

Krytyczny przegląd modeli wyznaczania czasu rozmrażania produktów rolniczych

Dariusz Góral

*Zakład Inżynierii Chłodnictwa, Akademia Rolnicza
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin*

Słowa kluczowe: czas rozmrażania, modele rozmrażania, metody graficzne rozmrażania

Wstęp

Wiele produktów rolniczych jest zamrażanych z myślą o ich dalszym przetworzeniu po uprzednim rozmrożeniu. Przykładami w skali przemysłowej są: półtusze wieprzowe i wołowe, ryby, masło, a także owoce, które zamrożone w okresie ich podaży są później wykorzystywane jako dodatek do jogurtów i deserów. Znajomość czasu rozmrażania umożliwia projektowanie urządzeń i technologii, a także jest niezbędna do optymalizacji istniejących technologii. Prawidłowe wyznaczenie czasu rozmrażania skutkuje poprawą jakości surowca poprzez uniknięcie ususzkki, a także może wydatnie wpłynąć na zmniejszenie zużycia energii. Stąd niezbędne jest stosowanie odpowiednich formuł umożliwiających wyznaczenie tego czasu dla zróżnicowanych warunków technologicznych prowadzonych procesów i produktów rolniczych. Z tego względu powstało wiele mniej lub bardziej skomplikowanych formuł rozwiązania tego problemu. Z drugiej strony, pomimo wciąż wzrastającej wiedzy na temat rozmrażania, żaden z prezentowanych w pracy modeli nie jest idealny i nie może być stosowany bez znajomości jego uwarunkowań i uproszczeń w nim zawartych. W niniejszej pracy podjęto próbę opisanie możliwości zastosowania modeli obliczeniowych w warunkach przemysłowych.

Modele analityczne i analityczno-empiryczne

Najbardziej znanym, najczęściej dotychczas wykorzystywanym jest przystosowany do rozmrażania model Planka [22]. Podstawowe równanie modelu zostało wprowadzone z uwzględnieniem praw wymiany ciepła i stanowi bazę, na której powstało szereg późniejszych formuł obliczania czasu zamrażania i rozmrażania [8, 10].

Podstawowe równanie modelu przystosowanego do wyznaczania czasu rozmrażania produktów rolniczych [3] ma postać:

$$t = \frac{\rho L}{T_0 - T_{kr}} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_n} \right) \quad (1)$$

W pierwotnej wersji wartości współczynników kształtu P i R można było wyliczyć wg wzorów zamieszczonych przez autora. W późniejszych swoich pracach Plank zamieścił tabelę, wg której można odczytać te dwie wartości (tab. 1).

Tabela 1. Współczynniki kształtu używane w podstawowym równaniu modelu Planka

Współczynnik kształtu	Płyta nieskończona ogrzewana		Walec nieskończony	Kula
	jednostronnie	obustronnie		
P	1	1/2	1/4	1/6
R	1/2	1/8	1/16	1/24

Wartości współczynników kształtu Plank wyprowadził ze stosunku $Ad/2V$ wynoszącego odpowiednio 6, 3 i 2 dla poszczególnych prostych kształtów geometrycznych produktu. Wartości współczynników kształtu zamieszczone w tabeli 1 można stosować tylko i wyłącznie wtedy, gdy powierzchnia jest izotermiczna bez względu na jej położenie. Podczas rozmrażania materiałów biologicznych ten warunek jest spełniony wtedy, kiedy część rozmrożona produktu ma ten sam kształt geometryczny, co pozostała jeszcze jego część zamrożona.

