

DYFUZYJNOŚĆ CIEPLNA KRYŁA W ZAKRESIE TEMPERATUR JEGO PRZETWÓRSTWA

Roman Niesterek, Tadeusz Matuszek

Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechniki Gdańskiej

WSTĘP

Operacje obróbki termicznej stanowią zasadniczą część procesu przetwarzania kryła (temp. 360-378 K) na produkty spożywcze i paszowe oraz ich przechowywania chłodniczego (temp. ok. 240 K). Obliczenia procesów niestacjonarnej wymiany ciepła, takich jak nagrzewanie i schładzanie wymagają znajomości dyfuzyjności cieplnej obrabianych surowców i otrzymanych produktów w odpowiednim zakresie temperatur.

METODA POMIARU DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ

Metoda akalorymetru opiera się na teorii Kondratiewa [13] o nagrzewaniu (stygnięciu) ciał. Teoria ta opisuje prawa zmian pola temperaturowego ciała nagrzewanego bądź ochładzanego w środowisku, przy wartości liczby Fouriera $F_0 \geq 0,55$ [1,17]. W stadium początkowym wymiana ciepła ma charakter „nieuporządkowany”, wskutek przypadkowego stanu ciała, matematycznie opisywanego szeregami nieskończonymi.

Po upływie określonego czasu następuje zasadnicze stadium wymiany ciepła między badanym ciałem i środowiskiem. Jest to faza regularna procesu wymiany ciepła. Pomiar współczynnika wyrównywania temperatury kryła wykonane zostały w warunkach fazy regularnej I rodzaju, tzn. przy zachowaniu niezmiennej temperatury ośrodka, w którym ciała nagrzewa się (stygnie) $T = \text{idem}$ i wartości współczynnika wnikania ciepła $\alpha \rightarrow \infty$ [1, 13,17]. Wówczas wartość dyfuzyjności cieplnej można obliczyć ze wzoru:

$$\alpha = K \cdot m_{\infty} \quad (1)$$

gdzie K - oznacza współczynnik zależny od kształtu ciała,

m_{∞} - prędkość nagrzewania się lub stygnięcia badanego ciała, przy $\alpha \rightarrow \infty$.

