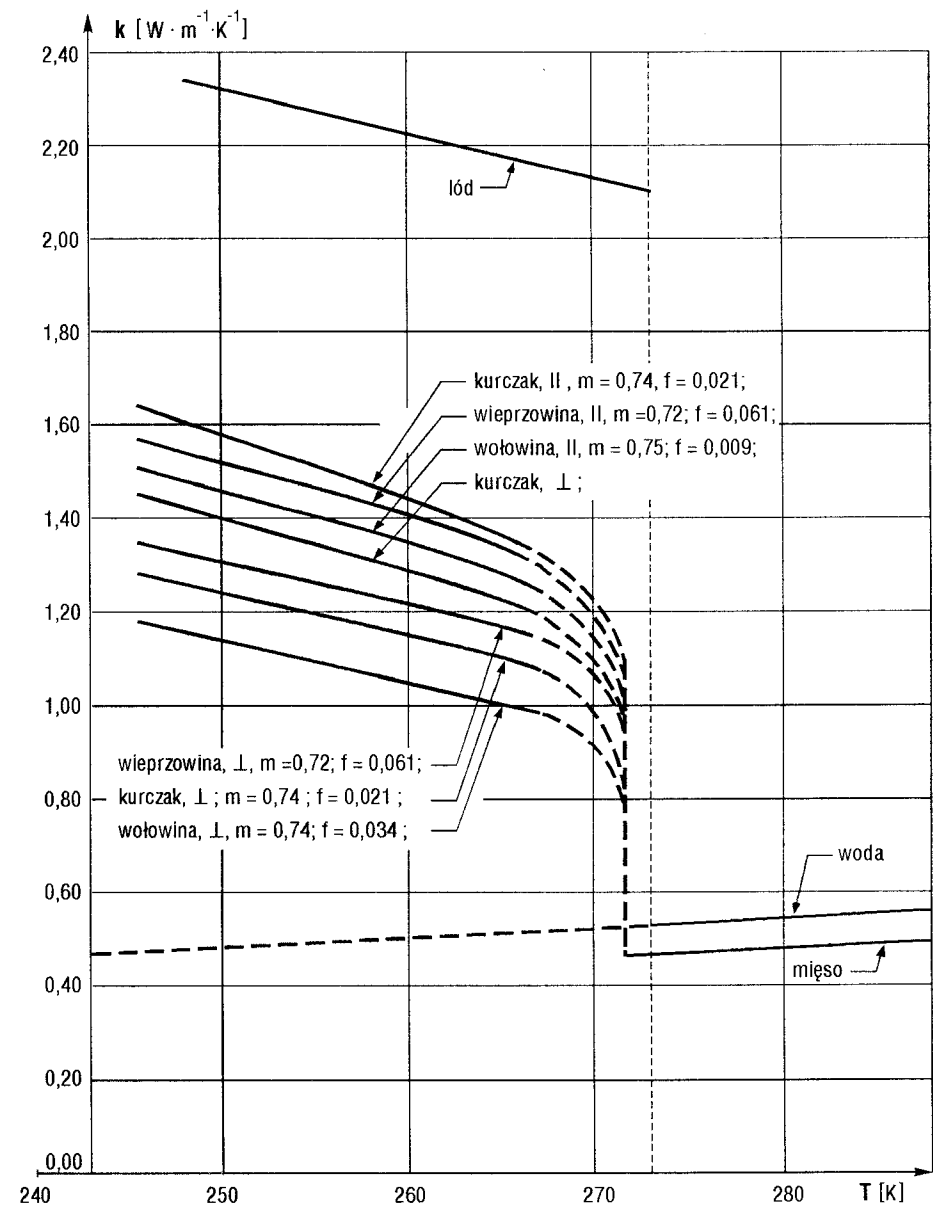
lub też wg [16] dla:

$$267,15 \text{ K} \leq T \leq 272,15 \text{ K} \quad k = 0,48 + (273,15 - T)^{0,429} \quad (2.23)$$

$$243 \text{ K} \leq T \leq 267,15 \text{ K} \quad k = 1,029 + 0,0821 (267,15 - T)^{0,590} \quad (2.24)$$



Rys. 2.3. Wpływ wilgotności i temperatury na współczynnik k mięsa



Rys. 2.4. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa zamrożonego [15]

Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa, jako materiału włóknistego, zależy także od kierunku przepływu strumienia ciepła względem włókien, (tab. 2.3).

Tabela 2.3.

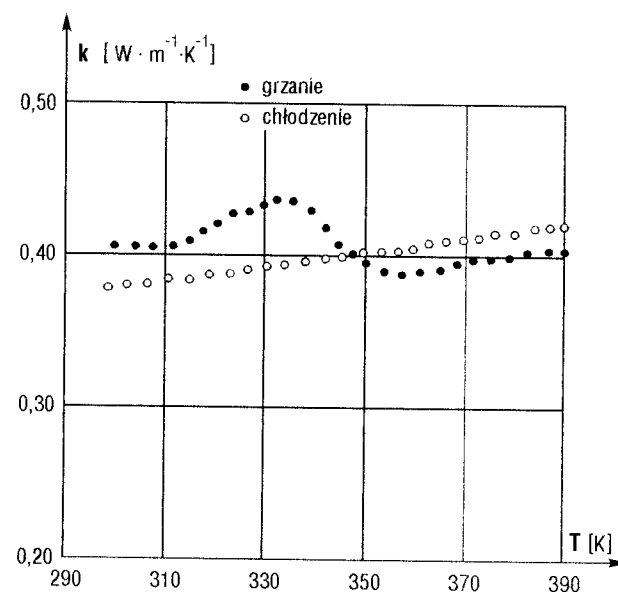
Wpływ kierunku przepływu strumienia ciepła względem włókien na współczynnik k mięsa

Rodzaj mięsa	Wilgotność <i>m</i>	Zawartość tłuszczu <i>f</i>	Temperatura T	Zawartość gazów ξ	Współczynnik <i>k</i>		Lite- ratura	
					$\perp$	$\parallel$		
Wołowina	0,750	0,021	263,14	$5 \cdot 10^{-6}$	1,30	1,41	[13]	
			263,34	$20 \cdot 10^{-6}$		0,43		
			314,44			0,48		
			315,44					
Wołowina	0,789	0,008	280	—	0,476	0,431	[10]	
	0,787	0,014	281	—	0,445			
	0,760	0,030	—	0,415				
	0,765	0,0235	—					
Wieprzowina	0,720	0,061	268,14	$6 \cdot 10^{-6}$	1,17	1,33	[13]	
			268,14	$12 \cdot 10^{-6}$		0,48		
			277,04					$24 \cdot 10^{-6}$
			277,04					
Baranina	0,736	0,047	260		1,158	1,239	[20]	
	0,725	0,072	280			0,428		
			260					
			280					

Wpływ kierunku przepływu ciepła względem włókien na współczynnik przewodzenia ciepła mięsa, dla temperatury wyższej niż 273 K, jest niejednoznaczny (tab. 2.3). Większość wyników badań wskazuje na wyższe wartości współczynnika k przy przepływie ciepła prostopadłym do włókien. Nie potwierdzają tego jednakże wyniki dla wieprzowiny [13]. Wykazana sprzeczność jest wynikiem nieuwzględnienia różnych ilości gazów zawartych w badanych próbkach. Jak wykazano w [13] ilość gazów zawartych w mięsie (ξ — udział objętościowy gazów rozpuszczonych, w g powietrza na 1 kg wody) ma większy wpływ na współczynnik k niż kierunek przepływu ciepła względem włókien. W przypadku mięsa zamrożonego współczynnik przewodzenia ciepła jest więk-

szy o około 8,7% [29] przy równoległym do włókien przepływie ciepła. Wy tłumaczeniem wyższej przewodności cieplnej mięsa przy równoległym do włókien przepływie ciepła jest fakt tworzenia się igiełkowatych kryształów lodu równoległe do włókien zamrażanego mięsa. Taki kształt kryształów i ich usytuowanie tworzą lepsze [29] warunki przepływu ciepła w tym kierunku. Zjawisko takie musi być także funkcją prędkości zamrażania, ponieważ większe kryształy lodu tworzą się przy mniejszych jej wartościach.

Wpływ procesu gotowania mięsa na współczynnik przewodzenia ciepła ilustruje na przykładzie wołowiny rysunek 2.5., [24].

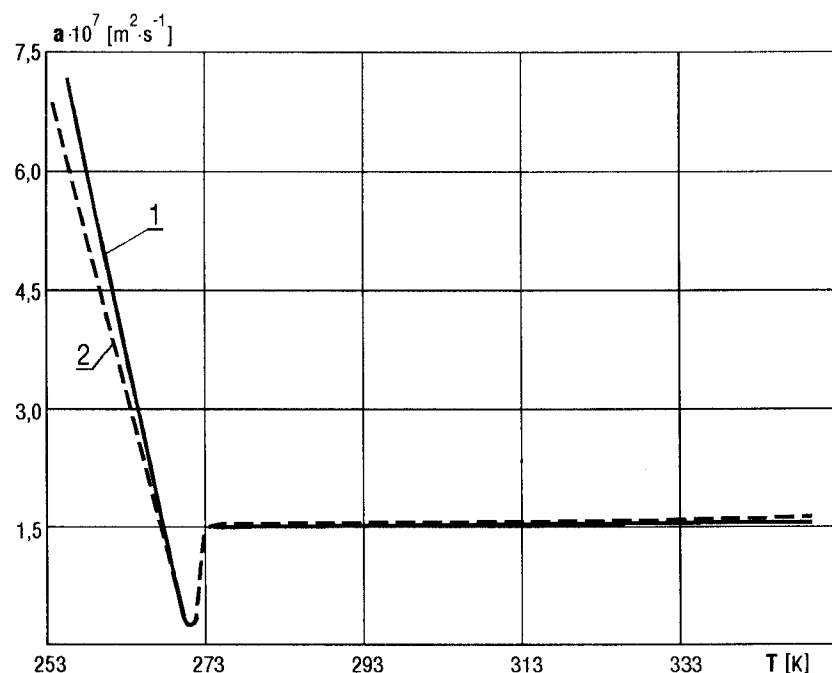


Rys. 2.5. Wpływ gotowania na przewodność cieplną mięsa [24]

Współczynnik k mięsa wzrasta od $0,41 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla 303 K do $0,44 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla 339 K. Następnie przewodność cieplna maleje do $0,38 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ w temperaturze 360 K, co jest wynikiem procesu denaturacji białek mięsa i związanego z nim dużego ubytku wilgoci (ok. 0,028 na 1 K w zakresie temp. 338-343 K). Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa ochładzanego jest mniejszy o około 7% od współczynnika k mięsa podczas nagrzewania.

2.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa

W literaturze istnieje bardzo mało danych o bezpośrednich pomiarach współczynnika wyrównywania temperatury mięsa. Najczęściej są to wartości dla określonej wilgotności, temperatury lub dla niewielkiego zakresu tych parametrów. Typowy przebieg funkcji $a = a(T)$ przy $m = \text{idem.}$, mięsa wołowego i wieprzowego w zakresie temperatury 253-353 K [19] pokazuje rysunek 2.6.



Rys. 2.6. Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa: 1 – wołowego, 2 – wieprzowego

Dyfuzyjność cieplna mięsa zamrożonego (253 K) wynosi około $7,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Ze wzrostem temperatury wartość współczynnika a maleje i osiąga swoje minimum w temperaturach bliskich 273,15 K. Po zakończeniu przemiany lodu w wodę następuje skokowy wzrost dyfuzyjności do około $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. W temperaturach wyższych od 273,15 K współczynnik wyrównywania temperatury mięsa wzrasta ze wzrostem temperatury i zmniejszeniem wilgotności (dla mięsa wołowego):

$$a \cdot 10^8 = 4,1 + 0,028 T; \quad 272 \text{ K} < T < 303 \text{ K} \quad [30] \quad (2.25)$$

$$a \cdot 10^8 = -13,0 - 10,07 m + 0,0832 T \quad (2.26)$$

dla $303 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$; $0,635 < m < 0,744$ [5].

Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa zależy także od zmian jego struktury [11] zachodzących np. w procesach dojrzewania (tab. 2.4).

Tabela 2.4.

Zmiany dyfuzyjności cieplnej mięsa wołowego w procesie dojrzewania

Rodzaj mięsa	Kierunek przepływu ciepła względem włókien	Skład mięsa			Wartość współczynnika $a \cdot 10^7$
		m	f	p	
Bezpośrednio po uboju		0,759	0,0175	0,3311	1,968
	⊥				1,885
Po 6 dniach dojrzewania		0,736	0,0281	0,3636	1,816
	⊥				1,617
Po zamrożeniu		0,724	0,0291	0,3667	1,658
	⊥				1,618

W mięsie będącym w fazie stężenia pośmiertnego następuje skracanie i nakładanie się włókien [11]. Struktura mięsa ma większą spoistość i lepsze warunki dla wyrównywania się temperatury. Natomiast mięso o zaawansowanych zmianach autolitycznych i rozmrożone ma współczynnik wyrównywania temperatury odpowiednio niższy o około 7,7% i 15,7% ze względu na rozrywanie i przemieszczanie włókien oraz zanik spoistości sarkolemmy. Z tabeli 2.4 widać także, że bez względu na stan mięsa, współczynnik a ma wyższą wartość przy przepływie ciepła równoległym do włókien niż przy przepływie prostopadłym.

2.4. Gęstość mięsa

Gęstość mięsa zależy od jego gatunku, temperatury, zawartości tłuszczu i wilgotności.

Ze wzrostem temperatury maleje gęstość mięsa [5]:

wołowina surowa

$$271 \text{ K} < T < 373 \text{ K}, m = 0,749; f = 0,025; \rho = 1176 - 0,39 T \quad (2.27)$$

$$m = 0,593; f = 0,074; \rho = 1152 - 0,22 T \quad (2.28)$$

wołowina gotowana

$$271 \text{ K} < T < 373 \text{ K}, m = 0,546; f = 0,012; \rho = 1220 - 0,38 T \quad (2.29)$$

wieprzowina

$$272 \text{ K} < T < 373 \text{ K}, m = 0,713; f = 0,071; \rho = 1226 - 0,56 T \quad (2.30)$$

wieprzowina gotowana

$$271 \text{ K} < T < 373 \text{ K}, m = 0,572; f = 0,043; \rho = 1273 - 0,60 T \quad (2.31)$$

Z równań (2.28), (2.29) i (2.30), (2.31) wynika, że gęstość mięsa gotowanego jest większa niż surowego, ponieważ podczas gotowania traci ono tłuszcz.

Zwiększenie ilości tłuszczu w mięsie powoduje zmniejszenie jego gęstości, np. dla wieprzowiny o $0,015 < f < 0,358$, w [5] podano równanie:

$$\rho = \frac{5135}{4,694 + f} \quad (3.32)$$

Zamrażanie mięsa powoduje wzrost gęstości:

$$\text{wołowiny [18], } \rho = \frac{1053}{0,93221 + 0,11095 m + 0,25746 \frac{1 - m}{(T - 273,15)}} \quad (2.33)$$

$$\text{wieprzowiny [5], dla } 271 \text{ K} < T < 273 \text{ K}; \rho = 310 + 32,5 T \quad (2.34)$$

Wyższa wilgotność powoduje obniżenie jego gęstości.

Dla wołowiny o wilgotności $0 < m < 1$ i dla $T = 293 \text{ K}$ zależność $\rho = \rho(m)$ ma [7] postać:

$$\rho = 1181 - 172,8 m \quad (2.35)$$

Natomiast wpływ wilgotności na gęstość mięsa drobiowego (dla $T = 293 \text{ K}$, $0 < m < 1$) opisują równania:

$$\text{białe mięso indyka; } \rho = 1265 - 267 m \quad (2.36)$$

$$\text{filet gołębi; } \rho = 1344 - 346 m \quad (2.37)$$

białe i ciemne mięso kurczaka;

$$\rho = 1247 - 249 m \quad (2.38)$$

Jeżeli mięso nie zawiera gazów, to dla $T > 273,15 \text{ K}$ gęstość może być obliczana z zastosowaniem reguły addytywności [7,9]. Mięso składa się z: wody (m), białek (p), tłuszczu (f) i popiołu (r).

Wzór na gęstość mięsa ma postać:

$$\rho = m \rho_m + p \rho_p + f \rho_f + r \rho_r \quad (2.39)$$

Gęstość składników wołowiny dla temperatur $293 \text{ K} - 373 \text{ K}$ podano w tabeli 2.5 [3].

Tabela 2.5.

Gęstość składników wołowiny

Temperatura	Gęstość			
	wody	białek	tłuszczu	popiołu
293	998	1289	916	1743
303	996	1272	914	1731
313	992	1258	907	1720
323	988	1246	903	1705
333	983	1231	894	1692
343	978	1223	885	1679
353	972	1213	880	1669
363	963	1204	876	1658
373	958	1198	874	1649

Gęstość zamrożonego mięsa jest natomiast proporcjonalna [9] do udziałów masowych wody nie wymrożonej (w), substancji suchej (n) i lodu (l):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w}{\rho_w} + \frac{n}{\rho_n} + \frac{l}{\rho_l} \quad (2.40)$$

przy czym gęstość lodu ρ_l oblicza się ze wzoru [27]:

$$\rho_l = 959,376 - 0,1555 T \quad (2.41)$$

Powyższy wzór jest ważny dla $233 \text{ K} \leq T \leq T_k$.

Gęstość mięsa zamrażanego może być także określana formułą Schwartzberga [26]:

$$\rho = X + S(T_k - T) + (\rho_1 - X) \frac{T_{sw} - T_k}{T_{sw} - T} \quad (2.42)$$

Wartości stałych w równaniu Schwartzberga dla chudego mięsa wołowego zawiera tabela 2.6.

Tabela 2.6.

Stałe w równaniu Schwartzberga dla chudego mięsa wołowego [26]

Wilgotność m	T_k (K)	ρ_1 (kg m^{-3})	X (kg m^{-3})	S ($\text{kg m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
0,70	272,14	1070	1012	0,0056
0,63	271,39	1075	1019	0,2027
0,57	270,19	1080	1025	0,3322
0,45	269,06	1090	1057	0,1104

2.5. Ciepło właściwe farszów mięsnych

Ciepło właściwe farszów (tab. 2.7) z mięsa wołowego i wieprzowego zmienia się w złożony sposób ze wzrostem temperatury. Złożony przebieg zależności $c = c(T)$ jest następstwem przemian fazowych i chemicznych zachodzących w farszach podczas nagrzewania [4]. Tłuszcz zawarty w farszu mięsnym ma mniejszy wpływ na ciepło właściwe niż wilgotność [5].

Tabela 2.7.

Ciepło właściwe farszu, ($f = 0,3296$) [4]

Zakres temperatury	283 – 303	303 – 333	333 – 343	343 – 368
$c (\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$	3643 – 4271	4271 – 3245	3245 – 3433	3433 – 2826

2.6. Współczynnik przewodzenia ciepła farszów mięsnych

Zwiększenie wilgotności farszu zwiększa jego przewodność cieplną. Przewodność cieplna farszu wołowego w zależności od wilgotności jest opisana równaniem [25] (dla $0,45 < m < 0,80$ i $T = 302 \text{ K} - 323 \text{ K}$):

$$k = -0,600 + 0,34 m + 0,00237 T \quad (2.43)$$

Natomiast dla farszu z baraniny ($m = 0,739$, $f = 0,045$) w zakresie temperatury 233 K do 303 K w [20] podano zależności: dla $T < 272,25$ K;

$$k = 2,4255 - 0,0043 T + \frac{0,71}{T - 273,15} \quad (2.44)$$

$$\text{dla } T > 272,15 \text{ K} \quad k = 0,1665 + 0,0011 T \quad (2.45)$$

Dane eksperymentalne zawarte w [4, 25] wskazują, że wyższą przewodność mają farsze, w których białka uległy koagulacji.

2.7. Współczynnik wyrównywania temperatury farszów mięsnych

Współczynnik wyrównywania temperatury farszu wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury.

Współczynnik wyrównywania temperatury farszu kielbasy Ruse [4] podczas gotowania ($T = 316 \text{ K} - 336 \text{ K}$, $m = 0,547 - 0,614$) zmienia się według wzoru:

$$a \cdot 10^8 = -4,1 + 0,028 T + 1,15 m \quad (2.46)$$

Współczynnik wyrównywania temperatury farszu o składzie: 60% wołowiny, 40% wieprzowiny, w tym 40% tłuszczu, rośnie ze wzrostem wilgotności (w zakresie temperatury 288 K – 348 K) według równania:

$$a = 7,182 \cdot 10^{-8} + 7,962 \cdot 10^{-8} m \quad (2.47)$$

Większa zawartość tłuszczu w farszu obniża jego współczynnik wyrównywania temperatury. Współczynnik a farszów kielbasianych dla zawartości tłuszczu $f = 0,20$; 0,30; 0,40; 0,50 wynosi [4] odpowiednio: $1,28 \cdot 10^{-7}$; $1,25 \cdot 10^{-7}$; $1,22 \cdot 10^{-7}$; $1,19 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Proces topnienia tłuszczu szczególnie wyraźnie zwiększa współczynnik a farszów [4] (tab. 2.8) powodując około dwukrotny wzrost jego wartości.

Tabela 2.8.

Wpływ topnienia tłuszczu na współczynnik a farszu ($a \cdot 10^7$)

Rodzaj farszu	Przed topnieniem tłuszczu	Po stopieniu tłuszczu
wołowy	0,78 – 0,83	1,40 – 1,47
kielbasiany do kielbasy:		
podwędzanej	0,52 – 0,56	1,25 – 1,36
gotowanej,	0,52 – 0,56	1,25 – 1,36
stołowej,	0,58 – 0,64	1,50 – 1,56
parówek	0,89 – 0,92	1,58 – 1,64

2.8. Gęstość farszów mięsnych

Gęstość farszów maleje z rosnącymi wartościami temperatury, np. dla zakresu temperatury 293 K – 353 K gęstość farszu wołowego z dodatkiem 17% wody opisuje [4] równanie:

$$\rho = 1147 - 0,28 T \quad (2.48)$$

farszu wieprzowego bez dodatku wody:

$$\rho = 1198 - 0,43 T \quad (2.49)$$

farszu na parówki ($m = 0,656$; $f = 0,206$);

$$\rho = 1223 - 0,68 T \quad (2.50)$$

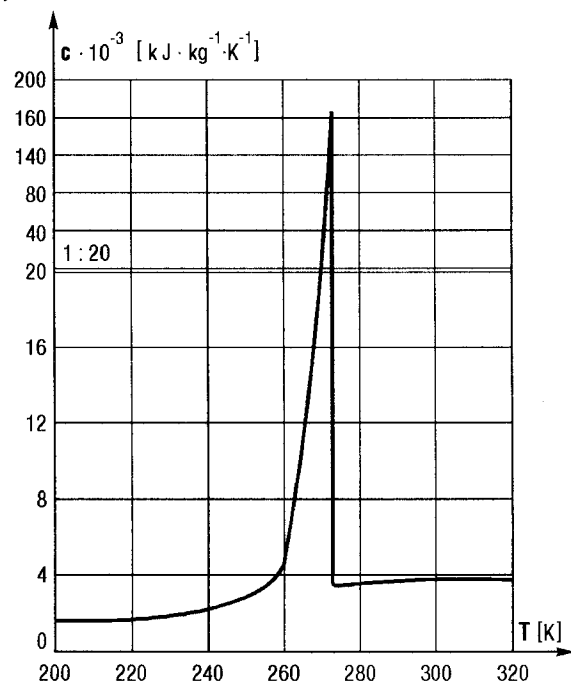
Gęstość farszu kielbasy doktorskiej, w zależności od ciśnienia ($P = 0,1 \cdot 10^5 - 16 \cdot 10^5$), wilgotności $m = 0,65 - 0,73$ i zawartości tłuszczu $f = 0,15 - 0,22$, w pozycji [4] opisano zależnością:

$$\rho = 1037 - 290f - 10,5m + 22 \lg P \quad (2.51)$$

Ze wzoru widać największy wpływ ciśnienia na zmniejszenie gęstości farszu.

2.9. Ciepło właściwe podrobów

Rysunek 2.7 pokazuje ciepło właściwe wątroby wołowej w zakresie temperatury 200 K – 320 K [14]. Zależność ciepła właściwego wątroby jest podobna do mięsa (rys. 2.2). Przemiana fazowa wody w lód ma największy wpływ na ciepło właściwe. Wartości maksymalne ciepła właściwego w 272 K są następujące: 152,64 kJ kg⁻¹ K⁻¹ dla trzustki [14] i 168,82 kJ kg⁻¹ K⁻¹ dla wątroby. Wilgotność trzustki $m = 0,754$, zawartość tłuszczu $f = 0,042$, wątroby: $m = 0,728$, $f = 0,031$.



Rys. 2.7. Ciepło właściwe wątroby [14]

2.10. Współczynnik przewodzenia ciepła podrobów

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury (od 233 K do 303 K) podrobów jest podobna do mięsa. Przemiana fazowa wody w lód podczas zamrażania powoduje około trzykrotny wzrost przewodności cieplnej. Zmianę współczynnika k podrobów baranich dla $T < T_k$ opisano [20] równaniem:

$$k = k_k + b(T - T_k) + C \cdot \left(\frac{1}{T - 273,15} - \frac{1}{T_k - 273,15} \right) \quad (2.52)$$

natomiast dla $T > T_k$ równaniem:

$$k = k_k + d(T - T_k) \quad (2.53)$$

Jako T_k przyjęto 272,25 K.

Parametry równań (2.52) i (2.53) zawiera tabela 2.9., tabela 2.10. podaje natomiast podstawowy skład chemiczny badanych produktów.

Tabela 2.9.

Parametry równań (2.52) i (2.53)

Produkt	k_k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	b (W m ⁻¹ K ⁻²)	C (W m ⁻¹)	d (W m ⁻¹ K ⁻²)
Grasica	0,497	– 0,0047	0,91	0,0012
Grasica rozdrobniona	0,487	– 0,0053	0,85	0,0009
Mózg	0,494	– 0,0039	0,84	0,0003
Nerka	0,507	– 0,0075	0,78	0,0012
Serce	0,390	– 0,0046	0,71	0,0009
Serce rozdrobnione	0,407	– 0,0065	0,68	0,0008
Wątroba	0,417	– 0,0073	0,65	0,0006
Wątroba rozdrobniona	0,425	– 0,0067	0,67	0,0012

Tabela 2.10.

Skład chemiczny badanych produktów

Produkt	Skład chemiczny			
	woda	białko	tłuszcz	popiół
Grasica	0,792	0,143	0,064	0,014
Grasica rozdrobniona	0,759	0,135	0,092	0,017
Mózg	0,790	0,103	0,076	0,014
Nerka	0,799	0,145	0,031	0,013
Serce	0,698	0,150	0,123	0,012
Serce rozdrobnione	0,689	0,149	0,139	0,011
Wątroba	0,689	0,194	0,062	0,015
Wątroba rozdrobniona	0,677	0,208	0,037	0,020

Według [4] współczynnik przewodzenia ciepła nerek króliczych i wątroby w $T = 310$ K wynosi odpowiednio: 0,50 W m⁻¹ K⁻¹ i 0,49 W m⁻¹ K⁻¹.