Czysto analitycznym rozwiązaniem jest model Konczakowa [19] z 1968 roku. Rozwiązanie to, jak i pozostałe bardzo nieliczne rozwiązania analityczne dotyczy rozmrażania produktu o kształcie płyty. Przy opracowywaniu modelu wykorzystano warunek brzegowy trzeciego rodzaju oraz założono, że proces rozmrażania dzieli się na dwa etapy: ogrzewania zamrożonego produktu do chwili osiągnięcia na jego powierzchni temperatury krioskopowej i właściwego rozmrażania trwającego do chwili osiągnięcia przez cały produkt stanu rozmrożonego. Końcowe równanie modelu przedstawia się następująco:

$$t = \frac{\rho L \frac{d}{2} \left(2k_n + h \frac{d}{2} \right)}{2k_n h (T_0 - T_{kr})} \quad (2)$$

Zaletą tego rozwiązania, w przeciwieństwie do innych czysto analitycznych modeli, jest możliwość praktycznego zastosowania do rozmrażania mięsa w warunkach konwekcji swobodnej w powietrzu. Autor podaje, że podczas wyznaczania czasu rozmrażania półtuszy wołowych osiągnięto dokładność wyników $\pm 5\%$ w stosunku do danych eksperymentalnych.

Następnym modelem, w którym wykorzystano warunek brzegowy trzeciego rodzaju, jest model Nagaoka i in. [3, 7]. Autorzy starali się zwiększyć dokładność wyznaczania czasu rozmrażania poprzez włączenie do równania Planka (1) zależności charakteryzujących okresy wstępnego ogrzewania i końcowego dogrzania produktu. Zalecają oni, aby wartości współczynników kształtu P i R obliczać ze wzorów przedstawionych w pracy Planka [22] lub odczytywać z tabeli.

$$t = [1 + 0,00445(T_p - T_k)] \left(\frac{Q\rho_n}{T_k - T_0} \right) \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_n} \right) \quad (3)$$

$$Q = c_z(T_p - T_k) + L + c_n(T_k - T_c) \quad (4)$$

Model ten został opracowany z myślą o wyznaczaniu czasu rozmrażania ryb. Ponieważ nie ma większych różnic w ogólnym kształtowaniu się podstawowych właściwości termofizycznych ryb i innych produktów spożywczych o przeciętnej zawartości tłuszczu, równanie to może być stosowane do wyznaczania czasu trwania procesu również dla innych materiałów spożywczych [3].

Kolejnym chronologicznie rozwiązaniem jest model Cziżowa [15], który został wykorzystany w zaprezentowanym w 1991 roku przez Piotrowicza [20] rozwiązaniu. Zasadnicze równanie tej metody składa się z równania Cziżowa, z dodaną przez autora zależnością, oceniającą przedłużenie czasu procesu o wpływ akumulacji ciepła w warstwie rozmrożonej:

$$t = \frac{\rho_n \Delta H}{(T_0 - T_{kr})} \frac{d}{2} \left(\frac{1}{h} + \frac{d}{4k_n} \right) + \frac{1}{16} \rho_n c_n \frac{d^2}{k_n} \quad (5)$$

Postać powyższego równania jest konsekwencją szeregu poczynionych założeń upraszczających, m.in. pominięcia czasu wstępnego rozmrażania; przyjęcia, że rozmrażanie kończy się w chwili, gdy centrum produktu osiągnie temperaturę krioskopową; oraz założenia, że właściwości termofizyczne produktu nie zależą od jego temperatury.

W związku z zapotrzebowaniem przemysłu spożywczego, w latach 1965–1979 powstało szereg modeli obliczeń przeznaczonych do oceny czasu rozmrażania tylko jednego wybranego rodzaju produktu rolniczego. Typowym przykładem takich rozwiązań jest model Vanichseni i in. [31], który został opracowany dla wyznaczania czasu rozmrażania łopatek baranich. Przyjęto założenie, iż łopatka jest ekwiwalentem prostopadłościanu o wymiarach $d \times 2d \times 2,5d$. Wymiar charakterystyczny d autorzy zalecają wyznaczać z zależności uzyskanej za pomocą analizy regresji w zależności od wagi tuszki M :