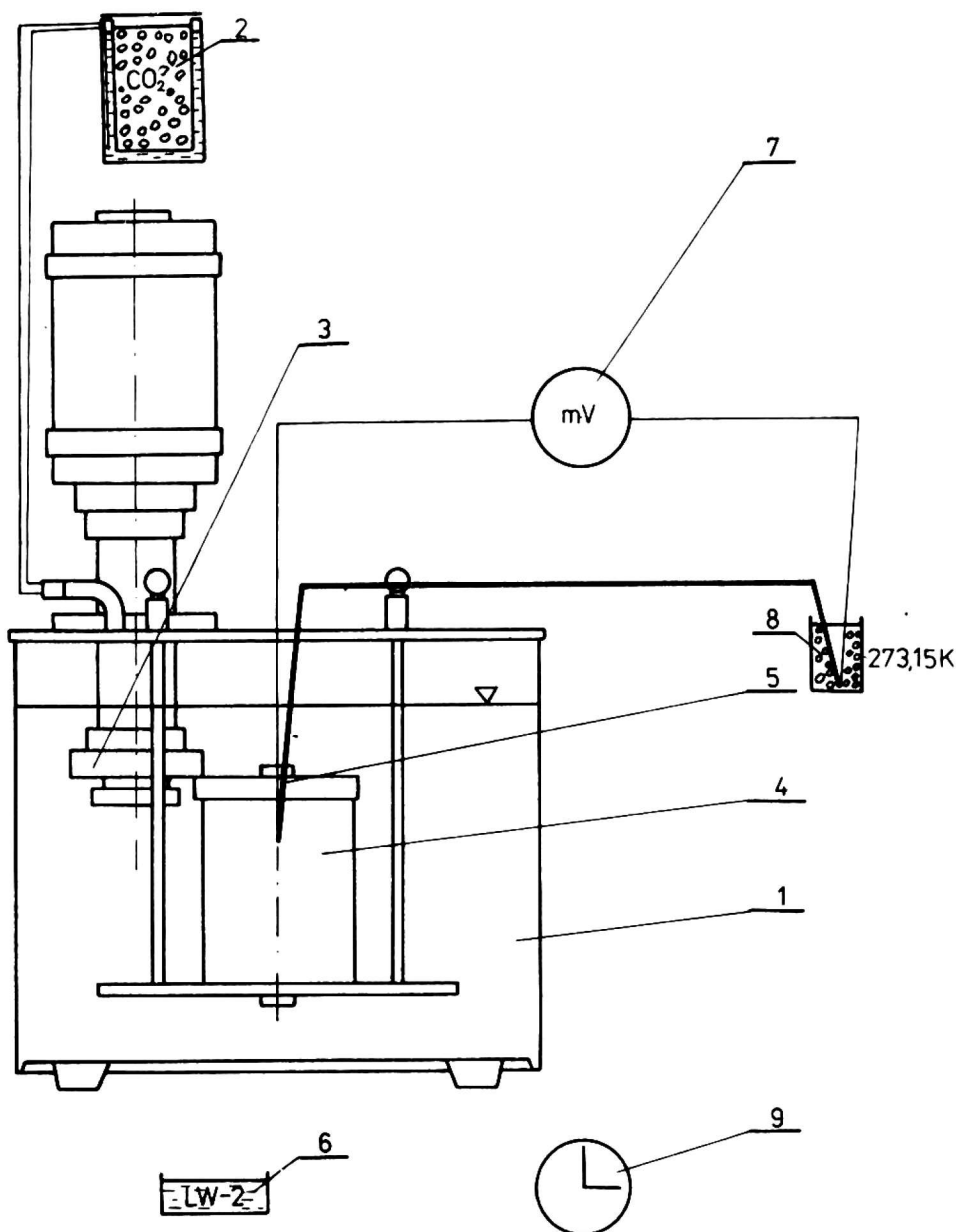
Dla walca wysokości h i promieniu R współczynnik K określa wzór:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,4048}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2} \quad (2)$$

Stanowisko pomiarowe

Układ do pomiaru dyfuzyjności cieplnej kryła metodą akalorymetru przedstawiono na rysunku 1. Jako ośrodka o niezmienniej temperaturze T_0 wykorzystano ultratermostat (1) z 15 dcm³ wody destylowanej, dla pomiarów w zakresie temperatur 290-360 K. Przy pomiarach w temperaturach 240-290 K wodę zastępowano spirytusem, cyrkulującym między ultratermostatem i zbiornikiem (2) ze stałym dwutlenkiem węgla. W celu zapewnienia równomiernej temperatury w całej objętości cieczy termostatycznej i warunku metody $\alpha \rightarrow \infty$, ciecz była intensywnie mieszana przez mieszadło i pompkę (3) recyrkulacyjną ultratermostatu. Próbkę badanej substancji umieszczono w akalorymetrze (4) z termoelementem (5) żelazo-konstantan w centrum próbki. Temperatura próbki była o 5 deg. wyższa lub niższa od T_0 . Do utrzymania temperatury próbki różnej od temperatury T_0 cieczy termostatycznej służyła łaźnia wodna (6) lub drugi ultratermostat.

W pomiarach posłużono się kalorymetrem walcowym. Współczynnik kształtu $K = 8,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ określono według metody podanej przez Kondratiewa [13]. Błąd względny określenia współczynnika $\delta K = 0,72\%$ [11,18]. Wskazanie termoelementu (5) odczytywano z woltomierza (7) cyfrowego. Gorący koniec termoelementu był umieszczany w osi próbki, zimny w naczyniu (8) z topniejącym lodem. Niezmiennosc temperatury cieczy kalorymetrycznej w czasie pomiaru sprawdzana była termometrem rtęciowym z elementarną działką 0,1 deg i cyfrowym termometrem kwarcowym. Do rejestracji czasu służył zegar (9) elektroniczny cyfrowy lub stoper. Pomiaru cechujące z zastosowaniem cukru jako substancji wzorcowej wykazały, że różnica wartości współczynnika wyrównania temperatury według danych literaturowych (6) i pomierzonych na stanowisku nie przekraczała 2,6%.