2.11. Współczynnik wyrównywania temperatury podrobów

W literaturze spotyka się nieliczne doniesienia o wartościach współczynnika wyrównywania temperatury tego typu produktów. W czasie obróbki termicznej [1] współczynnik α wątroby dla temperatury $T = 323\text{ K}$, 373 K i 393 K wynosi odpowiednio: $1,05 \cdot 10^{-7}$; $1,15 \cdot 10^{-7}$; $1,39 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$.

Literatura

1. Александрова Н.А., Макаров В.В., Латышев В.П., Орловский В.М. 1976. Исследование удельной теплоемкости говядины и поджелудочной железы крупного рогатого скота. Холодильная техника. Nr 7, 31-34.
2. Bazan H.C., Mascheroni R.H. 1984.: Transferencia de calor con simultaneo cambio de fase en la congelation de carnes ovinas deshuesadas. Rev. latino-am. transf. cal. mat. 8: 55-76.
3. Choi Y., Okos M.R. 1983.: Thermal Properties of liquid foods. ASAE Paper No. 83-6516.
4. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1980. Тепло-физические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание второе, дополненное и переработанное. Пищевая промышленность. Москва.
5. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1990. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Изд. 3-е, дополненное и переработанное. Москва. ВО. Агропромиздат.
6. Громов М.А. 1985. Плотность и удельная теплоемкость мяса птицы. Мясная индустрия. СССР. Nr, 10, 42-44.
7. Громов М.А. 1987. Плотность и удельная теплоемкость говядины. Мясная индустрия СССР. Nr. 9, 40-42.
8. Heldman D.R. 1975. Food Process Engineering. Westport.
9. Heldman D.R. 1982. Food Properties during freezing. Food Technology, Vol. 36, 92-96.
10. Hill J.E., Leitman J.D., Sunderland J.E. 1967. Thermal Conductivity of Various Meats. Food Technology. Vol. 21, Nr 8, 91-96.
11. Janitz W., Grodzka-Zapytowska S., Bielawa M. 1976.: Przewodność cieplna mięsa o zaawansowanych zmianach autolitycznych i mięsa rozmrożonego. Medycyna Weterynaryjna. Rok XXXII, nr. 9, 561-563.
12. Латышев В.П. 1975. Исследование удельной теплоемкости и энтальпии свинины. Холодильная техника. Nr. 9, 42-44.
13. Латышев В.П. 1980. Влияние растворимых газов на коэффициент теплопроводности и плотность говядины и свинины. Холодильная техника. Nr. 12, 31-36.
14. Латышев В.П. 1983. Рекомендации по расчетам теплофизических свойств пищевых продуктов. Москва.
15. Лентз Ц.П. 1961.: Thermal Conductivity of meats, fats, gelatin gels and ice. Food Technology, May.
16. Levy F.L. 1977.: Calculating time, temperature and weight loss diagrams of chilling and freezing meat. Freezing, frozen storage and freeze drying. I.I.R. Karlsruhe, 325.
17. Levy F.L. 1980.: Enthalpy and specific heat of meat and fish in the freezing range. J. Food Technol. 14, 549-560.
18. Mascheroni R.H., Sanz P.D., Dominquez M. 1984.: Recompilation y evaluacion de las propiedades termicas de producto carnicos. Alimentaria. 21, Nr. 153, 21-32.
19. Мазуренко А.Г., Федоров В.Г., Черная С.В., Павленко В.И. 1984. Комплексное определение теплофизических характеристик мяса. Мясная индустрия СССР. Nr. 1, 32-34.

20. Pham Q.T., Willix J. 1989. Thermal Conductivity of Fresh Lamb Meat, Offals and Fat in the Range -40 to $+30^{\circ}\text{C}$: Measurement and Correlations. *Journal of Food Science*. Vol. 54, Nr. 3, 508-515.
21. Quashou M.S., Nix G., Vachon R.I., Lowrey G.W. 1970.: Thermal Conductivity Values for Ground Beef and Chuck. *Food Technology*. Vol. 23, Nr. 4. 189-192.
22. Riedel L. 1957. Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Fleisch. *Kältetechnik*. 9 Jahrgang. Heft 2, 38-40.
23. Riedel L. 1961. Zum Problem des gebundenen Wassers in Fleisch. *Kältetechnik*. 13 Jahrgang. Heft 3, 122-128.
24. Shahedi Baghe-Khandan M., Okos M.R. 1981. Effect of Cooking on the Thermal Conductivity of Whole and Ground Lean Beef. *Journal of Food Science*. Vol. 46, 1302-1305.
25. Sörenfors P. 1974.: Determination of the Thermal Conductivity of minced Meat. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. Band 7, No 7, 236-238.
26. Succar J., Hayakawa K-i. 1983.: Empirical Formulae for Predicting Thermal Physical Properties of Food at Freezing or Defrosting Temperatures. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 16, 326-331.
27. Succar J. 1985.: Estimation of thermal properties of food at freezing temperatures. *ASHRAE Trans.*, vol. 91. Pt 28. Symp. Pap. Annu Meet., Honolulu. Haw. 1986. Atlanta. GA., 312-322.
28. Sweat V.E., Haugh C.G., Stadelman W.J. 1973. Thermal Conductivity of chicken meat at temperatures between -75 and 20°C . *Journal of Food Science*. Vol. 38, 158-160.
29. Sweat V.E. 1975.: Modelling the Thermal Conductivity of Meats. *Transactions of the ASAE*. Vol. 18, Nr. 3, 564-568.
30. Tarnowski W. 1971. Właściwości cieplne zamrożonych produktów spożywczych. *Chłodnictwo*. Nr. 9, 6-8.

3. RYBY I INNE PRODUKTY POCHODZENIA MORSKIEGO

3.1. Ciepło właściwe mięsa ryb

Ciepło właściwe jest praktycznie jednakowe [2,22] dla różnych gatunków (tab. 3.1) ryb o jednakowej wilgotności. Jest to wynik decydującego jej wpływu na tę właściwość. W rybach jest około 4 razy więcej wilgoci niż suchej masy. Ciepło właściwe wody jest około 2,5 razy wyższe od ciepła właściwego suchej masy. Dlatego też niejednakowa zawartość tłuszczu w rybie nie wykazuje wyraźnego wpływu (tab. 3.1) na jej ciepło właściwe.

Tabela 3.1.

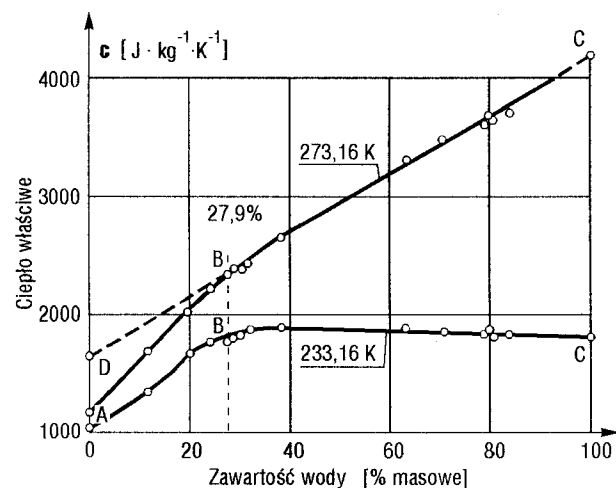
Ciepło właściwe ryb dla $T > T_k$

Nazwa ryby	Wilgotność	Tłuszcz	Temperatura K	Ciepło właściwe $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Zródło
Plamiak	0,836	0,003	293	3726	[29]
	0,780			3433	[15]
Dorsz	0,803		293	3685	[29]
	0,782			3714	[2]
	0,780			3726	[2]
	0,780	0,0861		3433	[15]
Karmazyn	0,791			3600	[2]
Sandacz	0,784		273	3538	[33]
Karp	0,780		293	3630	[7]
	0,752			3689	[2]
Jesiotr	0,741	0,2158		3643	[2]
Łosoś	0,730	0,0540	273—300	3517	[7]
Tuńczyk	0,700			3182	[15]
Albakora	0,673	0,073	298	3090	[26]
Śledź	0,638	0,200	272—303	3350	[6]
Gromadnik	0,635			3420	[7]

Z tabeli 3.1 widać, że większa wilgotność powoduje wzrost ciepła właściwego ryb. Jest to wzrost liniowy i np. dla dorsza o $0,61 < m < 0,81$ i $T > T_k$:

$$c = 1671 + 2250 m \quad (3.1)$$

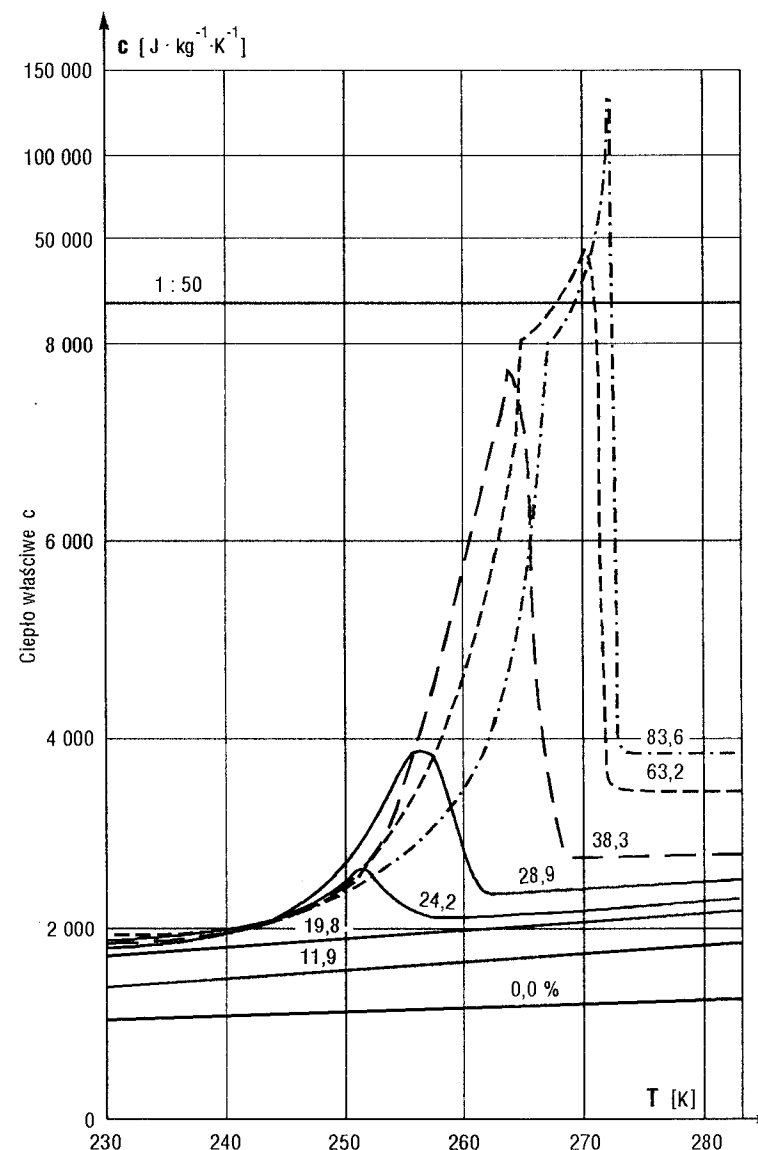
Riedel, w celu wyjaśnienia charakteru zależności ciepła właściwego od wilgotności, przeprowadził badania dorsza, wåtłusza i karmazyna [29]. Wyniki badań (rys. 3.1) wykazały, że zależność $c = c(m)$ dla $m < 0,279$ przedstawia krzywa AB i tylko dla wyższych wartości m znajduje zastosowanie zasada addytywności (prosta BC). Riedel [29] uważa, że odcinek krzywoliniowy AB funkcji $c = c(m)$ ma związek ze zmianą ciepła właściwego wody, będącej integralną częścią struktury mięsa ryb i pozostającej w stanie ciekłym nawet przy bardzo niskiej temperaturze.



Rys. 3.1. Ciepło właściwe mięśni ryb w 233 K i 273 K w zależności od zawartości wody [29]

Ciepło właściwe ryb rośnie także ze wzrostem temperatury. Wpływ wilgotności i temperatury na ciepło właściwe 9 gatunków ryb opisano w pracy [6] równaniem:

$$c = 3740 m + 2,5 T - 2,5 T m + 711 \quad (3.2)$$



Rys. 3.2. Ciepło właściwe mięśni wåtłusza z różną zawartością wody (w procentach masowych) w zależności od temperatury [29]

Równanie jest ważne dla $T = 293 - 373$ K i $m = 0,75 - 0,85$. Dla tuńczyka białego (albakory) o wilgotności $m = 0,673$, $f = 0,023$ i w zakresie temperatury $298,15 - 413,15$ K w [26] podano wzór:

$$c = 2108,1 + 3,3448 T; \quad (R = 0,991) \quad (3.3)$$

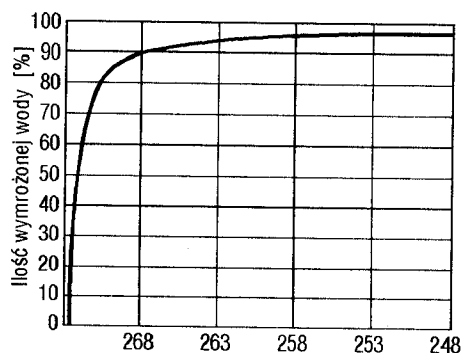
Wpływ zamrażania na ciepło właściwe, na przykładzie mięsa wątlusza [29], pokazuje rysunek 3.2.

Zasadniczą przyczyną dużych zmian ciepła właściwego ryb jest różnica w wartościach ciepła właściwego wody ($4186,8 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) i lodu ($2090 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Reguła addytywności ma także zastosowanie do obliczeń ciepła właściwego ryb podczas procesu zamrażania:

$$c = c_m m (1 - w) + c_l m w + c_n m (1 - m) \quad (3.4)$$

Ilość wody wymrożonej w rybie jest funkcją temperatury [4] (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Ilość wymrożonej wody w mięsie ryb [4]

Przy uwzględnieniu ciepła przemiany wody w lód otrzymuje się wzór na ciepło właściwe podczas zamrażania:

$$c_{ef} = c + L m (w_2 - w_1) \quad (3.5)$$

Do obliczeń technicznych ciepło L przemiany fazowej przyjmuje się jako niezależne od temperatury i równe 335 kJ kg^{-1} [4]. W dokładniejszych obliczeniach natomiast:

$$L = 68,49 - 0,1745 T + 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (3.6)$$

Na podstawie danych doświadczalnych Cziżow [4] sformułował następujący wzór na ciepło właściwe produktów spożywczych w temperaturach niższych od krioskopowych

$$c = E - \frac{F}{T} \quad (3.7)$$

Według [4] na podstawie wyników badań Riedel'a [29] dla dorsza, wątlusza i karmazyna, $E = 0,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $F = 37,22 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Podobną postać ma zmodyfikowany [31] wzór Schwartzberga na ciepło właściwe (wzór 2.5).

Wartości stałych we wzorze (2.5) dla mięsa dorsza (mięsa ryb chudych) są zawarte w tabeli 3.2.

Tabela 3.2.

Wartości stałych w równaniu Schwartzberga dla mięsa ryb chudych

Wilgotność m	Temperatura T_k [K]	D $\text{kJ} \cdot \text{K}^{n-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	c_z $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	n
0,82	272,35	206,41	1,875	1,999
0,75	272,15	174,17	1,180	1,628
0,66	271,20	349,59	1,624	1,934
0,57	270,19	414,07	1,566	1,933

3.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa ryb

Współczynnik przewodzenia ciepła ryb zależy od ich gatunku, temperatury, wilgotności, zawartości tłuszczu i kierunku przepływu ciepła względem włókien.

Przewodność cieplna różnych gatunków ryb, przy takich samych wartościach m oraz T , różni się o około 26% [2]. Różnica wynika przede wszystkim z zastosowania do pomiarów metod o różnych dokładnościach. W przypadkach, gdy współczynnik k różnych gatunków ryb mierzono tą samą metodą, różnica w jego wartościach wynosiła 5%.

Wpływ temperatury na współczynnik przewodzenia ciepła ryb jest niejednoznaczny. Istnieje grupa ryb, (np. dorsz, wiciak atlantycki), dla której współczynnik liniowo wzrasta ze wzrostem temperatury.

Na podstawie wyników prac [2,7,17] dla dorsza i zakresu temperatury 273 K–373 K można sformułować równanie:

$$k = 1,576 \cdot 10^{-3} T - 4,641 \cdot 10^{-4} \quad (R = 0,990) \quad (3.8)$$

W zakresie temperatury 283 K–373 K przewodność cieplna makreli w [2] opisano wzorem:

$$k = 2,486 \cdot 10^{-3} T - 0,2925 \quad (R = 0,989) \quad (3.9)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła drugiej grupy ryb (np. womera) [9,11] rośnie przy wzroście temperatury do około 328 K, a następnie maleje:

$$\text{dla } (283 \text{ K} - 328 \text{ K}), \quad k = 0,001 T + 0,1068 \quad (3.10)$$

$$\text{dla } (328 \text{ K} - 363 \text{ K}), \quad k = -0,01 T + 3,72 \quad (3.11)$$

co tłumaczy się [2,11] charakterem procesu denaturacji białka.

Ze wzrostem wilgotności wzrasta współczynnik przewodzenia ciepła ryb. Zmianę przewodności cieplnej dorsza: $0,61 < m < 0,81$; $T = 273 \text{ K} - 363 \text{ K}$ w [7] opisano równaniem:

$$k = 0,298 + 0,29 m \quad (3.12)$$

Zawartość tłuszczu (ilościowa) w mięsie ryb praktycznie nie wpływa na współczynnik przewodzenia ciepła.

Tabela 3.3.

Wpływ zawartości tłuszczu na współczynnik przewodzenia ciepła ryb [2,9,26]

Ryba	Wilgotność	Zawartość tłuszczu	Współczynnik k
1	2	3	4
Dorsz	0,770	0,003	0,450
Flądra	0,773	0,005	0,416
Sandacz	0,761	0,009	0,470
Łosoś	0,730	0,054	0,500

cd. tabeli 3.3.

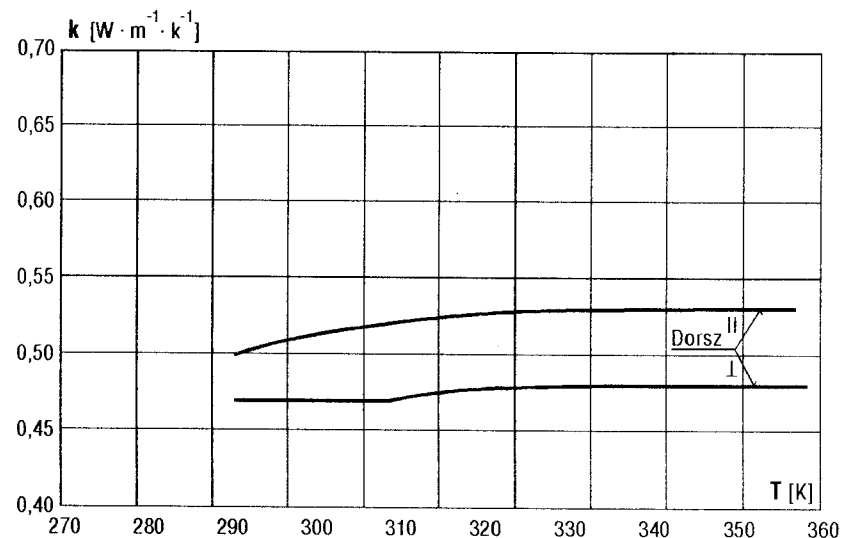
1	2	3	4
Śledź rzeczny	0,747	0,057	0,430
Tuńczyk	0,673	0,073	0,493
Karp	0,752	0,086	0,440
Jesiotr	0,741	0,216	0,430

Badania współczynnika przewodzenia ciepła ryb tłustych (szprota) [17,35] pokazują, że ze wzrostem temperatury następuje spadek jego wartości [35]:

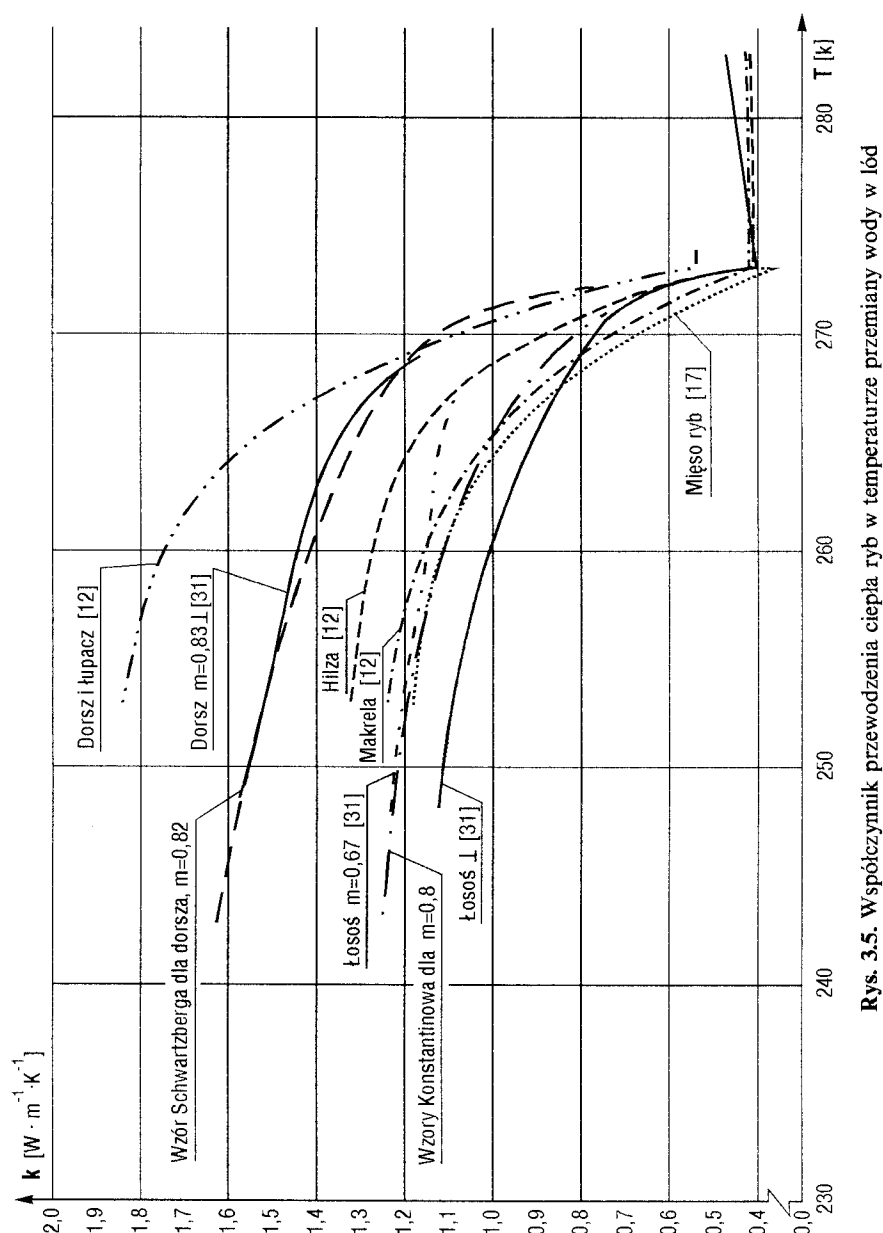
$$k = 1,202 - 2,42 \cdot 10^{-3} T \quad (3.13)$$

Powyższy wzór jest ważny dla temperatury 293 K–346 K.

Wpływ kierunku przepływu ciepła względem włókien na przykładzie mięsa dorsza [2] pokazuje rysunek 3.4. Równoległy do włókien przepływ ciepła stwarza korzystniejsze warunki przewodzenia i odpowiednio większe wartości współczynnika k niż przy przepływie prostopadłym do włókien.



Rys. 3.4. Zależność współczynnika k od kierunku przepływu ciepła względem włókien mięsa [2]



Rys. 3.5. Współczynnik przewodzenia ciepła ryb w temperaturze przemiany wody w lód

Bardziej złożony przebieg ma funkcja $k = k(T)$ dla temperatur niższych od 273,15 K (rys. 3.5).

Przemiana wody w lód powoduje około czterokrotny przyrost wartości współczynnika k , gdyż jego wartość dla lodu (w 263 K) wynosi $2,32 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [14]. Współczynnik przewodzenia ciepła wody w 293 K równa się $0,583 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Największy przyrost (rys. 3.5) przewodności cieplnej występuje w temperaturach od około 272 K do 265 K, tzn. podczas najbardziej intensywnego wymrażania wody w mięsie. Z rysunku widać także ujemny wpływ zawartości tłuszczu na przewodność cieplną. Współczynnik przewodzenia ryb tłustych (łososia) jest mniejszy o 35–50% (dla 248 K) niż ryb chudych (dorsza).

Zmiana współczynnika przewodzenia ciepła podczas zamrażania jest podobna do zmiany ciepła właściwego. Zmodyfikowany wzór Schwartzberga dla współczynnika przewodzenia ciepła ryb ma następującą postać [31]:

$$k = k_k + S_k (T_k - T) + (k_1 - k_k) \frac{T_{sw} - T_k}{T_{sw} - T} \quad (3.14)$$

Wartości stałych doświadczalnych w równaniu Schwartzberga dla dorsza i łupacza zawiera tabela 3.4.

Tabela 3.4.

Stałe doświadczalne równania Schwartzberga [31]

Ryba	T_k (K)	k_1 ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	k_k ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	S_k ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$)
Dorsz, $m = 0,82$	272,35	0,523	1,302	0,01206
Łupacz, $m = 0,75$	272,15	0,523	1,550	0,01518

3.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa ryb

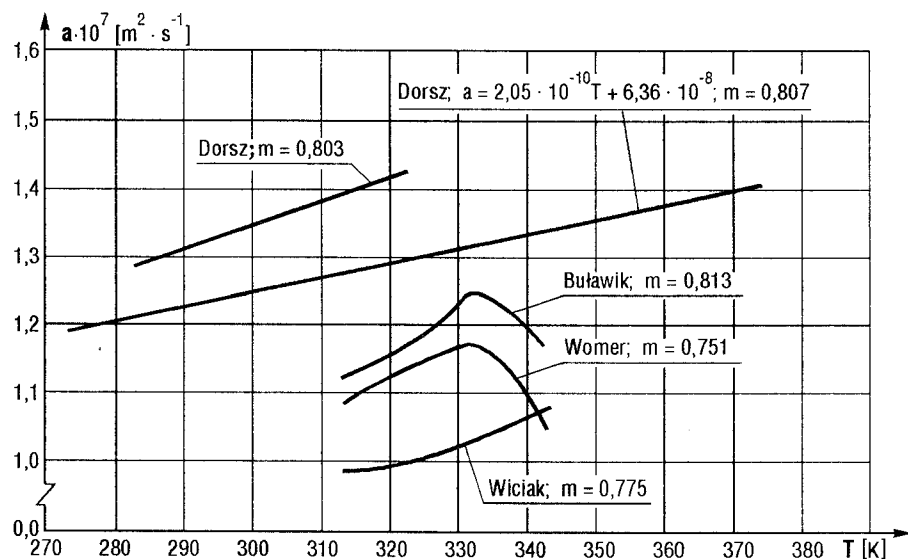
Współczynnik wyrównywania temperatury mięsa ryb zależy od wilgotności, temperatury i przemian fazowych składników.