$$d = 0,00212M + 0,056$$

Vanichseni i in. podają dwa równania, osobno dla rozmrażania produktów metodą konwekcyjną w powietrzu:

$$t = 1,2 \frac{\Delta H \rho}{T_0 - T_{kr}} \left[0,265 \frac{d}{h} + \frac{0,075 d^2}{k} \right] \quad (6)$$

i dla rozmrażania w wodzie:

$$t = \frac{0,09 \Delta H \rho d^2}{(T_0 - T_{kr}) k} \quad (7)$$

Obie formuły (6, 7) powstały poprzez dodanie do równania Planka (1) składników oceniających wpływ temperatury początkowej (różnej od temperatury krioskopowej) na czas rozmrażania oraz wprowadzenia do równań iloczynu współczynnika korekcyjnego $\beta = 1,1 \div 1,2$ i zmiany entalpii produktu ΔH pomiędzy jego początkową a końcową temperaturą centrum produktu zamiast utajonego ciepła rozmrażania L .

Z uwagi na praktyczną niemożliwość stworzenia dokładnego rozwiązania analitycznego, od roku 1979 zaczęły powstawać bardziej zaawansowane, a jednocześnie uniwersalne analityczno-empiryczne modele obliczeń czasu rozmrażania, spośród których najbardziej znany jest model Clelanda i in. [8, 11]. Autorzy ci zmodyfikowali równanie Planka poprzez zastosowanie liczb kryterialnych Stefana i Planka:

$$t = \frac{c_n \rho_n d^2}{(k_n EHTD)} \left(\frac{P_1}{Bi Ste} + \frac{R_1}{Ste} \right) \quad (8)$$

gdzie:

$$P_1 = 0,5(0,7754 + 2,2828 Ste Pk) \quad (9)$$

$$R_1 = 0,125(0,4271 + 2,1220 Ste - 1,4847 Ste^2) \quad (10)$$

Współczynniki kształtu P_1 i R_1 (9, 10) zostały wyznaczone empirycznie. Za ich pomocą i po wprowadzeniu ekwiwalentnego wymiaru wymiany ciepła $EHTD$:

$$EHTD = 1 + W_1 + W_2 \quad (11)$$

$$W_1 = \left(\frac{Bi}{Bi + 2} \right) \left(\frac{5}{8 \beta_1^3} \right) + \left(\frac{2}{Bi + 2} \right) \left[\frac{2}{\beta_1 (\beta_1 + 1)} \right] \quad (12)$$

$$W_2 = \left(\frac{Bi}{Bi + 2} \right) \left(\frac{2}{8 \beta_2^3} \right) + \left(\frac{2}{Bi + 2} \right) \left[\frac{2}{\beta_2 (\beta_2 + 1)} \right] \quad (13)$$

równanie (8) można stosować do obliczania czasu rozmrażania produktów o dowolnym regularnym kształcie geometrycznym. Oba równania (9, 10) były później wielokrotnie przez Clelanda i in. rozwijane (stosowano równania regresji), jednak błąd między czasem obliczonym a wyznaczonym eksperymentalnie nie obniżył się znacząco.

Pierwszym rozwiązaniem empirycznym, za którego pomocą można dość dokładnie wyznaczyć czas rozmrażania szeregu produktów spożywczych jest model Calvelo [5].

$$t = \left[\frac{1,4921 c_n \rho_n d^2}{(k_n EHTD)} \left(\frac{1}{2Bi Ste} + \frac{1}{8Ste} \right) \right]^{1,0248} \cdot Ste^{0,2712} \cdot Pk^{0,0610} \quad (14)$$

Równanie (14) jest źródłem wyników obarczonych nieznacznym błędem tylko w wypadku powolnego rozmrażania produktów do temperatury 0°C. Zostało ono wykorzystane w innych pracach przy tworzeniu późniejszych rozwiązań [9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18].