Rys. 1. Układ do pomiaru dyfuzyjności cieplnej kryła metodą akalorymetru

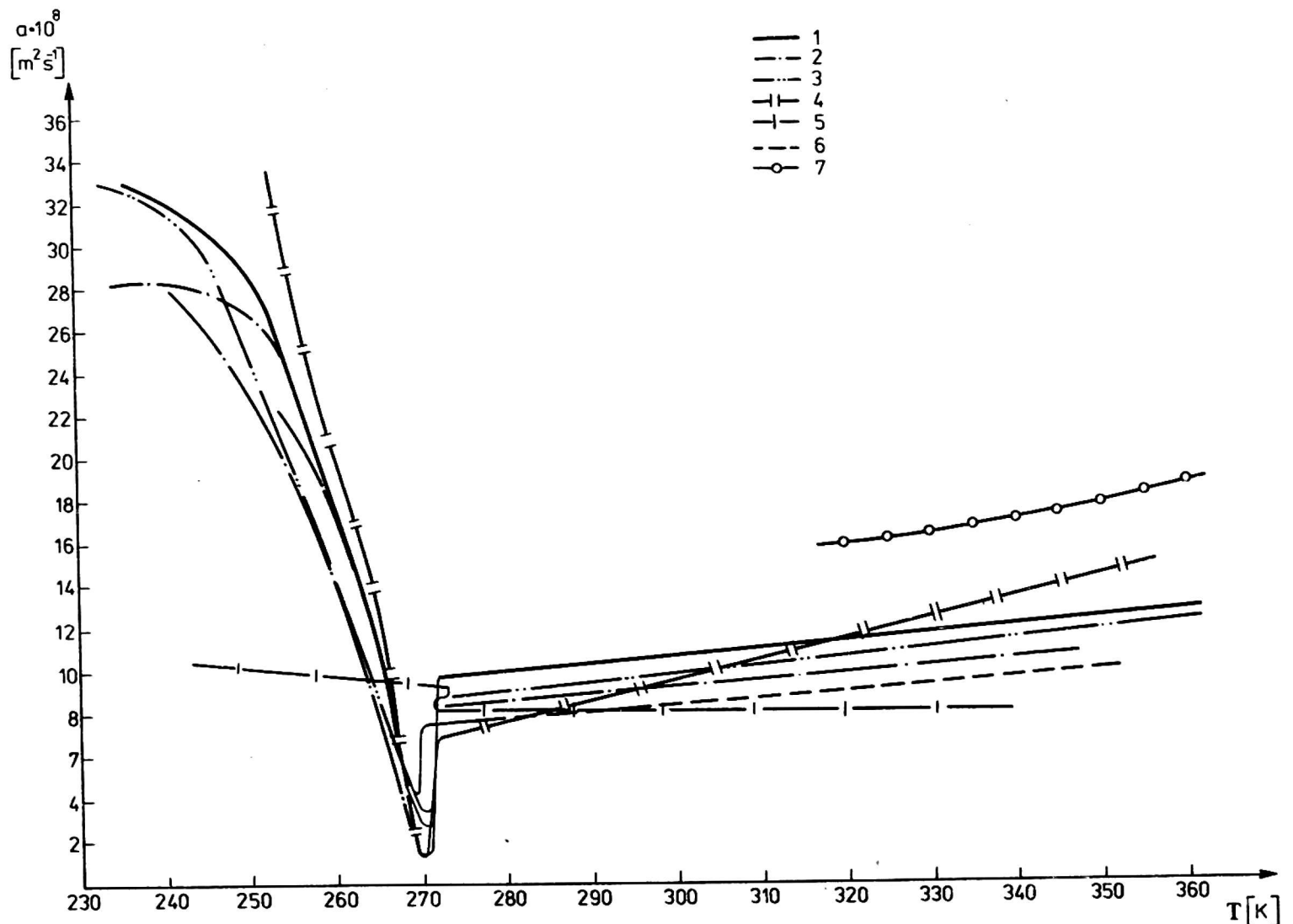
Zakres badań dyfuzyjności cieplnej kryła i produktów
jego przetwórstwa