Dla mięsa różnych gatunków ryb o wilgotności $m = 0,2–0,6$ i zakresu temperatury 288–303 K w [6] podano następującą zależność $a = a(T)$:

$$a \cdot 10^7 = 0,585 + 0,375 m \quad (3.15)$$

Temperatura wpływa niejednoznacznie na współczynnik wyrównywania temperatury (rys. 3.6). Istnieją gatunki ryb (np. dorsz), dla których współczynnik a rośnie z temperaturą. Według [7] dyfuzyjność cieplna dorsza o wilgotności $m = 0,80$ i w zakresie temperatury 275 K – 338 K opisano równaniem:

$$a \cdot 10^8 = 1,05 + 0,039 T \quad (3.16)$$

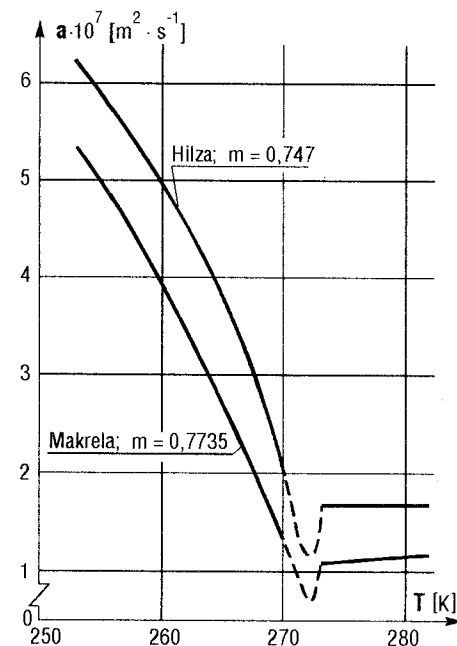


Rys. 3.6. Współczynnik wyrównywania temperatury ryb [9]

Funkcja $a = a(T)$ dla innej grupy ryb (np. womer, ryba latająca [10]) najpierw rośnie do około 328 K, a następnie obserwuje się spadek wartości współczynnika a .

Taki przebieg tłumaczy się procesem denaturacji białek, który dla tej grupy ryb intensywnie przebiega przy wyższych wartościach temperatury [10, 11].

Przemiana fazowa lodu w wodę powoduje duże (rys. 3.7) zmiany współczynnika wyrównywania temperatury. Podczas przemiany następuje kilkudziesięciokrotny spadek wartości współczynnika a [12]. W temperaturze bliskiej krioskopowej funkcja $a = a(T)$ osiąga minimum (linia przerywana). Zakończeniu przemiany odpowiada przyrost wartości współczynnika a do około $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 3.7. Wpływ przemiany wody w lód na współczynnik a ryb [9]

Współczynnik wyrównywania temperatury ryb i wilgotności większej od 0,4 w przedziale temperatury 273 – 373 K może być obliczany ze wzoru Riedel'a [30]:

$$a = [8,83 + (a_{\text{wody}} - 8,83) m] 10^{-8} \quad (3.17)$$

gdzie:

- $8,83 \cdot 10^{-8}$ – obliczeniowa wartość współczynnika a , odpowiadająca $m = 0$,
- a_{wody} – współczynnik a wody dla temperatury obliczeniowej.

3.4. Gęstość mięsa ryb

Gęstość jest zależna od wielu czynników: gatunku ryby, jej stanu (żywa, mrożona), rodzaju obróbki (cała, patroszona), wilgotności, zawartości tłuszczu, temperatury.

Wyniki badań eksperymentalnych [2] pozwoliły wysnuć następujące wnioski:

- gęstość ryby wypatroszonej jest większa od ryby całej, np. dla sandacza [7] wynosi odpowiednio 1080 kg m^{-3} , ponieważ podczas tej obróbki jest usuwany pęcherz pławny;
- gęstość ryby całej mrożonej jest większa od gęstości ryby całej przed zamrożeniem, np. dla sumy [2] gęstości wynoszą odpowiednio: 939 kg m^{-3} i 933 kg m^{-3} ;
- gęstość filetu rybnego ochłodzonego jest większa od filetu zamrożonego, np. dla sandacza [2] wynosi ona 1071 i 1032 kg m^{-3} .

Gęstość mięsa z różnych części ryby jest różna ze względu na odmienny skład chemiczny i konsystencję.

Ze zwiększeniem zawartości tłuszczu w mięsie ryby maleje gęstość mięsa np. przy zawartości tłuszczu w śledziu 0,02 gęstość mięsa śledzia wynosi 1067 kg m^{-3} , a przy $f=0,12$ gęstość zmniejsza się do 1057 kg m^{-3} .

Zwiększenie wilgotności obniża gęstość ryby, np. dla mięsa dorsza w temperaturze 293 K i $0 < m < 1$ w [7] podano zależność:

$$\rho = 1305 - 307 m \quad (3.18)$$

Wyjaśnieniem powyższej zależności jest duża gęstość suchej substancji (odtłuszczonej) mięsa ryb, wynosząca $1500 - 1600 \text{ kg m}^{-3}$.

Gęstość mięsa ryb maleje ze wzrostem temperatury. Na przykład gęstość mięsa dorsza w zakresie temperatury $T = 283 - 353 \text{ K}$ maleje następująco [10]:

$$\rho = 281,97 + 5,39 T - 9,5 \cdot 10^{-3} T^2 \quad (3.19)$$

3.5. Właściwości termofizyczne ryb w blokach

Wartości a, c, d, k ryb w blokach są mniejsze od odpowiednich parametrów mięsa ryb. Mniejsze wartości są wynikiem dużej porowatości bloków. Według [5] współczynnik przewodzenia ciepła mięsa dorsza dla zakresu temperatury 267–259 K zmienia się od 1,06 do $1,13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, dla bloku od 0,585 do $0,637 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Analogicznie, współczynnik wyrównywania temperatury mięsa dorsza w zakresie temperatury 267–259 K wzrasta od $1,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ do $3,58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Współczynnik α bloku rośnie w tych temperaturach od 0,783 do $2,025 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Wymiary badanych bloków $800 \times 250 \text{ mm}$. Ciśnienie formowania 4,9 kPa [5]. Wynika stąd, że współczynniki α, k bloków ryb stanowią około 56% wartości dla mięsa.

Nie stwierdzono [5] wyraźnych różnic w wartościach ciepła właściwego ryb w blokach w zestawieniu z wartościami dla mięsa ryb.

3.6. Właściwości termofizyczne głowonogów

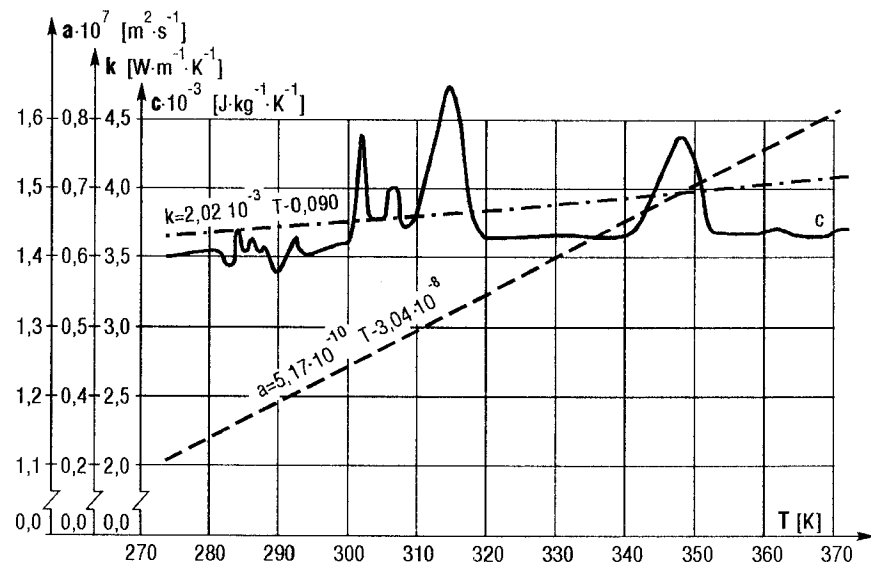
Spośród głowonogów, największe znaczenie gospodarcze mają kalmary. Właściwości termofizyczne kalmarów gatunku *Illex*, o wilgotności $m=0,784$ w zakresie temperatury 273–370 K, pokazuje rysunek 3.8 [17].

Ciepło właściwe rośnie ze wzrostem temperatury, jeżeli nie uwzględniać lokalnych przyrostów, związanych z przemianami fazowymi. Analiza wyników badań ciepła właściwego różnych gatunków kalmarów wskazuje na praktycznie taką samą ich wilgotność:

Illex – $m = 0,797$ [23], *Loligo* – $m = 0,770$ [29], *Ommastrephes bartrami* – $m = 0,803$ [24, 25].

Zmianę wartości ciepła właściwego tych kalmarów w przedziale temperatury 273–370 K można opisać równaniem:

$$c = 3361 + 0,701 T; \quad (R = 0,996) \quad (3.20)$$



Rys. 3.8. Właściwości termofizyczne kalmarów *Illex* [17]

Ciepło właściwe kalmara zamrożonego jest analogiczne jak dla innych produktów spożywczych o zbliżonej wilgotności. Według [13], proces zamrażania kalmarów kończy się w 252 K–255 K. Ciepło właściwe kalmara zamrożonego wynosi 2084 J kg⁻¹ K⁻¹.

Przewodność cieplna mięsa kalmarów zwiększa się (rys. 3.8) [17] ze wzrostem temperatury:

$$k = 2,02 \cdot 10^{-3} T - 0,09 \quad (3.21)$$

Wartości obliczone z powyższego równania znajdują potwierdzenie w wynikach prac [13, 25].

Podczas zamrażania następuje około 3-krotny wzrost współczynnika przewodzenia ciepła kalmarów [23]. Współczynnik przewodzenia ciepła kalmarów o $m = 0,797$ dla około 260 K wynosi 1,85 W m⁻¹ K⁻¹ i wzrasta do około 1,90 W m⁻¹ K⁻¹ dla temperatury 240 K. Według [24] współczynnik k w zakresie temperatury 243–266 K jest niezmienny i wynosi 1,51 W m⁻¹ K⁻¹.

Współczynnik wyrównywania temperatury kalmarów (rys. 3.8) opisano równaniem [17]:

$$a = 5,17 \cdot 10^{-10} T - 3,04 \cdot 10^{-8} \quad (3.22)$$

Podczas zamrażania następuje bardzo szybki wzrost współczynnika a . Według [23], w przedziale temperatury 273–243 K dyfuzyjność cieplna wzrasta od $0,2 \cdot 10^{-7}$ do $6,95 \cdot 10^{-7}$ m² s⁻¹.

Gęstość mięsa kalmara [6] dla $T > T_k$ i $m = 0,800$ wynosi 1060 kg m⁻³, według [13] dla 293 K $\rho = 1042,1$ kg m⁻³, a gęstość mięsa kalmara *Omastrephes bartrami* w 273 K wynosi 1099 kg m⁻³.

3.7. Właściwości termofizyczne mięczaków

Właściwości termofizyczne mięczaków zawiera tabela 3.5.

Tabela 3.5.

Właściwości termofizyczne mięczaków

Nazwa	Wilgotność m	Temperatura K	Właściwości termofizyczne			Literatura
			c	k	ρ lub ρ_u	
Midia	0,787	273–303	3067–3379	0,41–0,63	1020–1011	[25]
Midia czarnomorska		$> T_k$	2203			[6]
Midia-pancerz	0,870	$< T_k$	1045	1,94–2,26	1750	[6]
Ostryga		$> T_k$	3768			[15]
		$< T_k$	1926			[15]
	0,804	$> T_k$	3480			[15]
Ostryga-pancerz		$T < T_k$				[34]
Przegrzebek	0,803	$> T_k$	3730	0,46–0,52	1044–1036	[27]
(cały)		$< T_k$	2010			[27]
Przegrzebek	0,800	$> T_k$	3517	0,46–0,52	1044–1036	[15]
(mięso)		$< T_k$	1840			[15]
Przegrzebek	0,803	275–303	2953–3141	0,46–0,52	1044–1036	[25]

3.8. Właściwości termofizyczne skorupiaków

Ciepło właściwe homara amerykańskiego o wilgotności $m = 0,79$ dla temperatury $> T_k$ wynosi [6] $3475 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Ciepło właściwe homara zamrożonego zmniejsza się do $1842 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Ciepło właściwe homara maleje ze zmniejszeniem wilgotności, dla $m = 0,755$ wynosi $3350 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [21]: Ciepło właściwe mięsa krewetki wynosi $3601 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [6] lub $3660 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ według [3]. Wartość ciepła właściwego krewetki zamrożonej zmniejsza się do $1884 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [6]. Współczynnik przewodzenia ciepła mięsa krewetki w zakresie temperatury $303 \text{ K} - 363 \text{ K}$ (wartość średnia) wynosi $0,566 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. W procesie zamrażania następuje wzrost współczynnika wyrównywania temperatury.

Według [21] dyfuzyjność cieplna krewetki (frakcja 200/300) w 263 K równa się $8,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ i maleje do wartości $1,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ w 282 K . Gęstość krewetki świeżej równa się 1061 kg m^{-3} a gotowanej $1041,9 \text{ kg m}^{-3}$ [3].

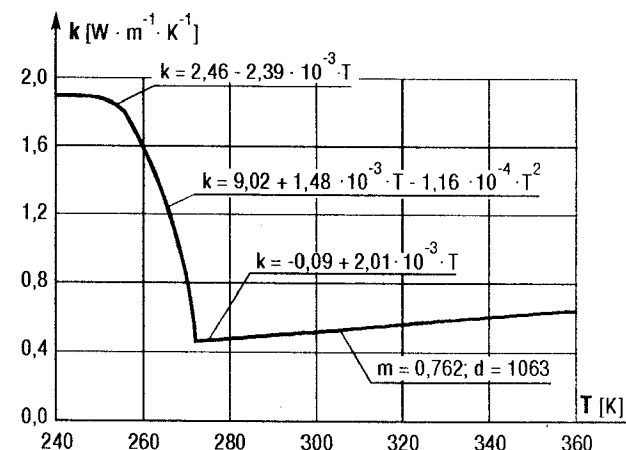
Zależność ciepła właściwego kryla od temperatury ma złożony charakter, zależny nie tylko od jego wilgotności lecz i od innych procesów, np. przemiany wody w lód, topnienia tłuszczów, denaturacji białek [17,18]. Dla temperatury $> T_k$ wartość średnia ciepła właściwego wynosi $3680 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [17,18,32]. Przewodność cieplna kryla zależy od wilgotności, temperatury i przemiany fazowej wody w lód podczas zamrażania. Zmianę przewodności cieplnej kryla surowego-całego o wilgotności $m = 0,762$ w zakresie temperatury $240 \text{ K} - 360 \text{ K}$ pokazuje rysunek 3.9 i opisują równania [19]:

$$\text{od } 240 \text{ K do } 254 \text{ K, } k = 2,46 - 2,39 \cdot 10^{-3} T \quad (3.23)$$

$$\text{od } 255 \text{ K do } 272 \text{ K, } k = 9,02 + 1,48 \cdot 10^{-3} T - 1,16 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (3.24)$$

$$\text{od } 273 \text{ K do } 360 \text{ K, } k = -0,09 + 2,01 \cdot 10^{-3} T \quad (3.25)$$

Dyfuzyjność cieplna kryla jest także zależna od temperatury i przemiany fazowej woda – lód.



Rys. 3.9. Przewodność cieplna kryla [19]

Podczas rozmrażania kryla o: $m = 0,786$, $p = 0,085$, $f = 0,109$ jego współczynnik a maleje według równania (dla temperatury $240 \text{ K} - 272 \text{ K}$) [16, 20]:

$$a = 9,15 \cdot 10^{-6} - 3,80 \cdot 10^{-8} T + 1,67 \cdot 10^{-11} T^2 \quad (3.26)$$

W przedziale temperatury $273 \text{ K} - 373 \text{ K}$ dyfuzyjność cieplna kryla całego surowego ($m = 0,803$) zmienia się według zależności [16]:

$$a = 9,60 \cdot 10^{-8} + 9,47 \cdot 10^{-11} T \quad (3.27)$$

Gęstość kryla waha się w granicach od $1065,5 \text{ kg m}^{-3}$ dla 295 K do 1035 kg m^{-3} dla około 363 K [32]. Griszin [8] wskazuje na przesycenie wilgocią mięsa kryla powyżej wilgotności $m = 0,79$ i proponuje przyjęcie jego gęstości jak dla wody, tzn. 1000 kg m^{-3} .

Literatura

1. Annama T.T., Rao C.V.N. 1974. Studies on thermal diffusivity and conductivity of fresh and dry fish. *Fish. Technol.*, 11, Nr. 1, 28-33.
2. Будина В.Г., Громов М.А. 1977. Теплофизические характеристики рыбы и продуктов из неё. Обзорная информация. Серия: Обработка рыбы и морепродуктов. Выпуск 1. Москва.
3. Chau K.V., Snyder G.V. 1988. Mathematical Model for Temperature Distribution of Thermally Processed Shrimp. *Transactions of the ASAE*. Vol. 31, Mar.-Apr., No. 2, 608-612.
4. Чижов Г.Б. 1979. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. Москва. 50-75.
5. Эрлихман В.И., Ионов А.Г. 1977. Теплофизические характеристики блоков рыбы. *Холодильная техника*. Nr. 6, 34-36.
6. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1980. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание 2-е, дополненное и переработанное. *Пищевая промышленность*. Москва, 129-140.
7. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1980. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание 3-е, дополненное и переработанное. *Агропромиздат*. Москва.
8. Гришин М.А., Звезгинцев А.И. 1986. Определение некоторых характеристик высушиваемого мяса крила. *Известия вузов СССР. Пищевая технология*. Nr. 4, 76-78.
9. Громов М.А., Королева Е.И., Артюхова С.А.: Теплофизические характеристики малоизученных видов промысловых рыб.
10. Королева Е.И., Луденко С.Д. 1989. Изменение теплофизических свойств рыбы при тепловой обработке. *Известия вузов СССР. Пищевая технология*. Nr. 5, 81-82.
11. Королева Е.И., Шуран В.Н. 1989. Теплофизические характеристики рыбы и их использование в тепловых расчетах. Тезисы докладов 2-ой Всесоюзной конференции „Проблемы индустриализации общественного питания страны.” 12-14. XII. 1989. Харьков, 604-605.
12. Kumbhar B.K., Agarwal R.S., Das K. 1981. Thermal properties of fresh and frozen fish. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 4. Nr. 3, 143-145.
13. Квасницкая А.А., Попов В.Б., Виленская Г.Е. 1990. Определение теплофизических характеристик кальмара и трески при замораживании. Прогресс холодильной технологии пищевой продукции из гидробионтов. Атлант НИРО. Калининград. 99-100.
14. Lamb J. 1976. Influence of water on the thermal properties of food. *Chemistry and Industry*. 18. December 1976, 1046-1048.
15. Lewin D.N. 1962. *Plant Handbook Data*. Food Engineering. March. 89-104.
16. Matuszek T., Niesteruk R. 1982. Temperaturleitfähigkeit von Krill im Temperaturbereich von 240 bis 275 K. *Zeitschrift für Lebensmittel-Technologie und-Verfahrenstechnik*, 33 Jahrgang. Juni/July, 252, 254, 259-260, 262.
17. Niespodziński S., Gerlach K., Knyszewski J., Niesteruk R. i inni. 1987. Wyniki badań parametrów ogólnych wybranych surowców pochodzenia morskiego. Sprawozdanie z I etapu pracy. *Politechnika Gdańska. Wydział Budowy Maszyn*. Gdańsk, 21.
18. 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.
19. Niesteruk R., Matuszek T. 1983. Wärmeleitfähigkeit von Krill im Temperaturbereich von 240 bis 360 K. *Intern. Zeitschrift für Lebensmittel-Technologie und-Verfahrenstechnik*. 34 Jahrgang. April/Mai. 183-184, 187-188.

20. Niesteruk R., Matuszek T. 1984. Dyfuzyjność cieplna kryła w zakresie temperatur jego przetwórstwa. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Zeszyt 279*, 125-134.
21. Niesteruk R., Gromow M. 1986. Właściwości cieplne bezkręgowców morskich. *Biuletyn Morskiego Instytutu Rybackiego*. Nr 1-2 (93-94). Gdynia, 43-46.
22. Niesteruk R. 1987. Właściwości termofizyczne ryb. „IV Konferencja maszyn w przemyśle spożywczym”. Właściwości fizyczne produktów spożywczych. Olsztyn. 23-24.09.1987. s. 26.
23. Niesteruk R. 1987. Wärmeeigenschaften von Kalmaren. *Intern. Zeitschrift für Lebensmittel – Technologie und-Verfahrenstechnik*. 38 Jahrgang. Oktober. 494, 496-497.
24. Переверзев В.В., Хухулин Д.Б. 1987. Теплофизические характеристики кальмара бартрама при низких температурах. *Рыбное хозяйство*. Nr. 1, 66-67.
25. Переверзев В.В., Хухулин Д.Б. 1989. Некоторые теплофизические характеристики моллюсков. Процессы и аппараты пищевых производств. Московский институт народного хозяйства. Москва, 160.
26. Perez-Martin R.I., Gallardo J.M., Banga J.R., Casares J. 1989. Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of albacore (*Thunnus alalunga*). *Z. Lebensm. Unters.Forsch.* 525-529.
27. Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P. 1980. A Compilation of Thermal Properties of Foods. *Food Technology*. November. 77-94.
28. Rahman Md. S. 1992. Thermal Conductivity of Four Food Materials as a Single Function of Porosity and Water Content. *Journal of Food Engineering*. 15. 261-268.
29. Riedel L. 1956. Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Seefischen. *Kältetechnik*. 8 Jahrgang. Heft. 12, 374-377.
30. Riedel L. 1969. Temperaturleitfähigkeitsmessungen an wasserreichen Lebensmitteln. *Kältetechnik-Klimatisierung*. 21 Jahrgang. Heft 11. 315-317.
31. Succar J., Hayakawa K-i. 1983. Empirical Formulae for Predicting Thermal Physical Properties of Food at Freezing or Defrosting Temperatures. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, 16. 326-331.
32. Suzuki M., Kobayashi T., Yanagimoto M. 1979. Thermal Characteristics of Antarctic Krill, *Euphausia superba*. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 45(6), 745-751.
33. Терентьев А.В. 1969. Основы комплексной механизации обработки рыбы. Пищевая Промышленность. Москва.
34. Tulshian N., Wheaton F. 1986. Oyster (*Crassostrea Virginica*) Shell Thermal Conductivity: Technique and Determination. *Transactions of the ASAE*. Vol 29 (2): March-April, 626-632.
35. Верболоз Е.И., Орлов В.В. 1990. Изменение теплофизических характеристик шпрот и шпротного паштета при их термообработке. Машины, агрегаты, процессы и аппараты пищевой технологии. Ленинград. Технол. Институт Холод. Пром. Ленинград. 92-94.

4. MLEKO I PRODUKTY MLECZNE (wraz z masłem)

4.1. Ciepło właściwe mleka

Ze wzrostem temperatury rośnie ciepło właściwe mleka. Według [5] w zakresie temperatury 273 K – 358 K ciepło właściwe mleka o zawartości tłuszczu $f = 0,032$ zmienia się według wzoru:

$$c = 444 + 609,56 \ln T \quad (4.1)$$

Dla wyższych wartości temperatury Bertsch [4] zaproponował dwa równania: **mleko chude**, $T = 325,15 \text{ K} - 407,15 \text{ K}$,

$$c = 2,814 T + 3055 \quad (4.2)$$

mleko pełne ($f = 0,04$), $T = 326,15 \text{ K} - 416,15 \text{ K}$,

$$c = 2,976 T + 2879 \quad (4.3)$$

Większa zawartość tłuszczu obniża ciepło właściwe mleka [26]:

$$c = 1,51 T - (3982 - 6,24 T) f + 3519,5 \quad (4.4)$$

Wzór (4.4) jest ważny dla $T = 303 \text{ K} - 353 \text{ K}$ i $f = 0 - 0,80$.

Większa koncentracja n (masowa) suchej masy (zagęszczenie mleka) obniża jego ciepło właściwe, Kimenow [20] dla $T = 273 \text{ K} - 333 \text{ K}$ i $0,1 \leq n \leq 0,4$ podaje formułę:

$$c = 4174,8 - 7368,3 n - 16,6 n T + 0,037 T \quad (4.5)$$

Również cukier (s) obniża ciepło właściwe mleka. Ciepło właściwe chudego i pełnego mleka zagęszczonego z cukrem w zakresie temperatury $303 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$, $0 < s < 1$, $0 < f < 1$ i $0 < nf < 1$ opisane jest [16] równaniem:

$$c = 4187 - (4420 - 6,4 T) f - (6361 - 13,3 T) nf - (3997 - 3,56 T) s \quad (4.6)$$

4.2. Współczynnik przewodzenia ciepła mleka

Współczynnik przewodzenia ciepła mleka rośnie ze wzrostem temperatury. Według [11], współczynnik przewodzenia ciepła mleka o zawartości tłuszczu $f = 0,016 - 0,04$ opisany jest równaniem

$$k = 0,19 + 1,2 \cdot 10^{-3} T \quad (4.7)$$

Wzór jest ważny dla zakresu temperatury 293 K–353 K. Według [11] zmiana zawartości tłuszczu od 0,016 do 0,40 w rzeczywistości nie wpływa na przewodność cieplną mleka.

Ze zwiększeniem masy suchej w mleku zagęszczonym maleje jego przewodność cieplna. Dla zakresu temperatury $293 \text{ K} < T < 333 \text{ K}$ obowiązuje wzór:

$$k = -0,519 + 1,9 \cdot 10^{-3} T - 0,46 (f + nf) \quad (4.8)$$

4.3. Współczynnik wyrównywania temperatury mleka

Współczynnik wyrównywania temperatury mleka rośnie ze wzrostem temperatury (tab. 4.1), [11].

Tabela 4.1.

Współczynnik wyrównywania temperatury mleka $a \cdot 10^7 \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$

Zawartość tłuszczu	Temperatura T [K]				
	273	293	313	333	353
0,016	1,26	1,34	1,40	1,46	1,51
0,040	1,28	1,35	1,42	1,48	1,53

Większa zawartość suchej masy w mleku zagęszczonym powoduje obniżenie jego (tab. 4.2) [11] dyfuzyjności cieplnej.