Kolejnym modelem analityczno-empirycznym jest model Phama [21], charakteryzujący się tym, że nie zawiera żadnych stałych liczbowych. Zasadnicze równanie modelu ma postać:

$$t = \frac{1}{EHTD} \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta H_i d \left(1 + \frac{hd}{4k_i} \right)}{(2 \Delta T_i h)} \quad (15)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_0 - \frac{(T_p + T_{fave})}{2}; & \Delta H_1 &= c_z \rho_z (T_{fave} - T_c); & k_1 &= k_z \\ \Delta H_2 &= L; & \Delta T_2 &= T_0 - T_{fave}; & k_2 &= 0,25k_z + 0,75k_n \\ \Delta H_3 &= c_n \rho_n (T_{ave} - T_{fave}); & \Delta T_3 &= T_0 - \frac{(T_{ave} + T_{fave})}{2}; & k_3 &= k_n \\ i \quad T_{ave} &= T_c - \frac{T_c - T_0}{2 + \frac{4}{Bi}}; & T_{fave} &= T_{kr} - 1,5 \end{aligned}$$

Stosując tę formułę obliczeń, można wyznaczyć czas każdego z trzech okresów rozmrażania oddzielnie, co ze względu na higienę produkcji może być szczególnie przydatne przy analizie czasu trwania dogrzewania produktu. Za pomocą modelu Phama można obliczyć, jaka ilość ciepła jest dostarczana do produktu w każdym z etapów procesu. Dzięki temu można również modelować każdy z okresów rozmrażania niezależnie od siebie, dzięki czemu nadaje się on do wykorzystania w projektowaniu urządzeń rozmrażalniczych. Wadą tego modelu jest duża liczba zależności, przez co ograniczona jest możliwość szybkiego wyznaczenia czasu procesu.

Modele Phama, Clelanda i Calvelo, charakteryzowane powyżej, można stosować do wyznaczania czasu rozmrażania przy zachowaniu następujących warunków [8]:

$$0,6 < Bi < 57,3; \quad 0,085 < Ste < 0,768; \quad 0,065 < Pk < 0,272$$

W 1987 roku Cleland i in. [9,11,13,19] zmodyfikowali model Calvelo [5] m.in. przez doświadczalne skorygowanie niektórych wielkości i współczynników poprzez wykorzystanie metody analizy statystycznej otrzymali bezwymiarową zależność:

$$Fo_{slab} = 1,4291 \cdot \left[\frac{0,5}{Bi Ste} + \frac{0,125}{Ste} \right]^{1,0248} \cdot Ste^{0,2710} \cdot Pk^{0,0610} \quad (16)$$

Czas rozmrażania należy zatem wyznaczać z liczby Fouriera Fo . Równanie (16) zostało opracowane do wyznaczania czasu rozmrażania produktów o kształcie nieskończonej płyty. W celu przeprowadzenia obliczeń czasu rozmrażania produktów o innych kształtach autorzy zalecają użycie jednego z dwóch dalszych współczynników kształtu wyznaczanych z następujących zależności:

$$EHTD = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad (17)$$

lub

$$\frac{MCP}{D} = 1 + (2 - G_1) M_1 + G_3 M_2 + M_3 \quad (18)$$

gdzie: $G_{1,2,3}$ – stałe geometryczne, $E_{1,2}$, $M_{1,2,3}$ – zmienne użyte do wyznaczania współczynników kształtu.

Oba współczynniki $EHTD$ i MCP powstały poprzez zastosowanie analizy nieliniowej regresji do wyników numerycznych obliczeń czasu procesu rozmrażania realizowanego w układach modelowych [13].