Badania dyfuzyjności cieplnej przeprowadzono dla materiału rozmrażanego pochodzącego z wszystkich czterech Polskich Morskich Ekspedycji Antarktycznych. Pomiaru wykonano dla: kryła całego surowego i gotowanego, mięsa wytwarzanego metodami „MIR”, „DALMOR” i „LAITRAM”, koagulatu, mączki i pancerza. Materiał do badań był przechowywany w temperaturach 248-251 K. Zachowywano oryginalne opakowania, tzn. folię polietylenową, w odniesieniu do kryła całego surowego, gotowanego, koagulatu i mączki oraz pudełka kartonowe w stosunku do mięsa [18]. Przed pomiarami wykonywane były nie-

zbędne analizy w celu bliższego scharakteryzowania badanych substancji. Przykładową charakterystykę materiału z IV Ekspedycji zawiera tabela 1. Ponadto ustalono gęstość badanej substancji w α -kalorymtrze. Błąd względny określenia współczynnika α 3,6% [11, 18].

WYNIKI POMIARÓW I ICH OMÓWIENIE

Wyniki pomiarów dyfuzyjności cieplnej kryla i produktów jego przetwórstwa przedstawiono na rysunku 2 i tabeli 1, natomiast rysunek 3 i tabela 2 stanowią porównanie otrzymanych wartości z danymi literaturowymi dla innych produktów spożywczych, takich jak: ryby, mięso wołowe i wieprzowe oraz farsze rybne i mięsne. Wartości współczynników α dla bloków ostroboka, dorsza i makreli na rysunku 3 pochodzą z pracy Erlichmana i Ionova [8], przebieg funkcji $\alpha = \alpha(T)$ dla soku z [5].