Tabela 4.2.

Wpływ zawartości suchej masy na dyfuzyjność cieplną mleka, $a \cdot 10^7 \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$

Zawartość suchej masy	Temperatura T [K]			
	283	303	323	343
0,16	1,33	1,42	1,50	1,57
0,20	1,25	1,31	1,37	1,43
0,30	1,25	1,25	1,29	1,36

4.4. Gęstość mleka

Gęstość mleka jest zależna od wielu parametrów. Gęstość maleje ze wzrostem temperatury i zawartości tłuszczu w mleku. Dla przedziału temperatury $283 \text{ K} < T < 343 \text{ K}$ i zawartości tłuszczu $f < 0,1$, na podstawie analizy kilku prac, w [11] podano wzór:

$$\rho = 1166 - 0,45 T - 1,46 f T + 321,6 f \quad (4.9)$$

Dla wyższej temperatury ($65 - 140^\circ\text{C}$) w [3] jest ważne następujące równanie:

$$\rho = - 2,307 \cdot 10^{-3} T^2 + 0,9945 T + 940,91 - f(- 4,78 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,0356 \cdot T - 5,246) \quad (4.10)$$

Ze zwiększeniem suchej masy w mleku wzrasta [11] jego gęstość:

$$\rho = 1019 + 1,05 n \quad (4.11)$$

lub dla mleka zagęszczonego z cukrem [16]:

$$\rho = 1152 - 0,51 T - f(63 + 0,08 T) + n f(323 + 0,17 T) + s(630 - 0,22 T) \quad (4.12)$$

Wzór jest ważny dla $303 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$, $0 < n f < 1$, $0 < f < 1$, $0 < s < 1$.

Gazy zawarte w mleku wpływają na jego gęstość. Gęstość mleka bezpośrednio po udoju (zawartość gazów 0,0712) była równa [32] $1031,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Po dwóch godzinach od udoju zawartość gazów zmniejszyła się do 0,0583, natomiast gęstość wzrosła do $1031,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Sterylizacja, pasteryzacja i homogenizacja (do ciśnienia $20,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) nie wpływają na gęstość mleka [11].

4.5. Ciepło właściwe śmietany

Ciepło właściwe śmietany wzrasta ze wzrostem temperatury, maleje natomiast ze wzrostem zawartości tłuszczu. Ilustrują to równania:

$$c = 3529 + 1,382 T - f(4330 - 7,12 T) \quad (4.13)$$

dla $f = 0,3 - 0,83$, $T = 313 \text{ K} - 363 \text{ K}$, [16]

$$c = (154,88 + 5,88 T) f + (3915 + 1,46 \cdot T)(1 - f), \quad (4.14)$$

dla temperatury od 310 K do 353 K [31].

Wzory mają dwa ograniczenia. Pierwszym jest temperatura (310–313 K), w której nie ma fazy twardej tłuszczu. Drugim ograniczeniem jest zawartość tłuszczu (wzór 4.13). Badanie [25] wpływu zawartości tłuszczu na właściwości termofizyczne śmietany wykazało, że funkcja $c = c(f)$ jest malejąca dla $0,03 < f < 0,70$:

$$c = 3912 - 2834 f \quad (4.15)$$

Dla $f > 0,70$ ciepło właściwe śmietany jest w zasadzie niezmiennie (wynosi $2099 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), co według [25] jest związane z umocnieniem kuleczek tłuszczowych i ustanowieniem kontaktu między nimi.

4.6. Współczynnik przewodzenia ciepła śmietany

Współczynnik przewodzenia ciepła śmietany zależy przede wszystkim od temperatury i zawartości tłuszczu. Temperatura powoduje wzrost przewodności cieplnej śmietany, natomiast tłuszcz obniża jej wartość [8, 11, 31]. Wpływ temperatury (dla zakresu temperatury 303–353 K) na współczynnik k śmietany (przy $f = \text{idem}$) w [11] opisano równaniem:

$$f = 0,1 \quad k = -0,030 + 1,7 \cdot 10^{-3} T \quad (4.16)$$

$$f = 0,8 \quad k = -0,111 + 1,0 \cdot 10^{-3} T \quad (4.17)$$

4.7. Współczynnik wyrównywania temperatury śmietany

Współczynnik wyrównywania temperatury śmietany, podobnie jak przewodność cieplna, zależy od temperatury i zawartości tłuszczu. Ze wzrostem temperatury rośnie współczynnik a . Większa zawartość tłuszczu obniża dyfuzyjność cieplną śmietany. Dla temperatury 303–353 K zmianę współczynnika wyrównywania temperatury śmietany (przy $f = \text{idem}$) opisują równania [11]:

$$f = 0,1 \quad a \cdot 10^8 = 3,5 + 0,032 T \quad (4.18)$$

$$f = 0,8 \quad a \cdot 10^8 = 0,2 + 0,031 T \quad (4.19)$$

Zmniejszanie się współczynnika a śmietany ze wzrostem zawartości tłuszczu ilustruje równanie (dla $f = 0,03 - 1,00$) [25]:

$$a = 1,366 \cdot 10^{-7} - 5,111 \cdot 10^{-8} f \quad (4.20)$$

4.8. Gęstość śmietany

Gęstość śmietany maleje ze wzrostem temperatury i zawartości tłuszczu. Wpływ wyżej wymienionych parametrów na gęstość śmietany przy $313 \text{ K} < T < 363 \text{ K}$ i $f = 0,30 - 0,83$ [1] pokazuje wzór:

$$\rho = 1185,46 - 73,32 f - 0,52 T - 0,16 f T \quad (4.21)$$

Gęstość śmietany rośnie ze wzrostem wilgotności i suchej substancji odtłuszczonej [11]:

$$\rho = 970,4 + 437 n f \quad (4.22)$$

$$\rho = 924 + 133 m \quad (4.23)$$

Powyższe wzory są ważne dla $T = 283 \text{ K}$, $0,047 < n f < 0,059$.

4.9. Ciepło właściwe twarogu

Ciepło właściwe twarogu zmienia się pod wpływem temperatury, wilgotności, zawartości tłuszczu i odtłuszczonej masy suchej [11, 13, 24, 28]. Wpływ temperatury na ciepło właściwe twarogu jest niejednoznaczny. Według [24], ciepło właściwe chudego twarogu ($f = 0$; $n f = 0,19$) maleje z rosnącymi wartościami temperatury (dla $273 \text{ K} < T < 343 \text{ K}$):

$$c = 4034 - 0,452 T \quad (4.24)$$

Natomiast według [28] ciepło właściwe twarogu chudego ($f = 0$; $m = 0,8$) rośnie z temperaturą (dla $273 \text{ K} < T < 373 \text{ K}$):

$$c = 2196 + 4,77 T \quad (4.25)$$

Ciepło właściwe twarogu tłustego ($f = 0,46$; $nf = 0,24$) [24] wzrasta z temperaturą (w zakresie $273 \text{ K} < T < 343 \text{ K}$):

$$c = 3759 + 0,172 T \quad (4.26)$$

Badania Łatyszewa [28] nad twarogiem półtłustym ($f = 0,09$; $m = 0,73$) i tłustym ($f = 0,18$; $m = 0,65$) nie potwierdzają powyższej zależności. Funkcja $c = c(T)$ ma skomplikowany przebieg, zależny od przemian fazowych różnych składników tłuszczu.

Zależność ciepła właściwego twarogu od wilgotności (przy $T = 293 \text{ K}$) w [13] opisano równaniem:

$$c = 1675 + 2512 m \quad (4.27)$$

4.10. Współczynnik przewodzenia ciepła twarogu

Współczynnik przewodzenia ciepła twarogu wzrasta [14] ze wzrostem temperatury i obniżeniem zawartości tłuszczu (tab. 4.3).

Tabela 4.3.

Współczynnik przewodzenia ciepła twarogu

T	m	f	k
291	0,810	0	0,532
291	0,756	0,112	0,444
326	0,810	0	0,603
326	0,756	0,112	0,527
326	0,660	0,180	0,458

4.11. Współczynnik wyrównywania temperatury twarogu

Współczynnik wyrównywania temperatury twarogu wzrasta ze wzrostem temperatury i wilgotności, podobnie jak dla ciekłych produktów mlecznych [14]:

4.12. Gęstość twarogu

Gęstość twarogu zmniejsza się ze wzrostem temperatury i zawartości tłuszczu. Równanie $\rho = \rho(T)$ twarogu chudego ($f = 0$; $nf = 0,19$) [24] w zakresie temperatury $283 \text{ K} - 353 \text{ K}$ ma postać [11]:

$$\rho = 509,05 + 4,607 \cdot T - 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (4.28)$$

dla twarogu tłustego ($f = 0,46$; $nf = 0,24$) [24] obowiązuje zależność:

$$\rho = 511,98 + 4,706 T - 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (4.29)$$

Powyższe równania wyprowadzono dla zawartości powietrza w twarogu równej $0,01 - 0,05$.

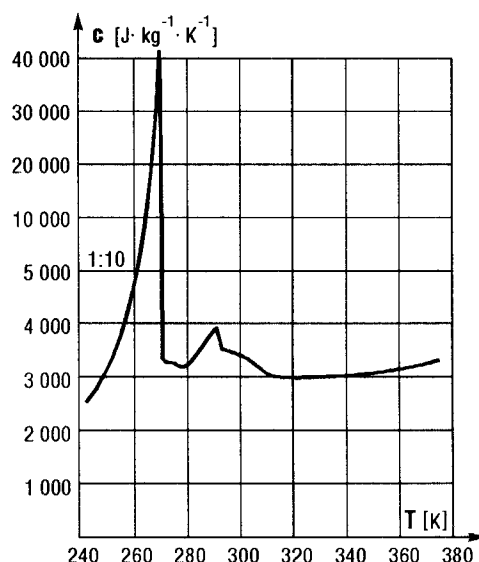
4.13. Ciepło właściwe serów

W literaturze znajdują się nieliczne dane o cieple właściwym serów. Według [11] ciepło właściwe sera tłustego wynosi $2428 \text{ K kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Ciepło właściwe masy do produkcji sera topionego o zawartości tłuszczu $0,135 - 0,405$, suchej substancji $0,316 - 0,575$ i w zakresie temperatury $40 - 100^\circ\text{C}$ w [34] wyraża się następującą zależnością:

$$c = 3773 + 1,2 \cdot T - (1599 + 0,27 T)f - (3016 - 1,1 T)n \quad (4.29)$$

Ciepło właściwe sera Cheddar ($m=0,49$; $f=0,225$) w zakresie temperatury 240-373 K pokazuje rys. 4.1 [29]. Ciepło właściwe w 240 K wynosi około $2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i rośnie ze wzrostem temperatury. W temperaturze 269 K osiąga swoje maksimum ($c_{\max}=41000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) związane z przemianą fazową wody (na rysunku dla $c > 5000$ zmniejszono podziałkę w stosunku 1:10). Po jej zakończeniu wartość ciepła właściwego wynosi około $3300 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Lokalne maksimum w 289–293 K jest następstwem topnienia tłuszczu.



Rys. 4.1. Ciepło właściwe sera Cheddar [29]

4.14. Współczynnik przewodzenia ciepła serów

Przewodność cieplna serów zależy od wielu czynników, między innymi od ich składu, zmian temperatury (nagrzewanie – chłodzenie), porowatości. Podczas badań współczynnika przewodzenia ciepła sera topionego stwierdzono [29] zmianę jego porowatości w zależności od temperatury. Zmiana porowatości sera wpływa na jego przewodność: dla $T=283 \text{ K}–323 \text{ K}$;

$$k = -0,667 + 3,3 \cdot 10^{-3} T \quad (4.30)$$

dla $T=323 \text{ K}–348 \text{ K}$

$$k = -2,313 + 8,4 \cdot 10^{-3} T \quad (4.31)$$

Natomiast podczas chłodzenia sera od 353 K do 283 K współczynnik przewodzenia sera opisano [29] jednym równaniem:

$$k = -0,573 + 3,4 \cdot 10^{-3} T \quad (4.32)$$

4.15. Współczynnik wyrównywania temperatury serów

Zależność współczynnika wyrównywania temperatury serów od temperatury i zawartości tłuszczu pokazuje tabela 4.4 [21].

Dyfuzyjność cieplna serów (także bryndzy i masła) wzrasta ze wzrostem temperatury, przy czym nagrzewanie zachodzi z większą prędkością niż chłodzenie. Tłuszcz utrudnia proces wyrównywania temperatury. Wzrost zawartości tłuszczu powoduje obniżenie wartości współczynnika wyrównywania temperatury serów.

Tabela 4.4.

Współczynnik wyrównywania temperatury serów

Produkt	m	f	d	$a \cdot 10^7$ w temperaturze					
				nagrzewanie			chłodzenie		
				286	300	310	305	295	278
Ser z mleka krowiego	0,50	0,25	1075	1,03	1,11	1,18	10,90	1,038	0,970
Ser z mleka owczego	0,485	0,27	1065	0,995	1,07	1,14	10,40	0,985	0,910

Dla zawartości tłuszczu $f=0,34–1,00$ Kolarow [22] podaje następującą zależność $a = a(f)$:

$$a \cdot 10^8 = 10,2 - 6f \quad (4.33)$$

4.16. Ciepło właściwe masła

Badanie masła nie solonego i solonego, produkowanego różnymi metodami, wykazało, że ciepło właściwe na ogół nie zależy od jego rodzaju. Najważniejszy wpływ na ciepło właściwe masła ma temperatura. Dla zakresu temperatury 275-290 K zależność $c = c(T)$ według [10] ma postać:

$$c = -946 + 13,4 T \quad (4.34)$$

Dla temperatury 313–363 K wzór $c = c(T)$ jest następujący [11]:

$$c = 64 + 7,29 T \quad (4.35)$$

4.17. Współczynnik przewodzenia ciepła masła

Zasadniczy wpływ na współczynnik przewodzenia ciepła masła ma temperatura:

$$k = -0,50 + 2,5 \cdot 10^{-3} T \quad (4.36)$$

dla $T = 278 \text{ K} - 292 \text{ K}$.

Niedostatkim tego wzoru jest bardzo mały zakres temperatury, obejmujący tylko stały stan skupienia. W literaturze nie ma wzorów $k = k(T)$ dla temperatury, w której następuje topnienie poszczególnych grup trójglicerydów.

4.18. Współczynnik wyrównywania temperatury masła

Podobnie jak ciepło właściwe i przewodność cieplna, współczynnik a masła zależy przede wszystkim od temperatury. Jednakże doniesienia [11] o wpływie temperatury na dyfuzyjność cieplną masła są sprzeczne. Według [11] podwyższenie temperatury od 273 K do 293 K wpływa na obniżenie współczynnika wyrównywania temperatury (tab. 4.5); według [21] podwyższenie temperatury wpływa na wzrost współczynnika.

Tabela 4.5.

Współczynnik wyrównywania temperatury masła

Temperatura	275	280	285	290
$a \cdot 10^8$	6,6	5,8	5,2	4,5

4.19. Gęstość masła

Gęstość masła zależy od sposobu jego produkcji, zawartości w nim powietrza i temperatury. Masło wyprodukowane w linii do produkcji ciągłej odznacza się mniejszą gęstością niż otrzymane w urządzeniu pracującym periodycznie [11]. Odpowiednie zależności dla przedziału temperatury 278–283 K są następujące:

$$\rho = 2044 - 4,0 T \quad (4.37)$$

$$\rho = 2072 - 4,0 T \quad (4.38)$$

Wpływ zawartości powietrza na gęstość masła pokazuje tabela 4.6.

Tabela 4.6.

Wzory do określania gęstości masła zawierającego powietrze [11]

Zawartość powietrza ξ [%]	Wzory
0 – 5	$\rho = 945 - 10,0 \cdot \xi \quad (4.39)$
0 – 10	$\rho = 950 - 9,5 \cdot \xi \quad (4.40)$

Wzrost temperatury wpływa na obniżenie gęstości masła [22]:
przy $T = 275 \text{ K} - 293 \text{ K}$;

$$\rho = 814,4 - 0,50 T \quad (4.41)$$

przy $T = 293 \text{ K} - 308 \text{ K}$;

$$\rho = 757,6 - 0,73 T \quad (4.42)$$

4.20. Ciepło właściwe mleka w proszku

Ciepło właściwe mleka w proszku jest funkcją temperatury, wilgotności i sposobu produkcji [36]. Wzrost temperatury powoduje przyrost ciepła właściwego proszku. Zmianę ciepła właściwego proszku mlecznego ($f=0,18$; $p=0,22$; $s=0,52$; $m=0,035$) otrzymanego w drodze suszenia walcowego, w zakresie temperatury $294 - 358 \text{ K}$, opisano równaniem [36]:

$$c = 1365,75 + 0,452 T \quad (4.43)$$

Ciepło właściwe proszku mlecznego ($f=0,18$; $p=0,26$; $s=0,47$; $m=0,03$) otrzymanego w suszarce rozpyłowej (w tym samym zakresie temperatury) opisuje równanie:

$$c = 1380,34 + 0,418 T \quad (4.44)$$

Według [10] ciepło właściwe proszku mleka odtłuszczonego ($m=0,022$) w temperaturze $293-313 \text{ K}$ liczy się ze wzoru:

$$c = -3103 + 15 T \quad (4.45)$$

Porównanie wzorów (4.43) i (4.45) wskazuje, że przy jednakowej temperaturze ciepło właściwe mleka pełnego w proszku jest większe niż mleka odtłuszczonego w proszku. Jest to wynik wyższej wartości ciepła właściwego tłuszczu mlecznego niż suchej substancji odtłuszczonej. Według [10] ciepło właściwe tłuszczu mlecznego w 313 K wynosi $2094 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, natomiast suchej substancji odtłuszczonej tylko $1620 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Z analizowanych wzorów wynika także, że ciepło właściwe proszku mleka odtłuszczonego silniej zależy od temperatury niż ciepło proszku z dużą zawartością tłuszczu.

4.21. Współczynnik przewodzenia ciepła mleka w proszku

Na współczynnik przewodzenia ciepła mleka w proszku największy wpływ mają: temperatura, wilgotność i gęstość nasypowa (porowatość). Ze wzrostem temperatury liniowo wzrasta [6, 7, 12, 18, 35] przewodność cieplna mleka w proszku (przy $\rho_u = \text{idem}$). MacCarthy [7] w wyniku badań proszku mleka odtłuszczonego w przedziale $283 - 333 \text{ K}$ otrzymał następujące równania $k = k(T)$ (przy $\rho_u = \text{idem}$) dla:

$$\begin{aligned} \rho_u &= 292; \quad f = 0,0015 - 0,0030; \quad m = 0,014, \\ k &= -0,177 + 7,51 \cdot 10^{-4} T \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \rho_u &= 577; \quad f = 0,0010 - 0,0033; \quad m = 0,042, \\ k &= -0,1065 + 5,80 \cdot 10^{-4} T \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \rho_u &= 724; \quad f = 0,0010 - 0,0045; \quad m = 0,040, \\ k &= -0,1259 + 7,28 \cdot 10^{-4} T \end{aligned} \quad (4.48)$$

Liniowa zależność $k = k(T)$ może nie obowiązywać w wyższych temperaturach [35], gdzie coraz ważniejszą rolę odgrywa promieniowanie. Wpływ promieniowania na przewodność cieplną mleka w proszku jest mały ze względu na bardzo małe (w przybliżeniu $150 \mu\text{m}$) wymiary cząsteczek. Dla tak małych cząsteczek wymiana ciepła w wolnych przestrzeniach porów w drodze konwekcji naturalnej jest także pomijalna. Zwiększenie wilgotności mleka w proszku powoduje wzrost jego przewodności cieplnej przy $\rho_u = \text{idem}$. Współczynnik przewodzenia ciepła w $T = 333 \text{ K}$ proszku mleka pełnego o wilgotności $m = 0,024 - 0,15$ jest opisany [12] równaniem:

$$k = 0,172 + 0,024 m \quad (4.49)$$

natomiast proszku mleka odtłuszczonego ($m = 0,02 - 0,12$):

$$k = 0,18 + 0,018 m \quad (4.50)$$

Porównanie powyższych wzorów wskazuje na większą przewodność cieplną mleka odtłuszczonego w proszku niż mleka pełnego w proszku, przy jednakowych wartościach ρ_u i m . Większa zawartość tłuszczu w mleku pełnym w proszku wpływa na obniżenie współczynnika przewodzenia ciepła.

Zwiększenie gęstości nasypowej wpływa na zwiększenie współczynnika przewodzenia ciepła mleka w proszku [6, 7, 12, 23].

Mleko w proszku jest rozpatrywane jako układ dwukomponentowy, ciało stałe-powietrze. Powietrze jest bardzo złym przewodnikiem ciepła ($0,035 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ w 313 K [6]). Natomiast cząstki stałe produktów spożywczych mają przewodność cieplną wielokrotnie wyższą od powietrza. Współczynnik przewodzenia ciepła takiego układu będzie tym większy, im mniej będzie w nim powietrza (mniejsza porowatość ε). Wpływ porowatości ε i temperatury na przewodność cieplną proszków mleka według [33] ilustrują poniższe zależności:

- mleko odtłuszczone, $T = 293 \text{ K} - 323 \text{ K}$, $0,38 \leq \varepsilon \leq 0,63$,

$$k = 0,1278(1 - 0,96\varepsilon)(-0,50 + 5,5 \cdot 10^{-3} T) \quad (4.51)$$

- mleko pełne, $T = 303 \text{ K} - 323 \text{ K}$, $0,41 \leq \varepsilon \leq 0,55$,

$$k = (0,153 - 0,156\varepsilon)(-0,420 + 5,2 \cdot 10^{-3} T) \quad (4.52)$$

- mleko instant, rozdrobnione, $T = 303 \text{ K} - 323 \text{ K}$, $0,36 \leq \varepsilon \leq 0,58$,

$$k = (0,151 - 0,148\varepsilon)(-0,803 + 6,6 \cdot 10^{-3} T) \quad (4.53)$$

- mleko instant, granulowane, $T = 303 \text{ K} - 323 \text{ K}$,

$$k = 0,165(1 - 0,986\varepsilon)(-0,584 + 5,8 \cdot 10^{-3} T) \quad (4.54)$$

4.22. Współczynnik wyrównywania temperatury mleka w proszku

W literaturze spotyka się nieliczne dane o współczynniku wyrównywania temperatury mleka w proszku. Podawane wartości współczynnika a różnią się między sobą o 330%. Gromow [11] na podstawie danych o cieple właściwym, przewodności cieplnej i gęstości obliczył (tabela 4.7) wartości współczynnika a

mleka pełnego w proszku i odtłuszczonego w temperaturze 333 K dla zakresu gęstości nasypowej $\rho_u = 450 - 700 \text{ kg m}^{-3}$.

Tabela 4.7.

Współczynnik wyrównywania temperatury mleka w proszku

Produkt	Współczynnik $a \cdot 10^7$			
	450	500	600	700
Mleko pełne	2,20	2,40	2,66	—
Mleko odtłuszczone	2,80	2,63	2,50	2,39

Jednocześnie w tej samej pracy autor podaje, że współczynnik a mleka pełnego w proszku ($\rho_u = 600$) wynosi $1,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, a mleka wysuszonego rozpyłowo $1,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Według [33] współczynnik wyrównywania temperatury mleka odtłuszczonego w proszku dla temperatury 293,7 K – 302,9 K ($\rho_u = 523 - 671$) równa się $(0,869 - 0,864) 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

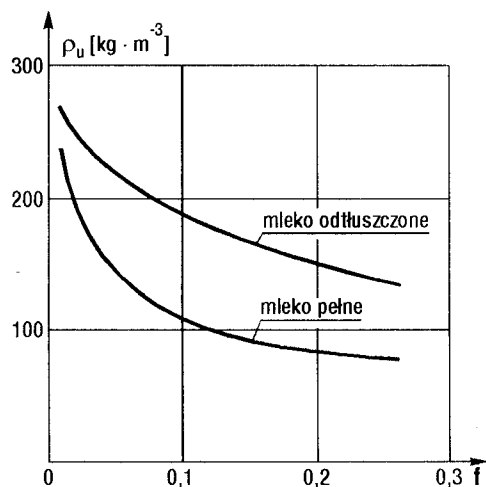
4.23. Gęstość mleka w proszku

Gęstość mleka w proszku jest zależna od gęstości poszczególnych cząstek i sposobu ich ułożenia w warstwie [12]. Gęstość mleka pełnego w proszku zależy ponadto od jego składu chemicznego i przede wszystkim od zawartości tłuszczu (rys. 4.2), którego gęstość jest wyraźnie mniejsza ($\rho = 918 - 930$) od pozostałych składników (tab. 4.8).

Tabela 4.8.

Gęstość składników mleka w proszku [12] w 288 K – 293 K

Składnik	Gęstość ρ (kg m^{-3})
Tłuszcz	918 – 927
Białka	1393 – 1448
Cukry	1592 – 1628
Sole	2617 – 3098



Rys. 4.2. Wpływ zawartości tłuszczu na gęstość mleka w proszku [12]

Zwiększenie wilgotności wpływa na wzrost [12] gęstości nasypowej proszku mleka (tab. 4.9).

Tabela 4.9.

Wpływ wilgotności na gęstość nasypową ρ_u mleka w proszku

Mleko	Wilgotność m			
	0,025	0,050	0,100	0,150
Pełne	1050	1040	1200	1280
Odłuszczone	1115	1113	1113	1200

4.24. Ciepło właściwe serwatki

Ciepło właściwe serwatki jest liniową funkcją temperatury T i zawartości suchej masy [2, 9, 15, 17, 27, 30]. Ciepło właściwe rośnie ze wzrostem temperatury, natomiast maleje ze wzrostem zawartości suchej masy [17, 27, 30]. W literaturze obserwuje się bardzo dużą zgodność (różnice nie przekraczają 4%) wartości ciepła właściwego w zależności od T i n . Według [20] dla $203 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K}$; $0,1 \leq n \leq 0,4$ powyższa zależność jest następująca:

$$c = 5380 - 4,38 T - 11618 n + 25,9 n T \quad (4.55)$$

Gromow [15] na podstawie [27] podaje dla serwatki nie pasteryzowanej i dla $273 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$; $0 < n < 0,45$ wzór:

$$c = 4216 - 5130 n + 9,2 n T \quad (4.56)$$

według [9] dla $276 - 353 \text{ K}$ i $n = 0,069 - 0,265$:

$$c = 4216 + (-5133 + 9,2 T) n \quad (4.57)$$

Podobna zależność ciepła właściwego od temperatury i zawartości substancji stałej jest właściwa dla $T < 273,15 \text{ K}$. Na podstawie [2] dla zakresu temperatury $238 - 268 \text{ K}$ i $n = 0,028 = \text{idem}$. opracowano następujący wzór:

$$c = -3428 + 21,2 T \quad (R = 0,987) \quad (4.58)$$

4.25. Współczynnik przewodzenia ciepła serwatki

Podobnie jak ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła serwatki rośnie ze wzrostem temperatury i obniżeniem zawartości suchej masy. Zmianę współczynnika k serwatki zagęszczanej w aparacie próżniowym w zależności od T , n opisano [4] wzorem:

$$k = 0,259 - 1,427 n + 1,186 \cdot 10^{-3} T + 2,657 \cdot 10^{-3} n T \quad (4.59)$$

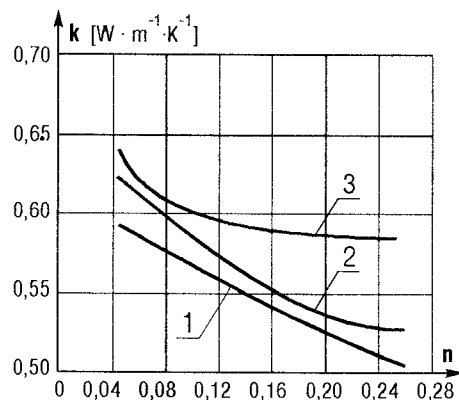
dla $293 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K}$; $0,1 \leq n \leq 0,4$.