Najnowszy i jednocześnie matematycznie najbardziej kłopotliwy jest model Hosaina i in. [16, 17, 18]. Autorzy ci zaproponowali nowy oparty na prawach wymiany ciepła współczynnik kształtu E , który można zastosować do wzoru (16). Przykładowo, dla prostopadłościanu o wymiarach $2R \times 2\beta_1 \times 2\beta_2 R$ współczynnik ten można wyznaczyć ze wzoru:

$$E = \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) \cdot \left\{ \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) \right. \\ \left. - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin z_n}{\left(z_n^3 \left(1 + \frac{\sin^2 z_n}{Bi} \right) \left[\frac{z_n}{Bi} \sin h(z_n \beta_1) + \cos h(z_n \beta_1) \right] \right)} \right] - 8\beta_2^3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \right. \\ \left. \left[\sin z_n \sin z_m \left\{ \left[\cos h(z_{nm}) + \frac{z_{nm}}{Bi\beta_2} \sin h(z_{nm}) \right] \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. z_n z_m z_{nm}^2 \left(1 + \frac{1}{Bi} \sin^2 z_n \right) \left(1 + \frac{1}{Bi\beta_1} \sin^2 z_m \right) \right\}^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (19)$$

Współczynnik E dokładniej od pozostałych stosowanych do tej pory współczynników koryguje wyniki obliczeń czasu procesu. Jednakże, ze względu na konieczność wykorzystywania funkcji Bessela i tabel do wyznaczania zmiennych z_n, z_m, z_{nm} jako funkcji liczby Bi , zastosowanie powyższego równania w modelach wyznaczania cza-

su rozmrażania jest kłopotliwe. Z tego powodu autorzy przedstawili prostsze równanie, wg którego współczynnik ten, nazwany E_{AS} np. dla produktu w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $2R \times 2\beta_1 \times 2\beta_2 R$, można wyliczyć następująco:

$$E_{AS} = \left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right) \left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{3 \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)} + \frac{(1 + \beta_1 + \beta_2)}{3} \right]^{-1} \quad (20)$$

Niestety, zależność ta jest słuszna jedynie w wypadkach, kiedy wartość liczby Biota jest mniejsza od 0,16 [16].

Modele graficzne i semigraficzne

Niezależnie od modeli analityczno-empirycznych powstało wiele graficznych rozwiązań problemu wyznaczania czasu rozmrażania materiałów biologicznych. Jedną z pierwszych opublikowanych metod jest model Bailey'a i in. [1, 2], oparty na rozwiązaniu numerycznym. W celu opracowania wykresu, z którego można odczytać czas rozmrażania szynki cielęcych, autorzy przeprowadzili analizę numeryczną (wg metody Dusenbere [1, 2]) równania jednowymiarowej wymiany ciepła dla kuli. Użyty wykres umożliwia wyznaczenie czasu rozmrażania szynki o wadze 3–6 kg zamrożonych do temperatury od -30 do 0°C , kiedy współczynnik wnikania ciepła h wynosi od 10 do 5000 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], a temperatura otoczenia równa jest 5, 10, 20, 30 lub 40°C . Do wykresu załączono również tabelę służącą do oceny wzrostu czasu rozmrażania w temperaturze $0 \div 5^\circ\text{C}$. Błąd otrzymywany przy stosowaniu tej procedury, jak podają autorzy, wynosi od 0,02 do 0,35%. Największy błąd występuje przy niskim współczynniku wnikania ciepła i jednocześnie niskiej temperaturze rozmrażania.