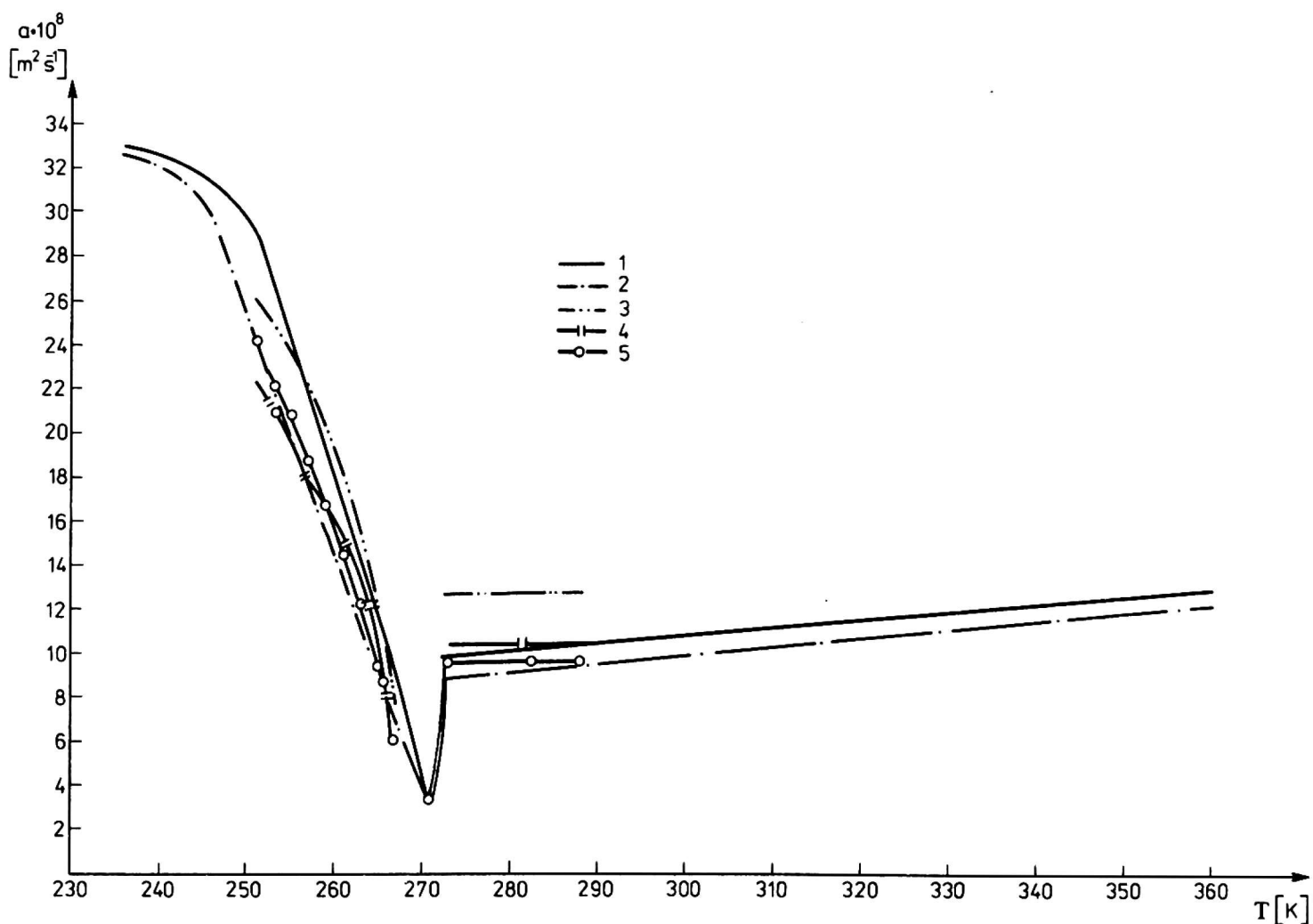


Rys. 2. Wyniki pomiarów dyfuzyjności cieplnej kryla i produktów jego przetwórstwa: 1 - kryl cały surowy, 2 - kryl cały gotowany, 3 - mięso krylowe, 4 - koagulat, 5 - mączka, 6 - pancerz, 7 - sok wg [5]

T a b e l a 1

Dyfuzyjność cieplna kryla i jego produktów przetwórstwa

Materiał	Sucha masa %	Zawartość tłuszczu %	Zawartość pancerza, % na s.m.	Popiół, % na s.m.
Krył cały surowy	21,37	10,96	8,51	11,90
Krył cały gotowany	20,72	9,15	9,39	11,62
Mięso „MIR”	16,07	7,01	2,90	12,61
Mięso „DALMOR”	17,35	4,12	1,70	9,87
Mięso „LAITRAM”	15,39	2,39	0,60	9,19
Koagulat	27,38	6,46	1,30	6,46
Mączka	94,15	6,58	12,44	13,86
Pancerz	29,93	3,92	39,08	25,70



Rys. 3. Porównanie otrzymanych wartości z danymi literaturowymi dla innych produktów spożywczych: 1 - krył cały surowy, 2 - mięso krylowe, 3 - mały dorsz w bloku [8], 4 - makreła w bloku [8], 5 - ostrobok w bloku [8]