Według [30] przewodność cieplna koncentratu białkowego serwatki twarogowej otrzymanego metodą ultrafiltracji opisuje równanie:

$$k = 0,4267 + 6,93 \cdot 10^{-4} T - 2,155 n + 4,5 \cdot 10^{-3} T n + 1,18 n^2 \quad (4.60)$$

dla $293 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K}$; $0,046 \leq n \leq 0,248$.

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła koncentratu białkowego od wartości suchej masy ma złożony [17] charakter. Przy jego podgrzewaniu do temperatury 313 K następuje denaturacja białek. W jej następstwie, przy dużej koncentracji suchej masy, następuje (rys. 4.3) stabilizacja przewodności cieplnej koncentratu.



Rys. 4.3. Współczynnik przewodzenia ciepła koncentratu białkowego: 1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 333 K

4.26. Współczynnik wyrównywania temperatury serwatki

W literaturze nie spotyka się danych eksperymentalnych o dyfuzyjności cieplnej serwatki. Wartość współczynnika a serwatki wynosi $1,28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [11]. Współczynnik wyrównywania temperatury rośnie ze wzrostem T i zmniejszaniem się zawartości suchej masy [15].

4.27. Gęstość serwatki

Gęstość serwatki maleje ze wzrostem temperatury. Natomiast zwiększenie w niej suchej masy powoduje wzrost gęstości. Gęstość serwatki [15] (na podstawie [27]) poleca się obliczać z następujących wzorów:

serwatka nie pasteryzowana, $293 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$, $0,05 < n < 0,70$,

$$\rho = \rho' + 400 n \quad (4.60)$$

serwatka pasteryzowana (w 364 K w czasie 15–20 minut), $293 \text{ K} < T < 353 \text{ K}$, $0,05 < n < 0,40$,

$$\rho = \rho'' + 500 n \quad (4.61)$$

Wartości stałych ρ' i ρ'' zawiera tabela 4.10 [15].

Tabela 4.10.

Wartości stałych ρ' i ρ'' w równaniach

Stałe	Temperatura, K						
	293	303	313	323	333	343	353
ρ'	1003	1000	995	992	987	981	974
ρ''	992	990	985	980	975	970	967

Wzory wskazują, że przy jednakowych wartościach n , T , gęstość serwatki pasteryzowanej jest większa niż serwatki surowej.

Wzór zawierający wpływ obu parametrów na gęstość serwatki podaje Kime-now [20]:

$$\rho = 1112 + 520,4 n - 0,404 T - 0,357 n T \quad (4.62)$$

Wzór jest ważny dla $0,1 \leq n \leq 0,4$ i $293 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K}$.

Wartości ρ otrzymane z powyższych wzorów nie różnią się w zasadzie między sobą (różnice nie przekraczają 1%).

4.28. Równania uniwersalne opisujące właściwości termofizyczne ciekłych produktów mlecznych

Równania podane w tym rozdziale najczęściej dotyczą jednego produktu, małego zakresu temperatury, małej zawartości tłuszczu, suchej masy bądź suchej masy beztłuszczowej. Zależności najczęściej nie można wykorzystać do ustalenia właściwości produktów zagęszczonych otrzymywanych z mleka pełnego i odtłuszczonego. Przy ustalaniu tych równań ciekłe produkty mleczne są mie-

szaniną dwukomponentową składającą się z plazmy i tłuszczu mlecznego.

Celowe staje się opracowanie równań ważnych dla mleka, śmietany, serwatki i produktów zagęszczonych w zależności od podstawowych parametrów i w szerokim zakresie ich zmienności. Przy wyprowadzaniu równań ciepła właściwego i gęstości, ciekłe produkty mleczne rozpatruje się jako mieszaninę trójskładnikową składającą się z tłuszczu, wody i suchej masy beztłuszczowej [30]. Zależności ciepła właściwego od temperatury tłuszczu mlecznego i suchej substancji beztłuszczowej według [11] dla zakresu temperatury $303\text{ K} < T < 353\text{ K}$ mają postać:

$$c_f = -33 + 6,40 T \quad (4.63)$$

$$c_{nf} = -2174 + 13,26 T \quad (4.64)$$

Powyższe wzory pozwalają na sformułowanie następującego wzoru na ciepło właściwe ciekłych produktów mlecznych dla $303\text{ K} < T < 353\text{ K}$, $0 < f < 1$, $0 < nf < 1$:

$$c = 4187 - (4220 - 6,4 T)f - (6361 - 13,3 T)nf \quad (4.65)$$

Ze wzoru widać, że wraz z podwyższeniem temperatury, zmniejszeniem tłuszczu i suchej substancji beztłuszczowej rośnie ciepło właściwe produktu mlecznego.

Zależność gęstości od temperatury wymienionych komponentów produktów mlecznych opisują [11] równania:

$$\rho_f = 1086 - 0,59 T \quad (4.66)$$

$$\rho_{nf} = 1475 - 0,34 T \quad (4.67)$$

$$\rho_m = 1149 - 0,51 T \quad (4.68)$$

Równanie $\rho = \rho(T)$ ciekłych produktów mlecznych dla $303\text{ K} < T < 353\text{ K}$, $0 < f < 1$, $0 < nf < 1$ ma postać:

$$\rho = 1149 - 0,51 T - (63 + 0,08 T) + (323 + 0,17 T)nf \quad (4.69)$$

Gęstość ciekłych produktów mlecznych maleje z podwyższeniem temperatury i zawartości tłuszczu, natomiast rośnie ze zwiększeniem masy beztłuszczowej.

Wzór uniwersalny do obliczania przewodności cieplnej ciekłych produktów mlecznych (nie zawierających gazów) [30]:

$$k_T = \frac{B \rho_T^{4/3}}{\alpha_T} \quad (4.70)$$

We wzorze B oznacza stałą zależną od zawartości suchej masy w produkcie. Stała B jest niezależna od T , f i rodzaju produktu. Dla ciekłych produktów mlecznych (przy $0 < n < 0,45$) [30]:

$$B \cdot 10^4 = 0,701 - 0,63 n \quad (4.71)$$

Wartości współczynnika asocjacji molekuł wody α_T zawiera tabela 4.11.

Tabela 4.11.

Zależność współczynnika α_T od temperatury [11]

T [K]	273	283	293	303	313	323	333	343	353	363	373
α_T	1,24	1,20	1,16	1,13	1,10	1,07	1,05	1,03	1,01	0,99	0,97

Indeks „ T ” oznacza, że ρ , k i α zależą od temperatury.

Zastosowanie wzoru podstawowego (1.7) oraz wzorów uniwersalnych opisujących ciepło właściwe i gęstość przedstawia następujące równanie na współczynnik wyrównywania temperatury ciekłych produktów mlecznych:

$$a = \frac{B \rho^{1/3}}{\alpha c} \quad (4.72)$$

LITERATURA

1. Андрианов Ю.Р., Твердохлеб Г.В. 1967. Теплофизические показатели сливок различной жирности. Известия вузов СССР. Пищевая технология. Nr. 6, 72-78.
2. Bakshi A.S., Johnson R.M. 1983. Calorimetric Studies on Whey Freeze Concentration. Journal of Food Science, 48, 1279-1282.
3. Bertsch A.J., Bimbenet J.J., Cerf O. 1982. La masse volumique du lait et de cremes de 65°C á 140°C. Le Lait, 62, 250-264.
4. Bertsch A.J. 1982. La chaleur massique du lait entier et de creme de 50°C á 140°C. Le Lait, 62, 265-275.
5. Богданов С., Гочияев Б. 1961. Изучение теплофизических свойств молока. Молочная промышленность, 16, Nr. 6, 16-20.
6. MacCarthy D.A. 1985. Effect of Temperature and Bulk Density on Thermal Conductivity of Spray-Dried Whole Milk Powder: Journal of Food Engineering 4, 249-263.
7. MacCarthy D.A. 1984. The Effective Thermal Conductivity of skim milk powder., In: „Engineering and Food”, Vol. 1. Engineering Sciences in the Food Industry., 527-538.
8. Fernandez-Martin F., Montes F. 1977. Thermal conductivity of creams. Journal of Dairy Research. 44, 103-109.
9. Fernandez-Martin F. 1984. Viscosity and heat capacity of whey retenates from sheep's milk cheese. Journal of Dairy Research, 51, 455-460.
10. Гинзбург А.С. Громов М.А., Красовская Г.И., Уколов В.С. 1975. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие. Пищевая промышленность. Москва.
11. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1980. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Пищевая промышленность. Москва.
12. Громов М.А., 1978. Теплофизические характеристики некоторых молочных продуктов. Молочная промышленность. Nr. 8, 13-18.
13. Громов М.А. 1986. Плотность и удельная теплоемкость творога. Молочная промышленность. Nr. 7, 29-30.
14. Громов М.А. 1986. Теплопроводность и коэффициент температуропроводности творога. Молочная промышленность. Nr. 11, 26-27.
15. Громов М.А. 1987. Теплофизические характеристики молочной сыворотки. Молочная промышленность. Nr. 4, 28-29.
16. Громов М.А. 1987. Теплофизические характеристики сгущенного молока с сахаром. Молочная промышленность. Nr. 12, 17-18.
17. Игнатов В.Е., Полянский К.К., Долинковский В.И. 1987. Теплопроводность концентратов творожной сыворотки. Молочная промышленность. Nr. 10, 18-19.
18. Itoh K. 1982. Thermal Conductivity of Dry Milk. Memories of the Faculty of Agriculture Hokkaido University. Vol. 13, No. 2, 109-117.
19. Kent M., Christiansen K., Haneghem I.A. van., Holz E., Morley M.J., Nesvadba P., Poulsen K. 1984. COST 90 Collaborative Measurements of Thermal Properties of Foods. Journal of Food Engineering 3, 117-150.
20. Кименов Г., Минчев М.С., Раичков Г., Попов Г., Димитров Ч. 1987. Теплофизические характеристики на обезмаслено молоко и сироватка. Хранителнопромышленна наука, год. III, No. 8, 14-18.
21. Коларов К. 1968. Температуропроводность на мягкой млечни продукти. Висш. институт по хранителна и вкусова промышленност-Пловдив. Том. XV, св. I.

22. Коларов К., Грачева Т.В., Попов Г.И. 1989. Физические характеристики на суровины, полуфабрикаты и хранительны продукты. Земиздат. София. 106.
23. 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 Eggs-albumin, Wheat Gluten and Milk Casein. *Agricultural and Biological Chemistry*. 46, (3), 789-794.
24. Konrad H., Rambke K. 1972. Untersuchungen über die wärmetechnischen Eigenschaften von Quark. *Die Nahrung*. 16, 5, 467-471.
25. Лепилкин А., Борисов В. 1966. Влияние содержания жира на теплофизические свойства сливок. *Молочная промышленность*. Nr. 8, 26-30.
26. Лепилкин А., Ноздрин С.И., Зотов В.В. 1977. Зависимость плотности и теплоемкости молока и сливок от температуры. *Известия вузов СССР. Пищевая технология*, Nr. 5, 137-138.
27. Lewicki P.P., Kowalczyk R., Schmidt A. 1978. Właściwości fizyczne serwatki. *Przegląd mleczarski*. Nr. 2, 13-15.
28. Латышев В.П. 1983. Рекомендации по расчетам теплофизических свойств пищевых продуктов. Издание второе, переработанное. Москва, 72-82.
29. Латышев В.П., Цирульникова Н.А. 1987. Исследование теплофизических свойств плавленного сыра. *Холодильная техника*. Nr. 7, 29-33.
30. Niesteluk R., Gromow M.A., Wasilewa L.N. 1987. Uniwersalne równania opisujące właściwości cieplne ciekłych produktów mlecznych. *Przemysł spożywczy*. Nr. 11, 322-324.
31. Пахомов В.Н., Федоров В.Г., Мазуренко А.Г., Иванченко В.В. 1989. Исследование и обобщение теплофизических характеристик мясных и молочных продуктов. Тез. док. 2, Всес. научн. конф. „Проблемы индустр. обществ. питания страны.” Харьков. 12-14 дек., 1989, 602-603.

32. Pijanowski E. 1975. Faktors influencing gas contents in fresh milk. *Acta Alimentaria Polonica*. Vol. 1, Nr. 1, 78-92.
33. Tadano T., Yokoya K. 1977. Studies on Effective Thermal Conductivities of Milk Powders — About Non Fat Dry Milk and Instant Skim Milk. *Bull. Coll. Agr. and Vet. Med., Nihon Univ.*, No. 34, 249-268.
34. Thomareis A.S., Hardy J. 1985. Evolution de la Chaleur Specifique Apparente des Fromages Fondus Entre 40 et 100°C. Influence de Leur Composition. *Journal of Food Engineering* 4, 117-134.
35. Varshney N.N., Ohja T.P. 1974. Thermal conductivity of dried milk baby foods. *The Australian Journal of Dairy Technology-Juny*, 79-84.
36. Varshney N.N., Ohja T.P. 1974. The effect of temperature on the specific heat of dried milk baby foods. *The Australian Journal of Dairy Technology* — December, 193-197.

5. OLEJE, TŁUSZCZE, SPOŻYWCZE, MARGARYNA

5.1. Ciepło właściwe olejów jadalnych

Ciepło właściwe olejów jest funkcją temperatury. Z jej wzrostem rośnie (tab. 5.1) ciepło właściwe. Olej nie rafinowany ma wyższe wartości ciepła właściwego niż olej rafinowany.

Tabela 5.1.

Zależność temperaturowa ciepła właściwego olejów

Olej	Zakres temperatury K	Równanie $c = c(T)$ lub wartość c	Literatura
1	2	3	4
Bawełniany:			
w stanie stałym	173 ÷ 218	$c = -115 + 7,20 T$	(5.1) [3]
nerafinowany	313 ÷ 343	$c = 507 + 4,26 T$	(5.2) [3]
rafinowany	263 ÷ 423	$c = 500 + 4,21 T$	(5.3) [3, 12]
uwodorniony, LJ = 6,5	353 ÷ 543	$c = 1216,6 + 2,66 T$	(5.4) [16]
Kakaowy (z ziaren)	203 ÷ 243	$c = -139 + 6,35 T$	(5.5) [3]
	243 ÷ 263	$c = -1901 + 13,6 T$	(5.6) [3]
Kokosowy	298 ÷ 478	$c = 1549 + 1,99 T$	(5.7) [11]
Kukurydziany	263 ÷ 313	$c = 973,9 + 2,52 T$	(5.8) [3, 10]
	323 ÷ 423	$c = 795 + 3,14 T$	(5.9) [11]
	333	1846	[11]
Lniany	303 ÷ 544	$c = 1017 + 2,91 T$	(5.10) [16]
Oliwkowy, LJ = 96	283 ÷ 323	$c = 1639 + 1,05 T$	(5.11) [3]
Palmowy (z ziaren)	293 ÷ 473	$c = 1632 + 1,81 T$	(5.12) [10]
Rycynowy, LJ = 83	303 ÷ 544	$c = 1360,3 + 2,45 T$	(5.13) [16]
Sezamowy	263 ÷ 393	$c = 1049 + 3,05 T$	(5.14) [12]

1	2	3	4
Słonecznikowy			
nerafinowany	293 ÷ 373	$c = 1031 + 3,02 T$	(5.15) [3]
rafinowany	313 ÷ 343	$c = 551 + 4,19 T$	(5.16) [3, 12]
Sojowy	273 ÷ 423	$c = 1069 + 2,73 T$	(5.17) [6]
Winogronowy (z ziaren)	263 ÷ 393	$c = 771,6 + 2,95 T$	(5.18) [12]

5.2. Współczynnik przewodzenia ciepła olejów jadalnych

Współczynnik przewodzenia ciepła olejów zależy przede wszystkim od temperatury. Oleje roślinne zaliczają się do cieczy zasocjowanych [3, 6], dla których przewodność cieplna zmniejsza się ze wzrostem temperatury [3]. Istnieje więc możliwość obliczania ich współczynnika przewodzenia ciepła z uniwersalnego równania Predwoditelewa-Wargaftika [3]:

$$k = B \rho^{4/3} \quad (5.19)$$

Zależność przewodności cieplnej olejów roślinnych od temperatury zawiera tabela 5.2.

Analiza równań $k = k(T)$ w tabeli 5.2 wskazuje, że ich współczynniki zmieniają się w niewielkich przedziałach. Umożliwia to opracowanie równania uogólnionego, opisującego zmianę przewodności cieplnej olejów roślinnych:

$$k = 0,263 - 2,89 \cdot 10^{-4} T \quad (5.46)$$

Błąd maksymalny określenia tym równaniem współczynnika przewodzenia ciepła olejów w zestawieniu z danymi eksperymentalnymi nie przekracza 13%.

Tabela 5.2.

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła olejów od temperatury

Olej	Przedział temperatury K	Równanie $k = k(T)$	Równanie teoretyczne	Literatura
1	2	3	4	5
Arachidowy	278 ÷ 473	$k = 0,245 - 2,19 \cdot 10^{-4} T$ (5.20)		[19]
Bawełniany rafinowany	273 ÷ 413	$k = 0,261 - 2,56 \cdot 10^{-4} T$ (5.21)		[12]
Gorzycowy	278 ÷ 473	$k = 0,277 - 2,91 \cdot 10^{-4} T$ (5.22)		[19]
Kakaowy (z ziaren)	278 ÷ 473	$k = 0,265 - 2,68 \cdot 10^{-4} T$ (5.23)		[19]
Kokosowy	278 ÷ 473	$k = 0,239 - 2,39 \cdot 10^{-4} T$ (5.24)		[19]
Kolendrowy	278 ÷ 473	$k = 0,219 - 1,73 \cdot 10^{-4} T$ (5.25)		[19]
Kukurydziany	253 ÷ 413	$k = 0,246 - 2,43 \cdot 10^{-4} T$ (5.26)	$k = 0,192 \cdot 10^{-4} (1130 - 0,7011 T)^{4/3}$ (5.27)	[3, 12]
Lniany	273 ÷ 373	$k = 0,246 - 2,43 \cdot 10^{-4} T$ (5.28)		[1]
Lniany farmaceutyczny (BN-6132-07)	293 ÷ 353	$k = 0,271 - 3,12 \cdot 10^{-4} T$ (5.29)		[18]
Oliwkowy	278 ÷ 473 283 ÷ 414	$k = 0,248 - 2,34 \cdot 10^{-4} T$ (5.30)	$k = 0,196 \cdot 10^{-4} (1108,6 - 0,6725 T)^{4/3}$ (5.31)	[12] [3]
Palmowy (z ziaren)	278 ÷ 473	$k = 0,242 - 2,43 \cdot 10^{-4} T$ (5.32)		[19]
Rycynowy	273 ÷ 373	$k = 0,234 - 1,77 \cdot 10^{-4} T$ (5.33)		[1]
Rzepakowy	278 ÷ 473	$k = 0,271 - 2,83 \cdot 10^{-4} T$ (5.34)		[19]
Rzepakowy (BN-79/8852-04)	283 ÷ 353	$k = 0,311 - 4,418 \cdot 10^{-4} T$ (5.35)		[18]
Sezamowy	253 ÷ 413	$k = 0,258 - 2,61 \cdot 10^{-4} T$ (5.36)	$k = 0,1985 \cdot 10^{-4} (1117,7 - 0,68 T)^{4/3}$ (5.37)	[3]

cd. tabeli 5.2.

1	2	3	4	5
Słonecznikowy: nierafinowany rafinowany	298 ÷ 343 278 ÷ 473 293 ÷ 393	$k = 0,339 - 5,70 \cdot 10^{-4} T$ (5.38) $k = 0,245 - 2,29 \cdot 10^{-4} T$ (5.40)	$k = 0,182 \cdot 10^{-4} (1107 - 0,617 T)^{4/3}$ (5.39) $k = 0,186 \cdot 10^{-4} (1127 - 0,688 T)^{4/3}$ (5.41) $k = 0,194 \cdot 10^{-4} (1119,6 - 0,68 T)^{4/3}$ (5.43)	[3] [19] [3] [3]
Sojowy	253 ÷ 413	$k = 0,247 - 2,38 \cdot 10^{-4} T$ (5.42)		
Sojowy (PN-75/A-86908)	283 ÷ 363	$k = 0,362 - 6,17 \cdot 10^{-4} T$ (5.44)		[18]
Winogronowy (z ziaren)	263 ÷ 393	$k = 0,236 - 2,324 \cdot 10^{-4} T$ (5.45)		[18]

5.3. Współczynnik wyrównywania temperatury olejów jadalnych

Współczynnik wyrównywania temperatury olejów jadalnych, podobnie jak przewodność cieplna, maleje ze wzrostem temperatury. Istnieje niewiele równań empirycznych opisujących tę zależność. Według [6] dyfuzyjność cieplna oleju sojowego w przedziale temperatury 273 – 423 K zmienia się następująco:

$$a = 1,633 \cdot 10^{-7} - 1,99 \cdot 10^{-10} T; \quad (R = -0,998) \quad (5.47)$$

Według [3] współczynnik wyrównywania temperatury nierafinowanego oleju słonecznikowego od 298 K do 343 K zmniejsza się zgodnie z równaniem:

$$a = 2,374 \cdot 10^{-7} - 4,8 \cdot 10^{-10} T \quad (5.48)$$

Współczynnik wyrównywania temperatury olejów jadalnych może być określany [3,6,12] z równań (1.7) i (5.19). Równanie uniwersalne dla dyfuzyjności cieplnej ma postać:

$$a = B \frac{\rho^{1/3}}{c} \quad (5.49)$$

Różnica w wartościach eksperymentalnych współczynnika wyrównywania temperatury olejów i obliczonych z powyższego równania nie przekracza [6] 2%. Tabela 5.3 zawiera uogólnione równania dyfuzyjności cieplnej [3,6,7].

Uogólnione równania dyfuzyjności cieplnej olejów jadalnych

Tabela 5.3

Olej	Zakres temperatury T (K)	Równanie $a = a(T)$
1	2	3
Bawełniany	288 ÷ 333	$0,204 \cdot 10^{-4} \frac{(1120 - 0,674 T)^{1/3}}{1238 + 2,55 T}$ (5.50)
Kukurydziany	323 ÷ 423	$0,192 \cdot 10^{-4} \frac{(1130 - 0,701 T)^{1/3}}{795 + 14 T}$ (5.51)
Oliwkowy	283 ÷ 323	$0,196 \cdot 10^{-4} \frac{(1108,6 - 0,6725 T)^{1/3}}{1639 + 1,05 T}$ (5.52)

cd. tabeli 5.3.

1	2	3
Sezamowy	273 ÷ 353	$0,198 \cdot 10^{-4} \frac{(1117,7 - 0,68 T)^{1/3}}{1051 + 3,04 T}$ (5.53)
Słonecznikowy: nierafinowany	298 ÷ 343	$0,186 \cdot 10^{-4} \frac{(1107 - 0,6175 T)^{1/3}}{1031 + 3,025 T}$ (5.54)
rafinowany	298 ÷ 343	$0,186 \cdot 10^{-4} \frac{(1127,4 - 0,688 T)^{1/3}}{551 + 4,19 T}$ (5.55)
Sojowy	273 ÷ 483	$0,194 \cdot 10^{-4} \frac{(1119,6 - 0,680 T)^{1/3}}{1149 + 2,65 T}$ (5.56)

5.4. Gęstość olejów jadalnych

Gęstość olejów jadalnych liniowo maleje z rosnącymi wartościami temperatury (tab. 5.4).

Tabela 5.4.

Gęstość olejów jadalnych

Olej	Zakres temperatury, K	Równanie	Literatura
1	2	3	4
Arachidowy, LJ=97,51	293 ÷ 433	$\rho = 1110,6 - 0,669 T$ (5.57)	[7]
Bawełniany	253 ÷ 423	$\rho = 1121,2 - 0,682 T$ (5.58)	[12]
Kakaowy	283 ÷ 343	$\rho = 1137 - 0,750 T$ (5.59)	[4]
Kokosowy LJ=8,67	313 ÷ 433	$\rho = 1125,3 - 0,697 T$ (5.60)	[7]
Kukurydziany	253 ÷ 423	$\rho = 1119,1 - 0,680 T$ (5.61)	[12]
Oliwkowy	293 ÷ 373	$\rho = 1109 - 0,672 T$ (5.62)	[7]
Palmowy:			
z palmy czerwonej, LJ=51,45	303 ÷ 433	$\rho = 1116,5 - 0,693 T$ (5.63)	[7]
z ziaren palmy, LJ=17,30	303 ÷ 433	$\rho = 1122,2 - 0,693 T$ (5.64)	[7]

cd. tabeli 5.4.

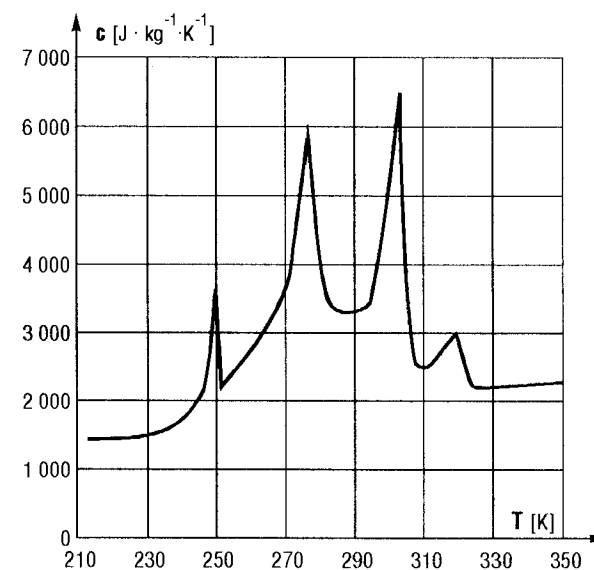
1	2	3	4
Rzepakowy, LJ = 99,3	283 ÷ 433	$\rho = 1103,2 - 0,659 T$ (5.65)	[7]
Sezamowy	253 ÷ 423	$\rho = 1118,2 - 0,682 T$ (5.66)	[12]
Słonecznikowy:			
nierafinowany	253 ÷ 423	$\rho = 1116,2 - 0,682 T$ (5.67)	[12]
rafinowany	253 ÷ 423	$\rho = 1129,1 - 0,693 T$ (5.68)	[12]
Sojowy, LJ = 128	303 ÷ 343	$\rho = 1129,8 - 0,706 T$ (5.69)	[7]
Winogronowy	253 ÷ 423	$\rho = 1118,5 - 0,680 T$ (5.70)	[12]

Z tabeli 5.4 i analizy danych literaturowych [3,4,6,7,18] wynika duża zgodność zmian gęstości olejów jadalnych z rosnącymi wartościami temperatury. Umożliwia to opracowanie równania uogólniającego $\rho = \rho(T)$ dla przedziału temperatury 253–433 K:

$$\rho = 1119,7 - 0,688 T \quad (5.71)$$

5.5. Ciepło właściwe tłuszczów pochodzenia zwierzęcego

Temperatura i skład są najważniejszymi czynnikami zmieniającymi ciepło właściwe tłuszczów spożywczych pochodzenia zwierzęcego. W zależności od wartości temperatury, tłuszcz znajduje się w stanie stałym, topi się lub jest cieczą. Przemiany fazowe są przyczyną skomplikowanego przebiegu funkcji $c = c(T)$ tłuszczów. Rysunek 5.1 pokazuje zależność $c = c(T)$ smalcu [21]. W badanym smalcu [13] wyodrębniono 8 frakcji glicerydów, znacznie różniących się między sobą. W temperaturze pokojowej 3 frakcje trudnotopliwe miały kolor biały i konsystencję stearyny. Pozostałe frakcje były łatwotopliwe, konsystencją przypominały oleje roślinne. Stwierdzono także, że zestalanie poszczególnych frakcji następowało w szerokim przedziale temperatur, natomiast topnienie w bardzo wąskim zakresie temperaturowym [13].



Rys. 5.1. Zależność temperaturowa ciepła właściwego smalcu wieprzowego [13]

W temperaturze niższej od temperatury topnienia ciepło właściwe świeżego tłuszczu wieprzowego wynosi [3] $1340 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [13].

Wartości ciepła właściwego smalcu wieprzowego w zakresie temperatury 243–323 K zawiera tabela 5.5.

Tabela 5.5.

Ciepło właściwe smalcu wieprzowego

Temperatura K	243	253	263	273	283	288	293	298	303	313	323
c $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	1532	1805	2387	4316	3124	2680	2881	4396	5552	3102	2835

Ciepło właściwe ciekłego smalcu wieprzowego zaleca się [3] obliczać z następującego równania:

$$c = -975 + 9,3 T \quad (5.72)$$

Ciepło właściwe łoju wołowego ($m = 0,07$) w stanie stałym (dla $T < 298,5$ K [3]) wynosi $1947 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [20]. Proces topnienia łoju zachodzi w zakresie temperaturowym $298,5 - 319,8$ K [3, 16]. Wartość maksymalna ciepła właściwego waha się od 5520 do $6867 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [3]. Duże różnice w wartościach ciepła są przede wszystkim następstwem różnych proporcji między komponentami trudno- i łatwotopliwymi w badanych próbkach [3]. Wartość średnia ciepła właściwego łoju wołowego ($m = 0,51$) przy nagrzewaniu od 273 K do 373 K [17] wynosi $2890 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Wzrost zawartości wody w łoju powoduje wzrost jego ciepła właściwego [3].

5.6. Współczynnik przewodzenia ciepła tłuszczów pochodzenia zwierzęcego

Współczynnik przewodzenia ciepła tłuszczu wieprzowego przy $T \leq 273$ K maleje ze wzrostem temperatury. Na podstawie danych zawartych w [3] w zakresie temperatury $243 - 273$ K zmianę przewodności cieplnej tłuszczu wieprzowego ($m = 0,031$) można opisać równaniem:

$$k = 1,34 - 4,168 \cdot 10^{-3} T, \quad (R = -0,9756) \quad (5.73)$$

Ze zwiększeniem wilgotności rośnie przewodność cieplna tłuszczu wieprzowego, np. w 303 K przy $m = 0,031$, $k = 0,186 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast przy $m = 0,137$, $k = 0,290 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, [3].

Współczynnik przewodzenia ciepła smalcu wieprzowego określają [14] wzory:

przy $277 \text{ K} < T < 323 \text{ K}$;

$$k = 0,65 - 0,0015 T \quad (5.74)$$

przy $323 \text{ K} < T < 373 \text{ K}$;

$$k = 0,031 + 4 \cdot 10^{-4} T \quad (5.75)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła łoju wieprzowego w zakresie temperatury $253 - 273$ K zmienia się według wzoru:

$$k = 0,888 - 2,518 \cdot 10^{-4} T, \quad (R = -0,997) \quad (5.76)$$

Dla temperatury wyższej od $273,15$ K doniesienia o wpływie temperatury na przewodność cieplną łoju są sprzeczne. W [3] dla $293 \text{ K} < T < 307 \text{ K}$ podano równanie:

$$k = -1,60 + 6,7 \cdot 10^{-3} T \quad (5.77)$$

Według [19] w przedziale temperatury $297 \text{ K} - 311 \text{ K}$ współczynnik przewodzenia ciepła jest niezmienny i wynosi $0,19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

5.7. Współczynnik wyrównywania temperatury tłuszczów pochodzenia zwierzęcego

Współczynnik wyrównywania omawianych tłuszczów znacznie wzrasta przy obniżaniu temperatury od 273 K do 243 K [3]:
tłuszcz wieprzowy, $m = 0,031$;

$$a = 7,23 \cdot 10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-9} T, \quad (R = -0,996); \quad (5.78)$$

tłuszcz wołowy,

$$a = 1,12 \cdot 10^{-6} - 3,9 \cdot 10^{-9} T, \quad (R = -0,998); \quad (5.79)$$

Dla temperatury $T > 273$ K nie ma wyników badań eksperymentalnych współczynnika a dla dużego zakresu temperaturowego. Według [3] współczynnik wyrównywania temperatury smalcu wieprzowego dla $T = 293$ K wynosi $6,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, tłuszczu wołowego $8,67 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla $T = 333$ K.

5.8. Gęstość tłuszczów pochodzenia zwierzęcego

Gęstość tłuszczu wieprzowego w przedziale temperatury $77\text{ K} < T < 273\text{ K}$ zmienia się zgodnie z zależnością [15]:

$$\rho = 1052 - 0,377 T \quad (5.80)$$

Gęstość zmielonego tłuszczu wieprzowego o wilgotności $m = 0,136$ przy $283\text{ K} < T < 333\text{ K}$ maleje według równania [3]:

$$\rho = 1133 - 0,63 T \quad (5.81)$$

Gęstość surowego tłuszczu wołowego zależy od miejsca jego pochodzenia. Do określenia gęstości tłuszczu wołowego w zależności od temperatury, od 278 K do 333 K , poleca się wzór:

$$\rho = 1377 - 1,50 T \quad (5.82)$$

5.9. Ciepło właściwe margaryny

Ciepło właściwe margaryny zależy przede wszystkim od jej składu chemicznego i temperatury. Według [16, 17] ciepło właściwe margaryny o wilgotności $m = 0,08 - 0,15$ i w zakresie temperatury od 273 K do 373 K zmienia się od 1760 do $2090\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$. W przedziale temperatury $293 - 305\text{ K}$ ciepło właściwe margaryny stołowej [3, 12] wzrasta według wzoru:

$$c = -5821 + 26,9 T \quad (5.83)$$

Dla margaryny śmietankowej w temperaturze $273\text{ K} - 298\text{ K}$ ciepło zmniejsza się ze wzrostem temperatury [3]:

$$c = 8679 - 20,98 T \quad (5.84)$$

Wstępne wyniki badania autora (tabela 5.6) krajowej margaryny zwykłej (PN-77/A-86907) wskazują na skomplikowany przebieg zależności $c = c(T)$.

Ciepło właściwe margaryny w stanie stałym rośnie ze wzrostem temperatury do około $3579\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ dla około 303 K . Po stopnieniu ciepło właściwe zmniejsza się do $1943\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ dla 325 K .

Tabela 5.6.

Ciepło właściwe margaryny zwykłej

Temperatura K	290	295	300	303	310	315	320	325
$c, \text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$	2243	2103	2887	3579	2028	2108	1977	1943

5.10. Współczynnik przewodzenia ciepła margaryny

Współczynnik przewodzenia ciepła margaryny zależy od gęstości, temperatury, składu chemicznego i zawartości powietrza. Przy względnie jednakowym składzie chemicznym, współczynnik przewodzenia ciepła margaryny mlecznej [3, 5] jest o około 25% wyższy od margaryny o konsystencji lodów, mającej dużą porowatość (około 0,32), (tab. 5.7).

Tabela 5.7.

Przewodność cieplna margaryn [5]

Margaryna	Zawartości		ρ kg m^{-3}	$k, \text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$	
	m	f		273	293
mleczna	0,160	0,817	960	0,20	0,19
o konsystencji lodów	0,162	0,816	650	0,15	0,17
dietetyczna	0,567	0,401	1070	0,34	0,36

Współczynnik przewodzenia ciepła margaryny o dużej zawartości wody (dietetyczna) jest wyższy niż margaryny z dużą zawartością tłuszczu (np. mlecznej) (tab. 5.7).

W przedziale temperatury $243 - 273\text{ K}$ współczynnik przewodzenia ciepła margaryny mlecznej [16] zmniejsza się od $0,24$ do $0,21\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Po zakończe-

niu przemiany fazowej lód-woda, dla temperatury $273\text{ K} < T < 293\text{ K}$, współczynnik k wzrasta do $0,23\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$.

5.11. Współczynnik wyrównywania temperatury margaryny

Współczynnik wyrównywania temperatury margaryny stołowej maleje ze wzrostem T :

$$a = 1,717 \cdot 10^{-7} - 2,94 \cdot 10^{-10} T, \quad (R = -0,888) \quad (5.85)$$

Wzór jest ważny dla $293\text{ K} < T < 305\text{ K}$.

5.12. Gęstość margaryny

Gęstość margaryny jest zależna od jej składu (szczególnie proporcji w zawartości wody i tłuszczu), porowatości, temperatury (tab. 5.7). Mniejsza zawartość tłuszczu, większa ilość wody oraz duża porowatość obniżają gęstość. W przedziale temperatury $293\text{ K} < T < 305\text{ K}$ gęstość margaryny stołowej obniża się według wzoru [3, 5]:

$$\rho = 1165 - 0,83 T \quad (5.86)$$

LITERATURA

1. Аликберов Н.А., Пугач А.К., Геллер В.З. 1986. Теплопроводность растительных масел. Масло-жировая промышленность. Nr. 6, 10-11.
2. Artecka E., Gogół E., Gogół 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, 217.
3. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. 1990. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание 3-е, дополненное и переработанное. ВО „Агропромиздат”. Москва.
4. Громов М.А. 1986. Теплофизические характеристики какао бобов и какао продуктов. Хлебопекарная и кондитерская промышленность. Nr. 3, 38-41.
5. Громов М.А. 1986. Теплофизические характеристики маргарина. Масло-жировая промышленность. Nr. 4. 16-17.
6. Громов М.А. 1987. Теплофизические характеристики соевого масла. Масло-жировая промышленность. Nr. 6. 14-15.
7. Громов М.А. 1987. Теплофизические характеристики оливкового масла. Масло-жировая промышленность. Nr. 10. 11-12.
8. Jorwis H.F.T. 1971. The thermal variation of the density of beef and the determination of its coefficient of cubical expansion. Journal of Food Technology. No. 4, 383-391.
9. Кафиев Н.М., Келлер С.В., Чекмарова И.Б. 1987. Теплопроводность масел подобных оливковому. Депониров. рук. 30 X 1987. Nr 1663 Пиз 87.
10. Кафиев И.М., Громов М.А., Панин А.С. 1988. Удельная теплоемкость твердых растительных масел. Пищевая промышленность. Nr 7, 29.
11. Казин М.В. 1961. Теоретические и экспериментальные исследования методов определения теплофизических свойств масел и жиров и применение их для расчетов тепловых систем. Кандидат. диссерт. МТИПП. Москва.
12. Коларов К.М., Гарчева Т.В., Попов Г.И. 1989. Физични характеристики на суровини, полуфабрикаты и хранителни продукти. Справочник по хранително-вкусова промышленность. Земиздат. София.
13. Латышев В.Ч., Озерова Т.М., Оленева Г.Е. 1975. Исследование удельной теплоемкости и энтальпии топленого свиного жира. Сборник трудов ВНИИХ. 73-79.
14. Латышев В.П., Грицын М.Н. 1979. Теплофизические характеристики готовых блюд и их компонентов. Сб. научн. тр. ВНИИ Холпром. Москва. 35-56.

15. Латышев В.П., Цирульникова Н.А. 1986. Стандартизация теплофизических свойств некоторых мясных и молочных продуктов в интервале температур 77-373 К. Технология холодильной обработки и хранения пищевых продуктов. Сб. научн. тр. ВНИХП. Москва. 100-108.
16. Москенин Н.Н. 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural Materials. Gordon and Breach Publ. New York, Tabl 2A-15.
17. Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P. 1980. A Compilation of Thermal Properties of Foods. Food Technology-November, 76-94.
18. Pytko M. 1988. Badania współczynnika przewodzenia ciepła płynnych produktów spożywczych. Praca dyplomowa, magisterska. Politechnika Białostocka. Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Białystok.
19. Qashou M.S., Vachon R.I., Touloukian Y.S. 1972. Thermal Conductivity of Foods. Transactions of the ASHRAE. No. 2. 165-183.
20. Riedel L. 1955. Kalorimetrische Untersuchungen über das Schmelzverhalten von Fetten und Ölen. Fette, Seifen. Anstrichmittel. Nr. 10, 771-782.
21. Riedel L. 1977. Enthalpiemessungen an Lebensmitteln. Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm. 5, 118-119.

6. WARZYWA I OWOCE

6.1. Warzywa cebulowe

Ciepło warzyw cebulowych zależy od wilgotności. Ciepło właściwe cebuli i pora dla $0 < m < 1$ i temperatury 293 K można obliczać [15] przy zastosowaniu reguły addytywności ze wzoru:

$$c = 1396 + 2791 m \quad (6.1)$$

wzór dla czosnku ma postać:

$$c = 1420 + 2769 m \quad (6.2)$$

Wartości ciepła właściwego cebuli o wilgotności $m = 0,80 - 0,90$ i czosnku o $m = 0,616 - 0,74$ obliczone z powyższych zależności różnią się o około 1% od wartości eksperymentalnych [25, 29, 46]. Analiza danych literaturowych wskazuje, że temperatura (w zakresie 273-373 K) niewiele zmienia ciepło właściwe warzyw cebulowych. Ciepło właściwe cebuli [29] o $m = 0,875$ dla temperatury niższej od krioskopowej wynosi $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast dla $T > T_k$ $3768 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Warzywa cebulowe charakteryzują się dużą zawartością gazów w przestrzeniach międzykomórkowych, protoplazmie oraz w sokach komórkowych [43]. Zawartość gazów w cebuli waha się od 18,8% do 19,4%, sięga nawet 36% [25]. Gazy zawarte wewnątrz komórki roślinnej wywierają zasadniczy wpływ na przebieg termicznych procesów technologicznych. Większa zawartość gazów w warzywach utrudnia proces przewodzenia ciepła, ponieważ ich współczynnik k jest przynajmniej o rząd wielkości mniejszy niż współczynnik k dla ciał stałych i cieczy.

Współczynnik przewodzenia ciepła cebuli dla $T = 333 \text{ K}$ wynosi $0,470 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [25], dla $T = 301 \text{ K}$ równa się $0,547 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [45] oraz $k = 0,5746$ dla $T = 282 \text{ K}$ [46].

Przewodność cieplna czosnku równa się $0,51 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla zakresu temperatury $273\text{--}283 \text{ K}$ [42].

Współczynnik wyrównywania temperatury cebuli wynosi: $1,31 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [25,43] lub $1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [13]. Czosnek posiada większą zdolność do wyrównywania temperatury, $a = 1,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [42].

Gęstość cebuli waha się od 970 kg m^{-3} [45] (dla 301 K) do 1040 kg m^{-3} [25]. Gęstość nasypowa cebuli wynosi 600 kg m^{-3} [25]. Gęstość czosnku równa się 964 kg m^{-3} [25,42].

6.2. Warzywa dyniowate

Ciepło właściwe dyni, kabaczków, arbuźów i ogórków gruntowych podlegające prawu addytywności można obliczać (przy $T = 293 \text{ K}$ i $0 < m < 1$) z równania ogólnego [15]:

$$c = 1385 + 2802 m \quad (6.3)$$

Wartości ciepła właściwego dyni otrzymane z powyższego równania (w zakresie wilgotności $m = 0,900\text{--}0,955$) różnią się o 15% w stosunku do wartości eksperymentalnych; dla arbuźów różnica wynosi 2,5%, dla melona 1,0% [15]. Dla temperatur niższych od krioskopowych ciepło właściwe arbuza ($m = 0,921$) i melonów ($m = 0,926\text{--}0,927$) wynosi $2009 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, kabaczków ($m = 0,905$) $1968 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, ogórków $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29].

Współczynnik przewodzenia ciepła arbuźów ($m = 0,913$) wynosi $0,50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [15], dyni $0,47\text{--}0,52 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [42,49], melona $0,571 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29]. Współczynnik przewodzenia ciepła świeżych kabaczków w przedziale temperatury $273\text{--}288 \text{ K}$ wynosi $0,51 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [15]. Wartości współczynnika k ogórków zmieniają się od 0,33 [25] do $0,598 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [45], co jest wynikiem różnej zawartości powietrza w ogórkach. Przewodność cieplna ogórków ($m = 0,955$) ze skórą wynosi $0,85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i jest wyższa od przewodności ogórków bez skórki, $0,74 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,960$) [15].

W procesie nagrzewania wymianie ciepła towarzyszy wymiana masy mająca kierunek przeciwny do strumienia cieplnego. Skóra ogórka stanowi barierę dla tego procesu.

Współczynnik wyrównywania temperatury arbuźów wynosi według [25] $1,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, dyni ($m = 0,905$) $1,26 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, kabaczków $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, melonów $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, ogórków ($m = 0,962$) $1,18 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Gęstość arbuźów o wilgotności $m = 0,872\text{--}0,933$ wynosi 910 kg m^{-3} [25] a gęstość nasypowa $460\text{--}470 \text{ kg m}^{-3}$, gęstość kabaczków $852\text{--}987 \text{ kg m}^{-3}$, dyni ($m = 0,863\text{--}0,890$) zmienia się od 985 do 1072 kg m^{-3} [25], ogórków ($m = 0,957\text{--}0,969$) od 904 do 945 kg m^{-3} .

Duże różnice w gęstości kabaczków i ogórków są następstwem zróżnicowanej zawartości w nich gazów. Zawartość gazów w kabaczkach wynosi od 12,5 do 16,4% ich objętości [15]. Porowatość tych warzyw wynosi 9–13% i jest większa w części środkowej niż w warstwach zewnętrznych. Gazy w ogórkach stanowią [15] 7,3 do 18,3% ich objętości.

6.3. Warzywa kapustne

Ciepło właściwe kalarepy i kapusty czerwonej w temperaturze 293 K i o wilgotności $0 < m < 1$ oblicza się [15] z równania:

$$c = 1372 + 2815 m \quad (6.4)$$

natomiast kapusty białej, brukselki i kalafiora z równania:

$$c = 1402 + 2785 m \quad (6.5)$$

Ciepło właściwe kalarepy ($m = 0,901$) wyznaczone eksperymentalnie wynosi $3852 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29], dla $T < T_k$ $1980 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Ciepło właściwe kapusty świeżej zawiera się w granicach od 3730 do $3930 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Ciepło właściwe kalafiora o $m = 0,907$ równa się [13] $3760 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast dla $m = 0,917$ wynosi $3894 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29]. Ciepło właściwe brokułu o wilgotności $m = 0,899$ równa się $3850 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [15,29,34] lub $3680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [25], dla $m = 0,911$.

Współczynniki przewodzenia ciepła i wyrównywania temperatury warzyw kapustnych są zależne od kierunku strumienia ciepła. Jeżeli ciepło przepływa

wzdłuż liści okrywających, to prędkość ochładzania jest 1,5 razy większa niż przy przepływie prostopadłym [15].

Podczas nagrzewania kapusty rośnie jej przewodność i dyfuzyjność cieplna (tabela 6.1) [44].

Tabela 6.1.

Zmiana przewodności i dyfuzyjności kapusty podczas nagrzewania

Wilgotność	Temperatura K	k $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$a \cdot 10^7$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
0,901	293–313	0,80	1,79
0,902	323–343	1,15	3,10
0,892	343–363	1,30	3,70

Współczynnik przewodzenia ciepła kalarepy równa się $0,49 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [15,42], a brokułu [35] $0,385 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, ($T = 267 \text{ K}$ i $\rho_n = 560 \text{ kg m}^{-3}$). Dyfuzyjność cieplna brokułu w przedziale temperatury 293–373 K zmienia się [12] od $1,437 \cdot 10^{-7}$ do $1,785 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

Gęstość świeżej kapusty o wilgotności od 0,915 do 0,920 w zależności od gatunku zawiera się od 550 do 850 kg m^{-3} . Gęstość nasypowa zmienia się w granicach $380\text{--}448 \text{ kg m}^{-3}$ [15].

Gęstość kalafiora $m = 0,875\text{--}0,885$ waha się od 980 do 1015 kg m^{-3} [25].

6.4. Warzywa liściowe

Ciepło właściwe warzyw liściowych (sałaty, szczawiu i szpinaku) w temperaturze 293 K i przy $0 < m < 1$ można obliczać [15] z zależności:

$$c = 1342 + 2845 m \quad (6.6)$$

Ciepło właściwe sałaty [34] o $m = 0,948$ wynosi $4020 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Natomiast w przedziale temperatury 273–373 K c szczawiu ($m = 0,920$) równa się $4020 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, szpinaku ($m = 0,85\text{--}0,90$) wynosi $3770\text{--}3940 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła główki sałaty [15] równa się $0,147 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, szpinaku $0,61 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [15].

Przewodność cieplna szpinaku rozdrobnionego i zamrożonego ($T = 253 \text{ K}$) w postaci kostek [4] zmienia się od 1,25 do $1,80 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ w zależności od ich ułożenia względem strumienia ciepła.

Współczynnik wyrównywania temperatury szpinaku równa się [15] $1,61 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

Gęstość szpinaku ($m = 0,93$) jest równa 954 kg m^{-3} , a gęstość nasypowa zawiera się od 130 do 224 kg m^{-3} [15].

6.5. Warzywa psiankowe

6.5.1. Papryka

Ciepło właściwe słodkiej papryki zielonej i czerwonej o wilgotności $0 < m < 1$ w temperaturze 293 K oblicza się [15] z równania:

$$c = 1395 + 2792 m \quad (6.7)$$

Wartości eksperymentalne [25] ciepła właściwego papryki słodkiej różnią się o około 2% w zestawieniu z obliczonymi z powyższego wzoru.

Współczynnik przewodzenia ciepła papryki surowej ($m = 0,904\text{--}0,931$) równa się $0,47 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [25].

Równanie wyrażające zależność współczynnika przewodzenia ciepła zmielonej papryki czerwonej o $m = 0,164$ i $\rho_u = 473 \text{ kg m}^{-3}$ ma postać [15]:

$$k = -0,084 + 6,4 \cdot 10^{-4} T \quad (6.8)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy zmielonej papryki czerwonej równa się $0,09 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Dyfuzyjność cieplna papryki surowej $a = 1,18 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ [25]. Gęstość świeżej papryki o wilgotności $m = 0,904\text{--}0,931$ wynosi $\rho = 1007 \text{ kg m}^{-3}$ [25].

6.5.2. Pomidory

Ciepło właściwe pomidorów zależy przede wszystkim od zawartości w nich wody. W przedziale temperatury 293–433 K i przy udziale suchej masy $0 < n < 1$ ciepło właściwe pomidorów można wyznaczyć z równania [15]:

$$c = 4187 + 0,003 T - 3726 n \quad (6.9)$$

Ciepło właściwe świeżych pomidorów zawiera się w przedziale od $3745 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,88$) [15] do $4020 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,942$) [25], zaś zamrożonych od $1670 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,95$) [13] do około $2052 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,941$) [15]. Ciepło pomidorów zamrożonych zmniejsza się z obniżającymi się wartościami temperatury. Nie stwierdza się wyraźnego wpływu odmiany i stopnia dojrzałości pomidorów [13, 29] na ciepło właściwe, jeżeli tylko $m = \text{idem}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła pomidorów zawiera się w granicach $0,52 - 0,59 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, [15]. Na wartość współczynnika k pomidorów ma wpływ ich budowa. Współczynnik k owocni pomidora ($m = 0,923$) równa się $0,4621 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, warstwy zaś zewnętrznej $0,5279 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, [13, 34].

Współczynnik wyrównywania temperatury pomidorów ($m = 0,942$) wynosi $1,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, [25].

W literaturze nie spotyka się wzorów na gęstość pomidorów świeżych, ponieważ zawierają one różną ilość powietrza, od 0,013 do 0,045 [15].

Gęstość pomidorów waha się od 990 kg m^{-3} do 1042 kg m^{-3} ($m = 0,942$) [15, 25].

6.5.3. Ziemniaki

Ciepło właściwe ziemniaków jest przede wszystkim funkcją temperatury i wilgotności. W przedziale temperatury $273 \text{ K} < T < 313 \text{ K}$ i wilgotności $0 < m < 1$ ciepło właściwe ziemniaków opisuje równanie [15]:

$$c = 68 + 4119 m + 4,2 T - 4,2 Tm \quad (6.10)$$

Ciepło właściwe ziemniaków nie zależy w zasadzie od ich odmiany [15], jeżeli tylko $m = \text{idem}$. Zmianę ciepła właściwego ziemniaka ($m = 0,819$) w zależności od temperatury ilustruje równanie [30]:

$$c = 2296 + 4,24 T; \quad (R = 0,997) \quad (6.11)$$

Ciepło właściwe ziemniaków rośnie podczas gotowania w wodzie, ponieważ obok wzrostu temperatury wzrasta także wilgotność. Wzrost wilgotności jest wynikiem częściowego usuwania gazów znajdujących się w bulwach. Ich miejsce zajmuje woda. Jeżeli np. wilgotność świeżego ziemniaka wynosi 0,75, to gotowanego 0,80. Odpowiednio, wartości ciepła właściwego równają się 3517 i $3543 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [31]. Ciepło właściwe ziemniaków zamrożonych waha się od $1675 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,685$) [15] do $1800 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,778$) [29, 34].