W substancji spożywczej o wilgotności rzędu 74-80%, jakim jest kryl i produkty jego przetwórstwa w temperaturach niższych od około 254 K ilość wody wymrożonej sięga 90% [20,22] i tam nie zachodzą egzo- lub endotermiczne reakcje chemiczne lub przemiany fazowe, dające widoczny efekt energetyczny. Z licznych prac Riedla [19, 21,24] - nad entalpią i ciepłem właściwym produktów spożywczych wynika, że $c \approx 2550 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ i nieznacznie rośnie z temperaturą [20,22]. W tym zakresie temperatur współczynnik przewodzenia ciepła substancji spożywczych [10,15,16,28] powoli maleje z rosnącą temperaturą (dla kryla i jego produktów tę prawidłowość potwierdzają prace autorów [18] oraz [10,25]). Jednocześnie, gęstość substancji dla procesów zamrażania może być przyjęta jako niezmienna [14]. Takie zmiany c , λ i ρ prowadzą do powolnego obniżania się wartości dyfuzyjności cieplnej w temperaturach 240-254 K, od $34 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ do ok. $27 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. W 254 K w krylu i jego produktach rozpoczyna się endotermiczna przemiana fazowa lód-woda i kończy w temperaturze ok. 270 K. Ekwiwalentne [9] ciepło właściwe substancji gwałtownie rośnie do wartości rzędu $100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a współczynnik przewodzenia ciepła wody w niej zawartej maleje około 4,5 razy. Współczynnik przewodzenia ciepła lodu w temperaturze 254 K równa się $2,444 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [7], a wody w 273, 15 K $0,5443 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ według Honiga czy $0,5690 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ według Meyers Lexikon i VDI - Wärmeatlas [27]. Dyfuzyjność cieplna kryla i produktów jego przetwórstwa maleje do: $3,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla kryla całego surowego w 271 K, $0,486 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ w 270,6 K dla kryla gotowanego, $2,97 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla mięsa krylowego (bez rozróżniania metody produkcji) w 271,1 K, $1,28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla koagulatu w 271 K i $3,16 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ dla pancerza w 269 K [18]. Po zakończeniu przemiany fazowej dyfuzyjność cieplna pozostaje rosnącą funkcją temperatury i wilgotności badanej substancji. Przebiegi funkcji $\alpha = \alpha(T)$ dla kryla całego surowego, kryla gotowanego, mięsa i pancerza na rysunku 2 są praktycznie równoległe, a proste dla mączki i pancerza leżą poniżej przebiegów dla kryla surowego czy mięsa (patrz zawartość suchej masy w tabeli 1). Największe przyrosty na 1 deg wartości współczynnika α w temperaturach 271-360 K posiada koagulat, co ma związek z operacjami mechanicznymi i cieplnymi jego produkcji. Duże rozdrobnienie i długotrwała obróbka termiczna, prowadzące do usunięcia większej części wody zawartej w surowcu, dają w rezultacie małe zmiany wartości dyfuzyjności cieplnej mączki w temperaturach 240-360 K.

Porównanie wartości dyfuzyjności cieplnej innych produktów spożywczych

Surowiec	Gęstość ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Wilgot- ność (%)	Zawartość tłuszczu (%)	Temperatura (K)	Wartość $\alpha \cdot 10^8$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	Metoda pomiaru	Pozycja pięmienn- nictwa
Sandacz, dorsz, karp, leszcz, jesior	-	74-78	0,3-21,56	280	11,0-11,9	akalorymetru	9
Makrela	-	78,6	-	-	13,32	akalorymetru	2
Sardynka	-	74,6	-	-	11,36	akalorymetru	2
Wołowina	1050	-	-	303	15,80	-	9
Wołowina	1020	75	-	273	12,07	akalorymetru	23
Wołowina bezpośrednio po uboju	-	75,95	1,75	-	= 19,68 ↓ 18,85	akalorymetru	12
Wołowina po 6 dniach dojrzwania	-	73,56	2,81	-	= 18,16 ↓ 16,17	akalorymetru	12
Wołowina po rozmroże- niu	-	72,14	2,91	-	= 16,57 ↓ 16,18	akalorymetru	12
Mięso kurze	1030	-	-	303	12,40	-	9
Farsz z leszcza	-	-	-	320	14,70	warunki regularne II rodzaju	9
Farsz z dorsza	995	80,9	0,75	353	12,0	warunki regularne II i III rodzaju	3
Blok farszu dorsz	945-955	78-81	0,5-1,0	251-288	41,05-9,11	warunki regularne I rodzaju	8
Farsz ze szczupaka	995	80,4	0,20	353	13	J.w. I rodzaju	3
Farsz z okonia	995	78,7	3,99	353	1,3	J.w. I rodzaju	3
Farsz z mięsa wołow.	-	-	-	293-343	12,5 ± 4%	-	9
Farsz z mięsa wieprz.	-	-	-	293-343	12,3 ± 4%	-	9
Farsz mięsny (kiełba- sa „doktorska”)	1068	-	-	303-353	12,17-13,78	warunki regularne I rodzaju	3

U w a g a: = oznacza równoległy do włókien kierunek przepływu ciepła,
↓ oznacza prostopadły do włókien kierunek przepływu ciepła.