Przewodność cieplna ziemniaków zależy nie tylko od wilgotności i temperatury lecz od szeregu innych parametrów, takich jak: sposób obróbki termicznej, istnienie lub brak skórki. Ze wzrostem wilgotności rośnie współczynnik k . Ilustruje to równanie, ważne dla $m = 0,6 - 0,9$ i temperatury 293 K [25]:

$$k = 0,13 + 0,52 m \quad (6.12)$$

Według badań autora [30] współczynnik przewodzenia ciepła ziemniaków ($m = 0,819$) w zakresie temperatury 273–373 K zmienia się następująco:

$$k = -0,157 + 2,146 \cdot 10^{-3} T; \quad (R = 0,984) \quad (6.13)$$

Podczas gotowania i smażenia ziemniaków strumień masy ma kierunek przeciwny do strumienia ciepła. Jeżeli temperatura wody lub oleju jest niższa od 373 K, strumień masy nieznacznie hamuje wymianę ciepła między bulwą a środowiskiem. Jeżeli natomiast temperatura środowiska jest wyższa od 373 K, strumień masy z centrum bulwy do warstw powierzchniowych wyraźnie hamuje strumień ciepła. Następuje obniżenie (tab. 6.2) współczynnika przewodzenia ciepła.

Tabela 6.2.

Zmiana współczynnika k ziemniaków podczas smażenia [50]

Temperatura, K	333	353	373	393	413	433	453
$k, \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,28	0,41	0,42	0,34	0,27	0,20	0,18

Przewodność cieplna ziemniaków gotowanych w wodzie jest wyższa niż po obróbce termicznej w innych środowiskach (np. parze). Podczas gotowania w wodzie wymiana masy, hamująca wymianę ciepła, jest mała. Natomiast podczas obróbki ziemniaków w nasyconej parze wodnej ich warstwy zewnętrzne ulegają podsuszeniu. Występuje wzmożony ruch wilgoci z centrum bulwy, co powoduje spadek przewodności cieplnej w stosunku do ziemniaków gotowanych w wodzie. Również skórka ziemniaków hamuje wymianę masy podczas ich obróbki termicznej. Współczynnik przewodzenia ciepła ziemniaków bez skórki jest około 6% niższy niż ziemniaków ze skórką [50].

Współczynnik wyrównywania temperatury ziemniaków zależy od wielu czynników, nie tylko od wilgotności i gęstości.

Współczynnik a wzrasta ze wzrostem wilgotności [25], co przedstawia równanie:

$$a \cdot 10^7 = 0,89 + 0,72 m \quad (6.14)$$

ważne dla $T = 293 \text{ K}$, $m = 0,6 - 0,9$.

Bardziej skomplikowany przebieg ma funkcja $a = a(T)$ ziemniaka [30, 37, 47]. Badania [30] wykazują, że do około 343 K współczynnik a rośnie i osiąga $1,67 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Przy dalszym wzroście temperatury następuje spadek wartości do $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ w temperaturze 370,8 K [30]. Taki przebieg funkcji $a = a(T)$ tłumaczy się [37, 47] procesem kleikowania i wynikającym stąd rozmiękczeniem i rozdzieleniem komórek. Analogiczny charakter zmian współczynnika wyrównywania temperatury zaobserwowano dla batata [15].

Gęstość ziemniaków zależy nie tylko od wilgotności, ale także od ilości występujących w nich gazów. Według [15] zawartość objętościowa gazów wewnątrzkomórkowych w ziemniakach wynosi 0,04–0,09.

Przy jednakowej zawartości suchej masy, lecz przy różnej porowatości albo przy jednakowej porowatości, lecz przy różnej zawartości suchej masy otrzymuje się różną gęstość ziemniaków. Gęstość ziemniaków jest zależna od miejsca ich uprawy. Dla odmian polskich o suchej masie od 0,175 do 0,280, gęstość waha się od 1070 do 1113 kg m^{-3} [17]. Odmiany wczesne charakteryzują się mniejszą gęstością niż późne [25, 42]. W przedziale temperatury 273–283 K gęstość ziemniaka odmiany wczesnej ($m = 0,797$) wynosi 1034 kg m^{-3} , natomiast odmiany późnej ($m = 0,812$) – 1076 kg m^{-3} .

Gęstość ziemniaków może być różna w różnych latach, ponieważ bulwy zawierają różne zawartości suchej masy i gazów [15].

Zależność gęstości ziemniaków od zawartości w nich suchej masy ($0,10 < n < 0,35$) przy $T \approx 283 \text{ K}$ opisano równaniem [15]:

$$\rho = 987 + 465 n \quad (6.15)$$

Gęstość ziemniaków zależy ponadto od odmiany (tab. 6.3) [39] i jest różna dla różnych części bulwy. Część środkowa bulwy ma najmniejszą gęstość, ponieważ zawartość w niej suchej masy jest 1,5 do 3 razy mniejsza niż w warstwie zewnętrznej [15].

Tabela 6.3.

Gęstość bulwy i jej części składowych [39]

Odmiana	Bulwa	Warstwa		
		zewnętrzna	przejściowa	środkowa
Green Mountain	1093,0	1095,7	1091,6	1071,3
Sebago	1061,1	1060,8	1066,3	1058,8
Średnia dla 15 odmian	1072,5	1071,1	1076,4	1061,4

6.6. Warzywa rzepowate

6.6.1. Brukiew

Ciepło właściwe świeżej brukwi w temperaturze 293 K i o wilgotności $0 < m < 1$ można wyznaczać [15] z zależności:

$$c = 1373 + 2814 m \quad (6.16)$$

Wartości eksperymentalne ciepła właściwego brukwi o $m = 0,891$ wynoszą [34]: 3810 $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i 1980 $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla temperatur niższych od krioskopowej.

6.6.2. Buraki

Ciepło właściwe buraków cukrowych i ćwikłowych przy $T = 293 \text{ K}$ i $0 < m < 1$, przy zastosowaniu zasady addytywności może być obliczane z równania uogólnionego [15]:

$$c = 1401 + 2786 m \quad (6.17)$$

Wartości ciepła właściwego buraków o zawartości suchej masy 0,20–0,40, w temperaturze 293 K obliczone z powyższego wzoru różnią się o około 2% w porównaniu z wartościami eksperymentalnymi. Ze wzrostem temperatury i obniżeniem zawartości suchej masy rośnie ciepło właściwe buraka cukrowego. Zmianę ciepła właściwego buraka odmiany Trimono [22] ($m = 0,75 - 0,80$) w przedziale temperatury 278–333 K opisano równaniem:

$$c = 0,0922 + 0,012 T \quad (6.18)$$

W przedziale temperatur od krioskopowej do 353 K i dla spotykanych w praktyce wielkości suchej masy ciepło właściwe buraków cukrowych opisano [40] zależnością:

$$c = 4185 - n(4800 - 7,5 T) \quad (6.19)$$

W temperaturach niższych od krioskopowej zasadniczy wpływ na ciepło właściwe buraków ma ilość wody wymrożonej [24, 40]. Ciepło właściwe zamrożonych buraków ($m = 0,876$) wynosi $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29] lub $1680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [34].

Proces zamrażania zarówno z dużą jak i małą prędkością i późniejsza defrostacja praktycznie nie zmieniają ciepła właściwego, jeśli tylko $m = \text{idem}$ [15].

Współczynnik przewodzenia ciepła buraków jest zależny od wielu czynników. Ze wzrostem wilgotności (zmniejszeniem zawartości suchej masy) rośnie ich współczynnik przewodzenia ciepła. Współczynnik k buraków cukrowych odmian AJ-3 i Trimono ($m < 0,8$) w zależności od wilgotności [23] opisuje równanie:

$$k = 0,187 + 0,0045 m ; \quad (R = 0,94) \quad (6.20)$$

a w zależności od suchej masy ($n = 0,20 - 0,40$) [45] i w temperaturze 293 K równanie:

$$k = 0,581 - 0,325 n \quad (6.21)$$

W zakresie temperatury 273–333 K przewodność cieplna buraków rośnie ze wzrostem temperatury. Dla buraków odmiany Trimono ($m = 0,75 - 0,80$) w przedziale temperatury 278–333 K przewodność cieplna zmienia się według zależności [22]:

$$k = -0,1009 + 0,0022 T \quad (6.22)$$

Badania przewodności cieplnej buraków w szerokim przedziale temperatury wskazują, że do około 343 K (tab. 6.4) następuje wzrost ich przewodności cieplnej. Następnie, po zakończeniu procesu kleikowania skrobi współczynnik k maleje [30, 43, 44].

Tabela 6.4.

Współczynnik przewodzenia ciepła buraków podczas nagrzewania

T, K	273	284,15	293-313	293,84	302,42	312,42	320,80
$k, \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,590	0,601	0,47	0,614	0,622	0,641	0,636

T, K	323-343	333,15	342,50	343-363	352,80	363,17	369,15
$k, \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,62	0,649	0,652	0,51	0,651	0,646	0,638

Struktura, stan tkanek i wielkość (średnica) wpływają na przewodność cieplną buraka [24, 40].

Tabela 6.5.

Wpływ wielkości buraków (odmiana AJ-3) na przewodność i dyfuzyjność cieplną [22]

Wielkość buraka	Wilgotność m	k $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$a \cdot 10^7$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
mały ($\phi < 70 \text{ mm}$)	0,768	0,490	1,26
duży ($\phi > 100 \text{ mm}$)	0,766	0,535	1,42

Współczynnik przewodzenia ciepła buraków dużych jest o 8,5% większy od wartości k buraków małych. Ze wzrostem średnicy, a odpowiednio i wielkości komórek buraka rośnie jego zdolność do przewodzenia ciepła [40]. W pracy [16] nie stwierdzono wyraźnych różnic w wartościach współczynnika k wywołanych anizotropią lub niejednorodnością budowy buraka. Jednakże zakładanie izotropii tkanek buraka jest tylko przybliżeniem [40].

Współczynnik wyrównywania temperatury wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury [11]. W zakresie wilgotności 0,6–0,8 (przy $T=293$ K) dyfuzyjność cieplna buraków odmiany AJ-Policama zmienia się [22] według zależności:

$$a = (0,42 + 0,012 m) 10^{-7}; \quad (R = 0,92) \quad (6.23)$$

Dyfuzyjność cieplna buraków Trimono ($m = 0,75–0,80$) w przedziale temperatury 278–333 K rośnie liniowo [22]:

$$a = (0,466 + 0,0032 T) 10^{-7} \quad (6.24)$$

Przy dalszym wzroście temperatury (powyżej 343 K [30], lub 323 K [15]), dyfuzyjność cieplna buraków obniża się [30]. Obniżanie jest rezultatem zakończenia procesu kleikowania skrobi.

Wartość współczynnika a buraków oczyszczonych ze skórki jest mniejsza od wartości współczynnika buraków ze skórką. Skórka hamuje wymianę masy towarzyszącą wymianie ciepła podczas np. gotowania. Wymiana masy odbywa się w kierunku przeciwnym do wymiany ciepła.

Również rodzaj środowiska, w którym odbywa się obróbka termiczna buraków, ma wpływ na współczynnik a . Najwyższe wartości osiąga dyfuzyjność cieplna buraków podczas nagrzewania buraków w wodzie, najniższe – w parze wodnej [15].

Wielkość buraków ma wpływ na ich dyfuzyjność cieplną (tab. 6.5). Współczynnik a buraków dużych jest o 12,5% wyższy od wartości dla buraków małych.

Buraki zawierają różne ilości gazów wewnątrzkomórkowych. Z tego powodu gęstość różnych buraków przy takiej samej zawartości suchej substancji może być różna.

W pracy [15] dla suchej substancji $0,20 < n < 0,40$ i $T = 293$ K podano następujący wzór:

$$\rho = 985 + 450 n \quad (6.25)$$

W zakresie wilgotności $m = 0,60–0,80$ gęstość buraków AJ Policama [22] zmieniała się następująco:

$$\rho = 1468 - 500 m \quad (R = 0,97) \quad (6.26)$$

Zmianę gęstości buraków w przedziale temperatury od krioskopowej do 353 K i dla spotykanych wartości suchej masy opisuje [40] zależność:

$$\rho = 1127 + 453 n - 0,47 T \quad (6.27)$$

Gęstość buraków odmiany Trimono waha się [22] od 1063 kg m^{-3} do 1162 kg m^{-3} przy zmianie m od 0,828 do 0,591, ($T = 293$ K).

6.6.3. Marchew

Ciepło właściwe marchwi zależy przede wszystkim od wilgotności. Dla temperatury 293 K i wilgotności $0 < m < 1$ [15] ciepło właściwe marchwi poleca się obliczać z równania (6.16).

Ciepło właściwe marchwi odmiany Nantejska ($m = 0,887$, $\rho_u = 901 \text{ kg m}^{-3}$) w przedziale temperatury 273–373 K opisuje [30] równanie:

$$c = 2854 + 3,058 T, \quad (R = 0,998) \quad (6.28)$$

Ciepło właściwe marchwi wynosi $3870 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [25]. Nie obserwuje się wyraźnego wpływu procesu przechowywania i gotowania na ciepło właściwe marchwi. Ciepło właściwe marchwi po 5 miesiącach przechowywania wynosiło $3810 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,878$) [25]. Ciepło właściwe [29] marchwi świeżej o wilgotności $m = 0,86–0,90$ równa się $3810–3935 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, gotowanej ($m = 0,92$) 3852 lub $4145 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła marchwi rośnie ze wzrostem jej wilgotności i temperatury. Współczynnik przewodzenia ciepła marchwi odmian:

I-zbiór i Perfekcja w przedziale wilgotności $0,84 < m < 0,90$ wzrasta [23] zgodnie z równaniem:

$$k = 0,172 + 0,46 m \quad (R = 0,89) \quad (6.29)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła marchwi odmiany Nantejska ($m = 0,887$, $\rho_u = 901 \text{ kg m}^{-3}$) rośnie liniowo ze wzrostem temperatury od 273 K do 373 K, według zależności [30]:

$$k = 0,318 + 6,87 \cdot 10^{-4} T \quad (6.30)$$

Liniowy wzrost współczynnika k ze wzrostem T stwierdzono także w pracy [24]. Badania [7] nad przewodnością cieplną marchwi w dużym (303–413 K) przedziale temperatury potwierdzają wzrost tego parametru ze wzrostem T , m . Wzrost współczynnika k jest jednakże nieliniowy: od $0,587 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ do wartości maksymalnej $k = 0,667 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla 403 K. Do obliczeń współczynnika przewodzenia ciepła marchwi (także buraków i selera) jest polecany [24] model Maxwella-Euckena, dający bardzo dobrą zgodność (z błędem nie przekraczającym 3%) w przedziale temperatury 240–340 K.

Model zakładający istnienie w warzywach równoległych warstw lodu, wody i pozostałych składników nie odzwierciedla [24] ich rzeczywistej struktury po zamrożeniu.

Marchew ma budowę niejednorodną. Gęstość części środkowej warzywa jest większa niż gęstość warstw powierzchniowych [15]. Dlatego (tab. 6.6) przewodność cieplna rdzenia marchwi [26] jest wyższa niż części zewnętrznej.

Tabela 6.6.

Współczynnik przewodzenia ciepła marchwi Nantejska 4 [26], $T = 296 \text{ K}$

	m		
	0,810	0,866	0,880
Część zewnętrzna	0,27	0,30	0,38
Rdzeń	0,33	0,40	0,44

Współczynnik przewodzenia ciepła marchwi zmienia się także w procesie gotowania. Do $T \leq 313 \text{ K}$ następuje wyraźny wzrost współczynnika k części zewnętrznej [44]. W dalszej części procesu wzrost przewodności cieplnej wszystkich części warzywa jest jednakowy.

Współczynnik wyrównywania temperatury marchwi jest zależny od wilgotności i temperatury. Wartość współczynnika a wzrasta ze wzrostem wilgotności. Zmianę współczynnika a marchwi odmiany I-zbiór opisano [23] równaniem ($0,841 < m < 0,900$):

$$a = (0,67 + 0,87 m) 10^{-7} \quad (6.31)$$

Ze wzrostem temperatury wzrasta współczynnik wyrównywania temperatury marchwi. Współczynnik a marchwi odmiany Nantejska w przedziale temperatury $293 \text{ K} < T < 363 \text{ K}$ zmienia się [15] następująco:

$$a = (-1,675 + 0,0098 T) 10^7 \quad (6.32)$$

Obróbka wstępna marchwi przed procesem gotowania (oczyszczona lub nie oczyszczona) a także jej rozdrobnienie nie wpływają na dyfuzyjność cieplną [15,30].

Porowatość marchwi waha się w przedziale od 0,02 do 0,10. W związku z tym, gęstość marchwi jest zróżnicowana i zmienia się od 984 kg m^{-3} do 1107 kg m^{-3} [15,25]. Gęstość nasypowa marchwi zawiera się w przedziale $550 - 640 \text{ kg m}^{-3}$.

6.6.4. Pasternak

Ciepło właściwe pasternaku dla $T > 273 \text{ K}$ wynosi $3517 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast dla $T < 273 \text{ K}$ $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,786$) [31]. Ciepło właściwe pasternaku, w zależności od wilgotności, poleca się obliczać [15] z uogólnionego równania (6.16). Współczynnik przewodzenia ciepła pasternaku ($m = 0,827$; $\rho = 1024,6$) wynosi [5] $0,392 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla przedziału temperatury 313–323 K. Gęstość nasypowa pasternaku zawiera się w przedziale od 456 do 520 kg m^{-3} [15].

6.6.5. Rzepa

Ciepło właściwe rzepy dla 293 K i $0 < m < 1$ poleca się [15] obliczać z równania (6.17), jak dla buraków. Wartość eksperymentalna ciepła właściwego rzepy [34] wynosi $3890 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,909$). Natomiast dla $T < T_k$ wartość c wynosi $1970 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Współczynnik przewodzenia ciepła rzepy o wilgotności $m = 0,898$ w $T = 301 \text{ K}$ równa się $0,56 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a dyfuzyjność cieplna $a = 1,43 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [15]. Gęstość świeżej rzepy wynosi 830 kg m^{-3} [15].

Współczynnik przewodzenia ciepła rzepy białej ($m = 0,869$) równa się [25] $0,52 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, rzepy czarnej ($m = 0,846$) $0,48 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Odpowiednio współczynnik wyrównywania temperatury wynosi: $1,39 \cdot 10^{-7}$ i $1,36 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Gęstość rzepy białej ($m = 0,846 - 0,888$) waha się od 959 do 980 kg m^{-3} , czarnej ($m = 0,834 - 0,863$) 787 do 1080 kg m^{-3} [25].

6.6.6. Pietruszka

Ciepło właściwe pietruszki w temperaturze 293 K i $0 < m < 1$ może być obliczone [15] z równania uogólnionego (6.16). Ze wzrostem wilgotności wzrasta wartość ciepła właściwego pietruszki [29] i wynosi: $3182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla $m = 0,65$ i $4061 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla $m = 0,95$ [29, 43].

Ciepło właściwe pietruszki rośnie ze wzrostem temperatury. Badania [30] w zakresie temperatury 273–373 K pietruszki rozdrobnionej ($\rho_u = 760$; $m = 0,779$) pozwoliły na sformułowanie następującego wzoru:

$$c = 2961 + 2,423 T; \quad (R = 0,986) \quad (6.33)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła pietruszki wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury. Współczynnik k pietruszki odmiany Berlińska [23, 24], o wilgotności $0,796 < m < 0,892$, zmienia się według zależności:

$$k = 0,106 + 0,43 m; \quad (R = 0,98) \quad (6.34)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła pietruszki rozdrobnionej wzrasta w przedziale temperatury 273–373 K zgodnie z równaniem [30]:

$$k = -0,011 + 1,342 \cdot 10^{-3} T; \quad (R = 0,995) \quad (6.35)$$

Wartości współczynnika k pietruszki [5, 23, 24] są niższe niż dla pozostałych warzyw korzeniowych, co wiąże się z niejednorodnością jej budowy i większą porowatością. Również współczynnik wyrównywania temperatury wzrasta ze wzrostem temperatury i wilgotności [23, 30]:

$$a = 3,413 \cdot 10^{-8} + 3,466 \cdot 10^{-10} T; \quad (R = 0,894) \quad (6.36)$$

$$a = (0,61 + 0,72 m) 10^{-7}; \quad (R = 0,89) \quad (6.37)$$

Gęstość pietruszki (zmierzona) [24] wynosi 992 kg m^{-3} , natomiast wartość średnia gęstości (obliczona) w przedziale temperatury 243–269 K równa się 1026 kg m^{-3} .

6.6.7. Rzodkiewka

Ciepło właściwe rzodkiewki w temperaturze $T = 293 \text{ K}$ i $0 < m < 1$ oblicza się ze wzoru:

$$c = 1388 + 2799 m \quad (6.38)$$

Wartości eksperymentalne ciepła właściwego [15, 25, 34] różnią się około 2,7% od obliczonych z powyższego równania. Ciepło właściwe rzodkiewki ($m = 0,936$) dla temperatury niższej od krioskopowej wynosi $2010 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [29].

Współczynnik przewodzenia ciepła rzodkiewki wynosi $0,42 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Współczynnik wyrównywania temperatury rzodkiewki podgrzewanej od 283 K do 363 K wynosi $1,68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [15]. Gęstość rzodkiewki ($m = 0,921$) równa się 920 kg m^{-3} [25].

6.6.8. Seler

Ciepło właściwe selera poleca się obliczać [15] z uogólnionego równania (6.17), tak samo jak dla buraka i rzepy. Dla $T < T_k$ ciepło właściwe selera ($m = 0,937$) równa się $2010 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [34]. Współczynniki przewodzenia ciepła i wyrównywania temperatury selera ($0,846 < m < 0,902$) rosną [23] ze wzrostem wilgotności:

$$k = 0,135 + 0,51 m \quad (6.39)$$

$$a = (6,1 + 8,8 m) 10^{-8} \quad (6.40)$$

Gęstość selera ($m = 0,88$) [25] równa się 952 kg m^{-3} .

6.7. Warzywa strączkowe

6.7.1. Bób

Ciepło właściwe zależy przede wszystkim od wilgotności. W zakresie wilgotności $0,839 - 0,900$ ciepło właściwe wynosi $3810 - 3935 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [34]. W temperaturze $T = 293 \text{ K}$ i $0 < m < 1$ ciepło właściwe bobu [15] można obliczyć ze wzoru ważnego dla warzyw strączkowych:

$$c = 1430 + 2757 m \quad (6.41)$$

Wpływ obu parametrów na ciepło właściwe bobu w przedziale temperatury $318 - 338 \text{ K}$ i $0 < m < 1$ ilustruje równanie:

$$c = -951 + 5138 m + 8,06 T \cdot m \quad (6.42)$$

Ciepło właściwe bobu o $m = 0,839$ w temperaturze niższej od krioskopowej wynosi [34] $1962 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Ciepło właściwe bobu wysuszonego do $m = 0,125$ wynosi [29] $1256 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Wzrost temperatury powoduje zwiększenie współczynnika przewodzenia ciepła bobu. W temperaturze 273 K , $k = 0,556 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; w 302 K odpowied-

nio $k = 0,698 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [35]. Przewodność cieplna nasion bobu jest większa niż jego warstwy [15].

Współczynnik wyrównywania temperatury bobu zależy od wilgotności i do $m = 0,019$ rośnie do $1,64 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Przy dalszym nawilgoceniu ziaren współczynnik a maleje [15].

Ziarna suche poddane działaniu wilgoci najpierw wypełniają wodą wszystkie pory. Następnie ziarna pęcznieją (zwiększają objętość) a ich gęstość maleje.

6.7.2. Fasola

Ciepło właściwe fasoli może być określane za pomocą równania (6.41). Wartość c dla $T > 273 \text{ K}$ nieznacznie zależy od temperatury. Przy wzroście temperatury od 303 K do 343 K ciepło właściwe fasoli wzrasta tylko o $6 - 8\%$ [15]. W temperaturach niższych od krioskopowej, ciepło właściwe fasoli wzrasta ze wzrostem temperatury.

Współczynnik przewodzenia ciepła fasoli rośnie ze wzrostem wilgotności, natomiast maleje [15] jej dyfuzyjność cieplna (tab. 6.7).

Tabela 6.7.

Przewodność i dyfuzyjność cieplna fasoli ($T = 295 \text{ K}$)

	Wilgotność m			
	0,028	0,045	0,092	0,137
k	0,139	0,155	0,166	0,174
$a \cdot 10^7$	1,26	1,24	1,08	1,03

Gęstość fasoli jest zależna od odmiany i fazy dojrzałości. Gęstość jest najniższa dla fazy młeczej (1145 kg m^{-3}), w fazie woskowej wynosi 1214 kg m^{-3} a w fazie pełnej dojrzałości 1317 kg m^{-3} [15]. Nie ma jednoznacznej zależności między ρ i m oraz między ρ_u i porowatością fasoli [15]. Gęstość nasypowa fasoli wynosi około 780 kg m^{-3} .

6.7.3. Groch

Otrzymane w różnych latach przez kilku autorów [5, 14, 15, 29, 32] wartości ciepła właściwego grochu wykazują dużą zgodność wpływu wilgotności na tę właściwość. Dla zakresu wilgotności $0 < m < 0,129$ Pabis [32] otrzymał następującą zależność $c = c(m)$:

$$c = 5870 m + 1231 \quad (6.43)$$

W szerokim ($0 < m < 1$) zakresie wilgotności i $T = 293$ K obowiązuje [15] wzór:

$$c = 2757 m + 1430 \quad (6.44)$$

Ciepło właściwe groszku ($m = 0,80$) w temperaturze niższej od krioskopowej ($T = 261$ K) jest równe $1758 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Podawane w literaturze wartości eksperymentalne współczynnika przewodzenia ciepła grochu różnią się o 200%. Według [20], dla 275–288 K współczynnik $k = 0,18 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Według [1] wartość współczynnika przewodzenia ciepła zmienia się od 0,30 do $0,47 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Duże różnice w wartościach k są następstwem różnic w wielkościach czynników określających próbkę [15]. Wraz ze zwiększeniem wilgotności ziarna i warstwy grochu wzrasta ich współczynnik przewodzenia ciepła. W przedziale wilgotności $0 < m < 0,285$ współczynnik k grochu zmienia się zgodnie z równaniem [32]:

$$k = 0,129 + 0,48 m \quad (6.45)$$

Przewodność cieplna grochu ($m = 0,745$) jest także zależna od temperatury:

$$k = 2,24 \cdot 10^{-3} T - 0,2425 \quad (6.46)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła grochu zamrożonego jest większy niż świeżego i wynosi $0,502 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla $T = 261$ K ($\rho_u = 705 \text{ kg m}^{-3}$) [15].