WNIOSKI

1. Największy wpływ na wartości i przebieg zależności temperatury dyfuzyjności cieplnej kryła i jego produktów ma przemiana fazowa lód-woda, zachodząca w temperaturach od ok. 254 do 269-271 K. Temperaturze końca tej przemiany odpowiada minimum wartości dyfuzyjności cieplnej.

2. Dla temperatury 271-360 K dyfuzyjność cieplna kryła jest liniową i rosnącą funkcją temperatury i wilgotności, jeśli tylko operacje mechaniczne i cieplne obróbki nie naruszają zbytnio jego struktury, a wilgotność pozostaje wyższą od granicznej, właściwej dla wody związanej.

3. Wyznaczone eksperymentalnie wartości dyfuzyjności cieplnej kryła i produktów jego przetwórstwa są zbliżone do danych dla ryb, mięsa oraz farszów rybnych i mięsnych.

LITERATURA

1. Ambros F.: Metody stanovení měrného tepla tepelné vodivosti a teplotové vodivosti latek. Studie ke zkoušce z kandidatského minima. ČVUT. Katedra potravinářských stroju. Praha 1971.
2. Annamma T. T., Rao C. V. N.: Studies on thermal diffusivity and conductivity of fresh and dry fish. Fish. Technol., 1974, 11, nr 1, s. 28-33. Ekspres informacija. Seria: Rybnaja promyšlennost., 1975, nr 10, s. 34-38.
3. Babanov G., Rubanik V., Myslovič V.: Opredelenie teplofizičeskich koeficjentov farša. Mjasnaja industrija SSSR, t. 36, 1965, nr 4, s. 44-47.
4. Budina V. G., Gromov M. A.: Teplofizičeskie svojstva sformovannoj rybnoj sosiski bez oboločki. Izvestia Vysšich Učebnych Zavedenij. Piščevaja Technologia., nr 5, 1976, s. 133-136.
5. Budina V. G., Gromov M. A., Karoleva E. I.: Teplofizičeskie charakteristiki soka kryła. Rybnoje Chozjajstvo, nr 10, 1978, s. 75.
6. Bujnowski F.: Badania współczynnika przewodzenia ciepła kryła antarktycznego i wybranych produktów jego przetwórstwa w zależności od ich wilgotności. Praca dyplomowa magisterska. Zakład Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1980.
7. Bogorodzkij W. W., Gusiev A. W., Chochlov G. P.: Fizika presnovodnogo lda. Gidrometeorologičeskoje izdatielstvo. Leningrad 1971, s. 47.
8. Erlichman W. N., Ionov A. G.: Teplofizičeskie charakteristiki blokov ryby. Cholodilnaja technika 1977. nr 6, s. 36.
9. Ginzburg A. S., Gromov M. A., Krasovskaja G. I., Ukolov W. S.: Teplofizičeskie charakteristiki piščevych produktov i materialov. Piščevaja promyšlennost. Moskva. 1975.