Współczynnik wyrównywania temperatury ziaren i warstwy grochu [11] wynosi $1,24 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, ($T = 300$ K). Współczynnik a maleje ze wzrostem wilgotności. Dyfuzyjność cieplna suchej substancji grochu w $T = 293$ K wynosi [32] $1,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, natomiast warstwy ($m = 0,10$) $1,20 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Gęstość grochu zależy od odmiany i fazy dojrzałości. Gęstość zwiększa się w miarę przechodzenia do wyższej fazy dojrzałości. W fazie mleczonej wynosi $1105\text{--}1145 \text{ kg m}^{-3}$, natomiast w fazie pełnej dojrzałości $1332\text{--}1395 \text{ kg m}^{-3}$ [15]. Gęstość grochu maleje podczas jego nawilgocenia, gdyż zwiększa się objętość ziaren.

6.8. Owoce ziarnkowe

6.8.1. Jabłka

Ciepło właściwe jabłek jest zależne przede wszystkim od wilgotności (wartości suchej substancji) i temperatury. Wyniki licznych badań [8, 15, 25, 28] świeżych jabłek wykazują, że ich ciepło właściwe rośnie liniowo ze wzrostem wilgotności.

Dla przedziału wilgotności $m = 0,6\text{--}1,0$ zmianę c jabłek opisuje [15] równanie:

$$c = 1340 + 2859 m \quad (6.47)$$

Dla jabłek o wilgotności $m \leq 0,29$ Dickerson [8] podaje wzór:

$$c = 1675 + 2510 m \quad (6.48)$$

Ciepło właściwe rośnie także ze wzrostem temperatury. Ramaswamy i Tung [36] dla jabłek odmiany Golden Delicious ($m = 0,873$) i przedziału temperatury 272–333 K opracowali równanie:

$$c = 1311 + 7,5 T \quad (6.49)$$

Wpływ obu tych parametrów na ciepło właściwe jabłek ($m = 0,3\text{--}0,9$; $293 \text{ K} < T < 363 \text{ K}$) ilustruje równanie [15]:

$$c = 661 + 3,67 T + 3526 m - 3,6 T \cdot m \quad (6.50)$$

Ciepło właściwe jabłek zamrożonych wzrasta ze wzrostem wilgotności i temperatury. Dla wspomnianej odmiany Golden Delicious ważne są równania [36]:

$$c = 406,44 - 1,48 T; \quad 263 \text{ K} < T \leq 272 \text{ K} \quad (6.51)$$

$$c = -191,66 + 0,791 T; \quad 258 \text{ K} < T \leq 263 \text{ K} \quad (6.52)$$

$$c = -0,879 + 0,0138 T; \quad 193 \text{ K} < T \leq 258 \text{ K} \quad (6.53)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła jabłek jest funkcją kilku parametrów: wilgotności, temperatury, gęstości, porowatości i niejednorodności budowy tkanek. Z tego powodu nie ma jednoznacznej zależności współczynnika k jabłek od m i T . Na podstawie analizy badań 8 prac [15] zestawiono tablicę, w której pokazano, że przy jednakowych wartościach m, T współczynnik k jabłek różni się o 247%. Jest to wynik różnej porowatości (różnej zawartości gazów) jabłek. Wyniki badań eksperymentalnych porowatości wskazują, że zmienia się ona od 12,2% do 33,2% [15]. Sweat [45] zmianę współczynnika przewodzenia ciepła jabłek w temperaturze 301 K opisał równaniem:

$$k = 0,148 + 0,493 m \quad (6.54)$$

Powyższe równanie może być stosowane do owoców zawierających $m > 0,6$. Według [36] dla $T > T_{kr}$ współczynnik k jabłek odmiany Golden Delicious zmienia się następująco:

$$k = 0,394 + 0,212 T \quad (6.55)$$

Równanie wskazuje na liniową zależność przewodności cieplnej jabłek od temperatury. Jak wykazały badania [21] jabłek odmiany Jonathan funkcje $k = k(T)$ i $a = a(T)$ mają swoje maksimum w temperaturze 331–336 K. Przy wzroście temperatury do 328 K współczynnik przewodzenia ciepła rośnie zgodnie z równaniem:

$$c = -0,719 + 0,0046 T \quad (6.56)$$

Dla przedziału temperatury 338–363 K współczynnik przewodzenia ciepła jabłek maleje:

$$k = 1,098 - 0,0014 T \quad (6.57)$$

Taki przebieg zależności $k = k(T)$ jest następstwem zmiany ciśnienia mieszaniny parowo-powietrznej wewnątrz komórek owoców. W celu zbadania wpływu struktury na przewodność cieplną jabłek zbadano [21] także próbkę ze strukturą zniszczoną. Dla próbki puree funkcja $k = k(T)$ ma postać:

$$k = 0,182 + 0,0014 T \quad (6.58)$$

przy czym $k_{puree} > k_{jabłek}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła jabłek Golden Delicious i Granny Smith [36] ($\rho = 843 - 847 \text{ kg m}^{-3}$) w zależności od $0,858 < m < 0,873$ i $272 \text{ K} < T < 298 \text{ K}$ opisuje wzór:

$$k = -1,68 + 1,60 m + 0,0025 T \quad (6.59)$$

Podczas zamrażania jabłek, ze zmniejszeniem temperatury i wzrostem wilgotności, rośnie ich przewodność cieplna, np. dla $248 \text{ K} < T < 272 \text{ K}$ i $0,856 < m < 0,873$ [36]:

$$k = -7,488 - 0,0103 T + 13,3 m \quad (6.60)$$

Według [36] współczynnik a jabłek Golden Delicious dla $T > T_f$ zmienia się następująco:

$$a = (0,00278 T + 1,39) 10^{-7} \quad (6.61)$$

W procesie zamrażania współczynnik a tych jabłek zmienia się od $1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla T_{kr} do $9,43 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla temperatury 248 K. Współczynnik wyrównywania temperatury jabłek w czasie suszenia, przy $0,24 < m < 0,76$, zmienia się zgodnie ze wzorem:

$$a = (0,724 + 0,702 m) 10^{-7} \quad (6.62)$$

Gęstość 19 odmian jabłek uprawianych w USA waha się [29] od 710 kg m^{-3} do 890 kg m^{-3} . Według [3] gęstość jabłek wynosi 800 kg m^{-3} .

Podczas 4,5 miesięcznego przechowywania jabłek w $T=274 \text{ K}$ ich masa zmniejszyła się o 7,8%, a gęstość odpowiednio od 1020 do 780 kg m^{-3} [15]. W procesie blanszowania rośnie gęstość jabłek. Wzrost gęstości jest tym większy, im dłużej trwa ten proces, im wyższa temperatura medium grzejnego i niższe ciśnienie. Na wzrost gęstości jabłek wpływa także blanszowanie w syropie cukrowym, gdyż w tym przypadku gęstość syropu zassanego do kapilar tkanki jabłek jest większa od gęstości wody.

Proces zamrażania wpływa nieznacznie na gęstość jabłek. Według [36] gęstość jabłek Golden Delicious w temperaturze 275 K wynosiła 847 kg m^{-3} , 785 kg m^{-3} w 253 K i 791 kg m^{-3} w 148 K .

6.8.2. Gruszki

Ciepło właściwe gruszek w 293 K dla zakresu wilgotności $0 < m < 1$, poleca się [15] obliczać z równania ważnego dla owoców ziarnkowych:

$$c = 1383 + 2804 m \quad (6.63)$$

Różnice między wartościami eksperymentalnymi [3, 25, 28] ciepła właściwego i obliczonymi z powyższego wzoru nie przekraczają 4%. Ciepło właściwe gruszek w temperaturze niższej od krioskopowej wynosi: $c = 1884 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($m = 0,827$) [28], lub $c = 1842 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla $m = 0,794$ w $T = 233 \text{ K}$ [19].

Współczynnik przewodzenia gruszek uprawianych w Bułgarii [25] wynosi: $k = 0,49 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla odmiany Popska o wilgotności $m = 0,853$. Według [45] współczynnik przewodzenia ciepła gruszy ($m = 0,868$) w $T = 301 \text{ K}$ wynosi $0,595 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Współczynnik wyrównywania temperatury gruszek odmiany Popska równa się $a = 1,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, natomiast odmiany Pas Krasan $a = 1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [25]. Dyfuzyjność cieplna gruszki odmiany Lula w przedziale temperatury $273 \text{ K} - 314 \text{ K}$ [11] wynosi $1,54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Gęstość świeżych gruszek waha się w przedziale $968 - 1130 \text{ kg m}^{-3}$ [15], gęstość nasypowa wynosi 600 kg m^{-3} .

6.9. Owoce pestkowe

6.9.1. Śliwy

Ciepło właściwe śliw w temperaturze 293 K i przy wilgotności $0 < m < 1$ poleca się obliczać [15] ze wzoru:

$$c = 1391 + 2769 m \quad (6.64)$$

Równanie jest ważne nie tylko dla śliw, lecz także dla innych owoców pestkowych. Różnica w wartościach c obliczonych z równania i otrzymanych eksperymentalnie nie przekracza 3%. Ciepło właściwe wysuszonych ($m = 0,28 - 0,35$) prunelek równa się [6] $2219 - 2470 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Ciepło właściwe śliwy ($m = 0,857$) zamrożonej wynosi [28] $1884 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła śliw zawiera tabela 6.8.

Tabela 6.8.

Współczynnik przewodzenia ciepła śliw

Nazwa	Wilgotność m	Temperatura K	Wartość k	Literatura
Śliwa		299	0,55	[45]
Śliwy renklody	0,795		0,55	[25]
Śliwy węgierki	0,818		0,49	[25]
Śliwy węgierki	0,850	293 – 373	0,543 = const	[43]
Śliwa sucha		291	0,29	[34]
Warstwa śliwy mąlejk, twardej suchej		255 – 260	0,30	[15]
Warstwa śliwy upakowanej		254 – 259	0,24	[15]

Współczynnik wyrównywania temperatury śliwek węgierki o wilgotności $m = 0,818$ wynosi [25] $1,36 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, natomiast renklod o wilgotności $m = 0,795$ wynosi $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Gęstość śliwek zmienia się w szerokich przedziałach, od 932 kg m^{-3} [29] do 1089 kg m^{-3} [15]. Porowatość warstwy owoców zawiera się od 32 do 42%.

6.9.2. Czereśnie

Ciepło właściwe czereśni oblicza się ze wzoru (6.64). Wartości eksperymentalne tego parametru i obliczone z powyższego wzoru różnią się około 2% [15]. Ciepło właściwe miąższu czereśni ($m=0,77$) równa się $3601 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast ciepło właściwe czereśni zamrożonej wynosi $1884 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [6].

Współczynnik przewodzenia ciepła czereśni równa się $0,54\text{--}0,55 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast dyfuzyjność cieplna $a = 1,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [12] lub $1,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ według [25].

Gęstość tych owoców zawiera się w przedziale od 1026 do 1072 kg m^{-3} (dla wilgotności $m = 0,702\text{--}0,779$) [25].

6.9.3. Wiśnie

Ciepło właściwe wiśni, podobnie jak innych owoców pestkowych, można [15] obliczać z równania (6.64). Różnica między wartościami eksperymentalnymi [15, 25, 28, 34] ciepła właściwego i obliczonymi z równania nie przekracza 2%.

Istnieją wzory [6] uwzględniające wpływ innych parametrów, np. średnicy ekwiwalentnej owocu na ciepło właściwe. Jednakże ich dokładność jest mniejsza niż równania (6.64), a wpływ średnicy na ciepło właściwe wynoszący około 0,2% jest pomijalny.

Współczynnik przewodzenia ciepła wiśni o wilgotności $m=0,837$ według [25] wynosi $k = 0,52 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. W [9] podano, że dla przedziału temperatury $298 \text{ K} < T < 348 \text{ K}$ przewodność cieplna wiśni jest niezmienna i równa się $0,505 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Współczynnik k wiśni podczas zamrażania fluidyzacyjnego osiąga $1,11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [15].

Współczynnik wyrównywania temperatury wiśni waha się od $1,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla miąższu wiśni cierpkiej [11] do $1,60 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [15].

Gęstość wiśni zmienia się od 970 do 1092 kg m^{-3} [15, 25], natomiast zawartość powietrza w tym owocu waha się od 1,2 do 2,1%.

6.9.4. Brzoskwinie

Ciepło właściwe brzoskwiń może być obliczane z uogólnionego wzoru (6.64), ważnego dla owoców pestkowych. Ciepło właściwe brzoskwini o wilgotności 0,851 [15], 0,869 [6] równa się $3768 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Brzoskwinia wysuszona do $m = 0,434$ ma ciepło właściwe $2570 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [13]. Natomiast ciepło brzoskwini zamrożonej ($T = 233 \text{ K}$), $m = 0,896$ wynosi $1717 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Przewodność cieplna brzoskwiń zawiera się w przedziale $0,50\text{--}0,585 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [25, 45], natomiast współczynnik wyrównywania temperatury całej brzoskwini w przedziale temperatury $277 \text{ K}\text{--}300 \text{ K}$ wynosi [11] $1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Gęstość brzoskwiń zawiera się w przedziale od 933 do 1081 kg m^{-3} i jest zależna od wilgotności i porowatości owoców. Porowatość brzoskwiń wynosi 1,6–5,3% [15].

6.9.5. Morele

Ciepło właściwe moreli może być określane z równania (6.64). Wartości eksperymentalne c moreli różnią się o około 2% od obliczonych z powyższego wzoru.

Zmniejszenie wilgotności owocu powoduje obniżenie jego ciepła właściwego. Ciepło właściwe moreli suszonych ($m=0,263$), w przedziale temperatury $233 \text{ K}\text{--}352 \text{ K}$, jest opisane równaniem (na podstawie wyników badań Riedel'a [36], podanych w [15]):

$$c = 1097 + 4,8 T; \quad (R = 0,993) \quad (6.65)$$

Ciepło właściwe moreli zamrożonych ($m=0,854$) wynosi $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [28].

Współczynnik przewodzenia ciepła świeżych moreli równa się $0,51 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [25], a współczynnik wyrównywania temperatury $(1,50\text{--}1,51) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [18, 43].

Gęstość moreli według [15] waha się od 950 kg m^{-3} do 1109 kg m^{-3} , natomiast gęstość nasypowa od 550 do 640 kg m^{-3} [1, 15].

6.10. Owoce południowe

6.10.1. Cytryny

Ciepło właściwe cytryny w zakresie wilgotności $0 < m < 1$ jest opisane wzorem [15]:

$$c = 1520 + 2667m \quad (6.66)$$

Eksperymentalne wartości ciepła właściwego cytryn [6,13] różnią się tylko o 1,5% od obliczonych z powyższego równania. Ciepło właściwe cytryny o wilgotności $m = 0,893$ wynosi [6,34] $3850 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast cytryny zamrożonej $c = 1930 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [28].

Wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej cytryn różnią się znacznie. Według [45] przewodność cieplna cytryny o wilgotności $m = 0,899$ równa się $0,49 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, natomiast według [2] $k = 0,83 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (dla owocu o wilgotności $m = 0,930$).

Dyfuzyjność cieplna cytryn zmienia się od $1,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ do $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [2,25] przy bardzo zbliżonej wilgotności i temperaturze.

Podane rozbieżności są wynikiem różnej zawartości gazów w owocach. Zawartość gazów w cytrynach wynosi od 4,2% do 30,7% [15].

Również gęstość cytryn wykazuje duże wahania – 930 kg m^{-3} [29] do 1169 kg m^{-3} [25]. Gęstość nasypowa wynosi 769 kg m^{-3} [29].

6.10.2. Grejpfruty

Ciepło właściwe całego grejpfruta wynosi $3760 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dla owocu o $m = 0,847$ [15] lub $3819 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ o $m = 0,88$ [6]. Podobną wartość c ma miąższ – $3710 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [34]. Natomiast wartość ciepła właściwego zamrożonego grejpfruta ($m = 0,88$) równa się $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [42].

Według [18] współczynnik przewodzenia ciepła grejpfrutów w przedziale temperatury $288 - 273 \text{ K}$ wynosi $0,40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Kolarow [25] podaje, że przewodność cieplna grejpfrutów o wilgotności $m = 0,847$ równa się $0,56 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Podobnie duże różnice obserwuje się w dyfuzyjności cieplnej owoców. Według [11] współczynnik $a = 0,84 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($T = 309 \text{ K}$), natomiast w [25] dyfuzyjność cieplna grejpfrutów o wilgotności $m = 0,847$ równa się $1,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Różnice w wartościach a , k są wynikiem budowy owoców i zawartości gazów w tkankach.

6.10.3. Pomarańcze i mandarynki

Istnieje kilka wzorów, opisujących zależność ciepła właściwego pomarańczy od ich wilgotności [15]:

$$c = 1520 + 2667m, \quad 0 < m < 1 \quad (6.67)$$

$$c = 1453 + 2516m, \quad 0 < m < 0,9 \quad (6.68)$$

Różnice wartości ciepła właściwego pomarańczy obliczonego z powyższych wzorów wynoszą około 5%. Ginzburg i Gromow w swojej monografii [15] polecają do obliczania ciepła właściwego owoców południowych (także ich miąższu), w temperaturze $T = 293 \text{ K}$, następujące równanie:

$$c = 1387 + 2800m \quad (6.69)$$

Ciepło właściwe mandarynek o wilgotności $m = 0,873$ równa się $3768 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i $1926 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (dla owocu zamrożonego) [28,34].

Współczynnik przewodzenia ciepła owoców zależy od kilku parametrów: wilgotności, grubości skórki, zawartości w niej powietrza i gęstości. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła pomarańczy od grubości δ skórki opisana jest wzorem [15]:

$$k = 0,406 - 0,0209 \delta, \quad 3,0 \text{ mm} < \delta < 9,6 \text{ mm}; \quad (6.70)$$

Wpływ gęstości pomarańczy na ich współczynnik przewodzenia ciepła ilustruje wzór:

$$k = 0,0076 \rho - 0,396 \quad (6.71)$$

Wzór jest ważny dla zakresu gęstości owoców $790 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 971 \text{ kg m}^{-3}$.

Współczynnik przewodzenia ciepła pomarańcz nie zależy [15] od ich średnicy ekwiwalentnej. Wraz ze zwiększeniem wilgotności miąższu pomarańcz rośnie ich przewodność cieplna [15].

Współczynnik wyrównywania temperatury pomarańcz zmienia się w szerokim przedziale wartości: od $0,944 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla odmiany Valencia i w zakresie temperatury 273–313 K [11, 12] do $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [15].

Gęstość pomarańcz zmienia się od $930\text{--}950 \text{ kg m}^{-3}$ [29] do 1070 kg m^{-3} [25]. Duży wpływ na gęstość owoców ma zawartość w nich gazów, wynosząca od 4,7% do 31,3% [15]. Im grubsza skórka, tym niższa gęstość pomarańcz. Gęstość nasypowa owoców wynosi 768 kg m^{-3} [29].

Literatura

1. Алмаши Э., Эрдели Т., Шарой Т. 1981. Быстрое замораживание пищевых продуктов. Москва. Легкая и пищевая промышленность.
2. Ансари С.А., Йгбал Б. 1974. On Thermal Conductivities of Plant Products. International Journal of the Refrigeration. Congress Barcelona, 17-20.
3. Beek G. van. 1979. Berekening van thermofysische eigenschappen van tuinbouw-produkten wit de samenstelling en toepassing daarvan bij de berekening van de veldwarmte. Koeltechniek, 71, nr 1 (januari), 3-9.7.
4. Beek G. van. 1983. De warmtegeleidingscoëfficiënt van verpakte diepvrie sspinzatie Voedingsmiddelentechnologie 16 (23), 154-155.
5. Buhri A.B., Singh R.P. 1993. Measurement of Food Thermal Conductivity Using Differential Scanning Calorimetry. Journal of Food Science. Vol. 58, No. 5, 1145-1147.
6. ChoKyun R. 1975. Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials. D.Riedel Publ. Comp. Boston.
7. Czerniewicz J., Gajewski A., Stęplewska J. 1976. Ciężar właściwy ziemniaków a ich skrobiowość. Przemysł fermentacyjny i rolny. nr 2. 18-22.
8. Dickerson R.W. 1968. In: The Freezing Preservation of Foods, Vol. 2, 4th Edition, AVI, Westport, Connecticut, USA, pp. 26-51.
9. Федоров В.Г. Рябцев В.В., Неверов И.Г. 1975. Теплофизические характеристики вишни. Консервная и общесушильная промышленность. nr 9, 22-24.
10. Фикин А.Г., Трифонов С.Д. 1983. Интенсификация процесса охлаждения клубники и малины. Холодильная техника, nr 3, 57-60.
11. Gaffney J.J., Baird C.D., Eshleman W.D. 1980. Review and analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. ASHRAE Transactions, vol. 86, part 2, 261-280.
12. George R.M. 1990. A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products. Campden Food and Drink Research Association. Technical Bulletin No. 73. February.
13. George R.M., Holdsworth S.D. 1990. A Literature Survey of Heat Capacity of Food Products Campden Food and Drink Research Association. Technical Bulletin No. 76. September.
14. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И., Уколов В.С. 1975. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие. Москва. Пищевая промышленность.
15. Гинзбург А.С., Громов М.А. 1987. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. В.О. „Агропромиздат”. Москва.
16. Гогъч В. 1973. Pomiaru przewodności cieplnej buraka cukrowego i ziemniaka. Roczniki Nauk Rolniczych. T. 70-C-3, 55-62.
17. Gratzek J.P., Toledo R.T. 1993. Solid Food Thermal Conductivity Determination at High Temperature. Journal of Food Science. vol. 58, No. 4, 908-913.
18. Громов М.А. 1971. Теплофизические характеристики плодов. Консервная и овощесушильная промышленность. No. 10, 35-36.
19. Громов М.А. 1972. Теплофизические характеристики плодов при отрицельных температурах. Консервная и овощная промышленность. No. 2, 34-35.
20. Heldman D.R. 1975. Food Process Engineering. West-Port., 401.

21. Ильясов С.Г., Ангерсбах Л.К., Ангерсбах Н.И., Панин А.С. 1987. Теплофизические характеристики плодов и винограда. Изв. Вузов. Пищевая технология No. 4, 81-83.
22. Jankowski T., Dubowik J., Jankowski S. 1976. Thermal Properties of Sugar Beets. *Annals of Poznań Agricultural University-LXXXIX*, 83-92.
23. Jankowski T., Jankowski S., Koziol K. 1981. Some Thermal Properties of Root Vegetables. *Acta Alimentaria Polonica*. vol. VII (XXXI), Nr 3-4, 137-146.
24. Jankowski T. 1990. Właściwa przewodność cieplna warzyw korzeniowych. Wyniki doświadczeń i obliczeń modelowych. *Chłodnictwo*. tom XXV. nr 5-6, 20-23.
25. Коларов К.М., Гарчева Т.В., Попов Г.И. 1989. Физические характеристики на суровини полуфабрикаты и хранительны продукты. Земиздат. София.
26. Kutev K., Havlíček Z., Drabková J. 1972. Měření tepelné fyzikálních vlastností karotky. *Průmysl Potravin*. No. 2, 47-49.
27. Leonhardt G.F., Vessoni Penna T.C., Baruffaldi R., Colombo A.J. 1983. Determinacao da difusividade termica da cenoura (*Daucus carota* L.). *Cienc. Tecnol. Aliment*. 3(1): 68-74.
28. Lewin D.N. 1962. Plant handbook data. *Food Engeineering*, No. 3, 89-94.
29. Moshenin N.N. 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural Materials. Gordon and Breach Publ. New York.
30. Niesteruk R., Konopko H., Demianiuk L., Kuryłowicz A. 1991. Badania właściwości termofizycznych wybranych grup produktów spożywczych. *Po-litechnika Białostocka. Katedra Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego*. Białystok
31. Ordinaz W.O. 1946. Specific Heat of Foods in Cooking. *Food Industries*. No. 9, 101.
32. Пабис С., Биловицкая Э., Гадай П. 1970. Теплопроводность и коэффициент температуропроводности в слое зерна некоторых сельскохозяйственных продуктов. *Инженерно-физический журнал*. Nr 3, 501-507.

33. Parker R.E., Stout B.A. 1967. Thermal Properties of Tart Cherries. *Transactions of the ASAE*, No. 4, p.489, 491, 496.
34. Polley S.L., Snyder O.P., Kotnour P. 1980. A Compilation of Thermal Properties of Foods. *Food Technology-November*, 76-94.
35. Quashou M.S., Vachon R.I., Touloukian Y.S. 1972. Thermal Conductivity of Foods. *Transactions of the ASHRAE*. Vol. 15, No. 2, 165-183.
36. Ramasway H.S., Tung M.A. 1981. Thermophysical Properties of Apples in Relation to Freezing. *Journal of Food Science*. Vol. 46, 724-728.
37. Rice P., Selman J.D., Abdul-Rezzak R.K. 1988. Effect of temperature on thermal properties of „Record” potatoes. *International Journal of Food Science and Technology* 23, 281-286.
38. Riedel L. 1977. Enthalpiemessungen an Lebensmitteln. *Chem.Mikrobiol., Technol., Lebensm.*, No. 4, 118-127.
39. Sharma M.K., Isleib D.R., Dexter E.T. 1958. Specific Gravity of different zones within Potato Tubers. *American Potato Journal*. No. 12, 784-788.
40. Синат-Радченко Д.Е. 1987. Теплофизические свойства ткани корнеплода сафранной свеклы. *Пищевая промышленность. Республиканский межвузовский сборник научных трудов*. Киев. Вып. 23, 59-61.
41. Сингх Р.П. 1982. Thermal Diffusivity in Food Processing. *Food Technology*. No. 2, 87-91.
42. 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. 34, nr 7, 17-19.
43. 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. 36, nr 2, 10-12
44. Шпак Е.Ю., Каспаров М.Н., Микрюков В.В. 1980. Исследование теплофизических характеристик в диапазоне температур 20°C...90°C методы двух температуровременных интервалов. *Сборник научных трудов Ленинград. инс.сов.торг.*, 94-104.

45. Sweat V.E. 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science. Vol. 39, 1080-1083.
46. Toledo R.T. 1991. Fundamentals of food process engineering 2nd ed. Van Nostrand Reinhold New York, 582.
47. Wadsworth J.I., Spadaro J.J. 1969. Transient temperature distribution in whole sweet potato roots during immersion heating. Food Technology (23), 85-89.
48. Видев К., Ранчков Г. 1981. Метод за определяне на коефициента на теплопроводность на плодове и зеленчуци. Научни трудове на Высшия институт по хранителна и вкусова промишленост Пловдив. Том XXVIII, св. II. 385-392.
49. Woodams E.E., Nowrey J.E. 1968. Literature Values of Thermal Conductivities of Foods. Food Technology. No. 4. 494-502.
50. Вышелесский А.Н., Громов М.А. 1967. Тепло- и массообмен в картофеле и овощах. Консервная и овощесушильная промышленность . nr 6, 17-19.

THERMAL PROPERTIES OF FOODS

S u m m a r y

In the first part of the monograph thermal properties, such as specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity and density of meat and processed meat, fish and marine products, milk and milk products, fat, fruits and vegetables are presented. For each group of products a description is provided of the influence of temperature, water content and content of other basic components as well as the influence of phase changes as freezing, fat melting, denaturation and coagulation of proteins and starch cementing on thermal properties.