10. Hill J. E., Leitman J. D., Sunderland J. E.: Thermal Conductivity of Various Meats, Vol. 21. Food Technology - August 1967, s. 91 (1143/-96) 1148.
11. Hoflinger J.: Badania współczynnika wyrównywania temperatury kryła antarktycznego i niektórych produktów jego przetwórstwa w zakresie temperatur od 243 do 353. Praca dyplomowa magisterska. Zakład Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1979.
12. Janitz W., Grodzka - Zapytowska S., Bielawa M.: Przewodność cieplna mięsa o zaawansowanych zmianach autolitycznych i mięsa rozmrożonego. Med. Wet., rok XXXII, nr 9, s. 561-563.
13. Kondratiev G. M.: Regularnyj teplovoj režim. Gosudarstviennoje izdatielstvo techniko - teoretičeskoj literatury. Moskva 1954.
14. Konstantinov L. I.: Zamoroživanie ryby v usloviach promysla. Kaliningradzkoje knižnoje izdatielstvo. Kaliningrad 1973, s. 18.
15. Lentz C. P.: Thermal Conductivity of Meats, Fats, Gelatin Gels and Ice. Food Technology. May 1961, s. 243-247.
16. Miller H., Sunderland J. E.: Thermal Conductivity of Beef. Food Technology - April 1963, Vol. 17, s. 124(490 -126)492 .
17. Osipova V. A.: Eksperimentalnoje issledovanie processov teploobmena. Izdanie vtoroje, pererabotannoje i dopolnennoje. Energia. Moskva. 1969.
18. Praca zbiorowa: Badanie właściwości fizyko-mechanicznych kryła i niektórych produktów jego przetwórstwa. Część IV. Zakład Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1979.
19. Riedel L.: Kalorimetriscche Untersuchungen über das Schmelzverhalten von Fetten und Ölen. Fette, Seifen, Anstrichmittel 57/1955/, s. 771-781.
20. Riedel L.: Kalorimetriscche Untersuchungen über das Gefrieren von Seefischen. Kältetechnik. 8 Jahrgang. Heft 12/1956, s. 374-376.
21. Riedel L.: Kalorimetriscche Untersuchungen an Fleisch und Eiklar. Kältetechnik, 16, Heft 11/1964, s. 353-355.
22. Riedel L.: Kalorimetriscche Untersuchungen über das Gefrieren von Fleisch. Kältetechnik. 9 Jahrgang. Heft 2/1967, s. 38-40.
23. Riedel L.: Temperaturleitfähigkeitsmessungen an wasserreichen Lebensmitteln. Kältetechnik - Klimatisierung. 21 Jahrgang, Heft 11/1969, s. 315-316.
24. Riedel L.: Enthalpiemessungen an Lebensmitteln. Chemie, Mikrobiologie, Technologie Lebensmitteln. 5, s. 118 - 127/1977.
25. Rzymowski M.: Badania współczynnika przewodzenia ciepła kryła antarktycznego i niektórych produktów jego przetwórstwa. Praca dyplomowa, magisterska. Zakład Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1979.
26. Sweat V. E., Haugh C. G., Stadelman W. J.: Thermal Conductivity of Chicken Meat at temperature between - 75 and 200°C. Journal of Food Science - Volume 38 (1973), s. 158-160.
27. Wasmund R., Wallrabe R.: Systematisierung veröffentlichter Messwerte des Raumdruck geltenden Wärmeleitkoeffizienten von reinen Wasser. Monatsschrift für Brauerei. 25, Mai 1976, s. 204-208.
28. Woodams E. E., Nowrey J. E.: Literature Values of Thermal Conductivities of Foods. Food Technology. Vol. 22. April 1968. s. 150-158.

Роман Нестерук, Тадеуш Матушек

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ КРИЛЯ
В ТЕМПЕРАТУРАХ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

Р е з ю м е

В интервале температур 240–360 К проведено исследования коэффициента температуропроводности криля и продуктов его переработки: криля целого сырого и вареного, мяса, коагулята, муки и панциря, методом регулярного теплового режима первого рода. Сделано тоже сравнение полученных результатов с коэффициентами температуропроводности других пищевых продуктов.

Roman Niesteruk, Tadeusz Matuszek

THERMAL DIFFUSIVITY OF CRILL IN THE TEMPERATURE RANGE OF
ITS PROCESSING

S u m m a r y

Within the temperature range 240–360 K, measurements of thermal diffusivity (temperature equalization coefficient) of the crill (*Euphausia superba*) and the products of its processing: unprocessed, cooked, meat, coagulum, fish meal and the shells, were carried out by the calorimeter method. The obtained results were compared with data for other food products.