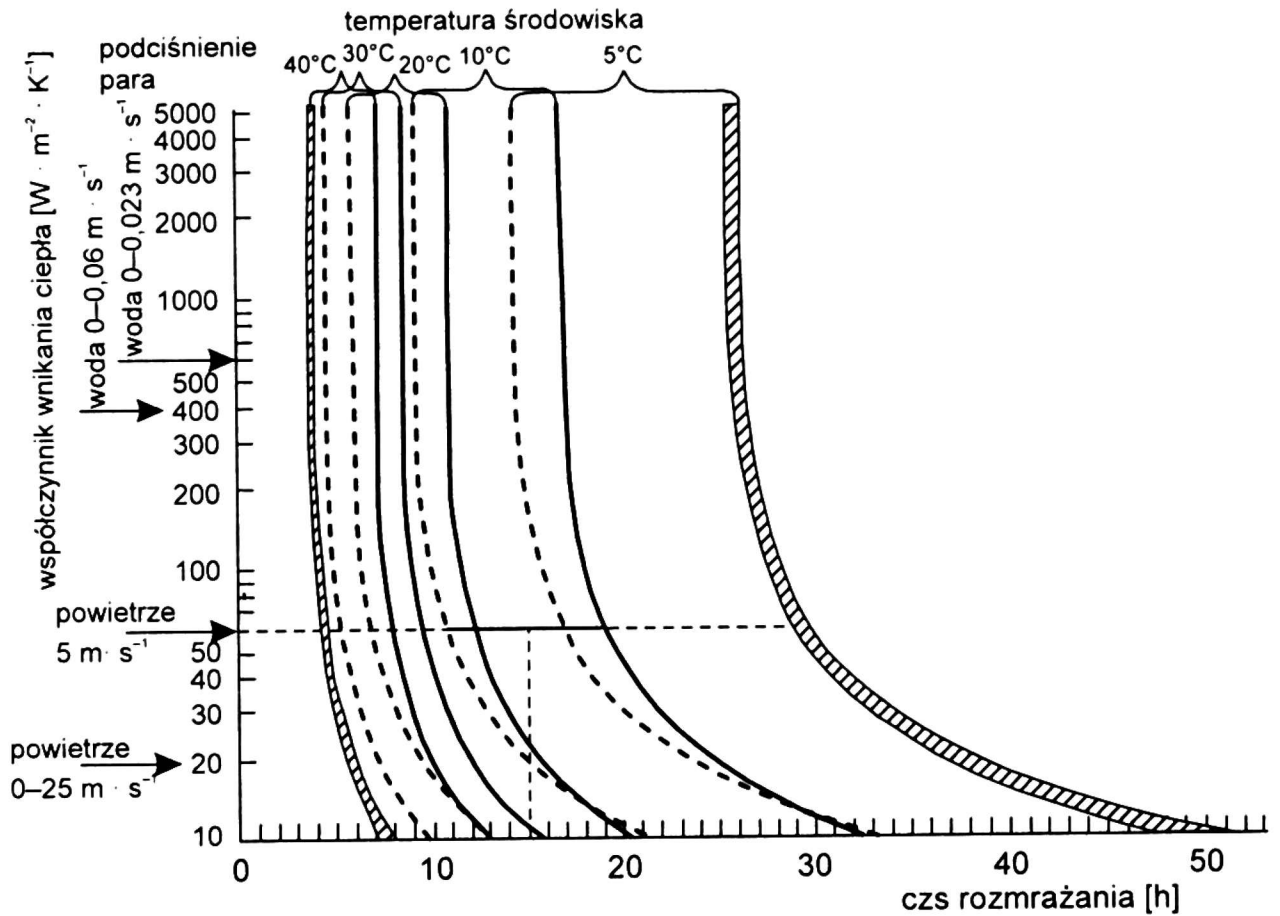
Podobny do powyższego model wyznaczania czasu rozmrażania zaproponował Tao [3, 6]. Opracował on wykres przeznaczony do analizy czasu rozmrażania produktów ukształtowanych w trzy proste kształty geometryczne. Wykres ten powstał poprzez numeryczne rozwiązanie równania Fouriera, które ma postać:

$$t'' = \frac{t k_n (T_0 - T_{kr})}{d^2 \rho L} \quad (21)$$

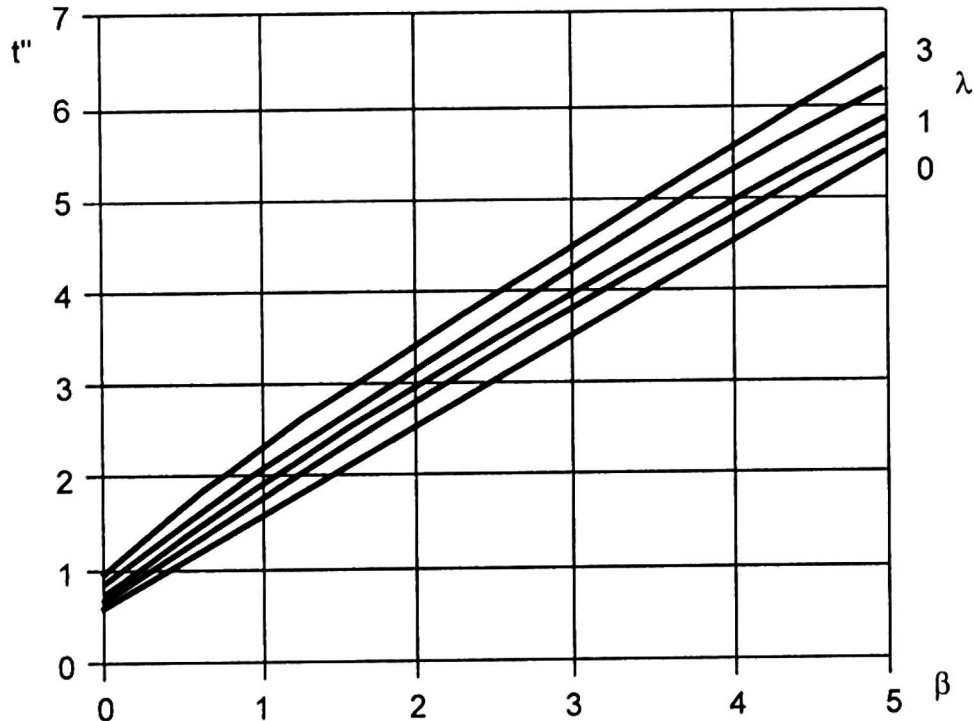
Wartość t'' należy odczytać z wykresu (rys. 2), wykorzystując przy tym zmienne charakterystyczne dla poszczególnych produktów.

$$\beta = \frac{k_n}{h d} \quad (22)$$

$$\gamma = c_n \frac{T_0 - T_{kr}}{L} \quad (23)$$



Rysunek 1. Wykres do wyznaczania czasu rozmrażania wg modelu Bailey i in. [2]



Rysunek 2. Przykładowy wykres do wyznaczania czasu rozmrażania płyty nieskończonej [3], gdzie t'' – czas rozmrażania [h]; β – zmienna wymiarowa obliczana ze wzoru (22); λ – stała związana z położeniem granicy frontu lodowego obliczana ze wzoru (23)

Model Tao powstał po przyjęciu następujących założeń upraszczających: czas procesu rozmrażania można wyznaczyć tylko dla trzech prostych kształtów geometrycznych (płyty nieskończonej, kuli lub walca nieskończonego), temperatura otoczenia ogrzewającego nie może zmieniać się w czasie, proces rozmrażania rozpoczyna się od temperatury krioskopowej produktu rozmrażanego.

W 1991 roku Salvadori i in. [23, 24] zaproponowali formułę do przewidywania czasu rozmrażania produktów spożywczych w szerokim zakresie warunków stosowanych w przemyśle. Model ten został oparty na wykresie zależności zmiany temperatury w produkcie od jednej zmiennej wymiarowej X . Zasadnicze równanie modelu ma postać:

$$t = \frac{X d^2 \left(\frac{1}{Bi} + c \right) \left(\frac{T_p - T_{kr}}{T_{kr}} \right)^p}{\alpha \left(\frac{T_{kr} - T_0}{T_{kr}} \right)^n} \quad (24)$$

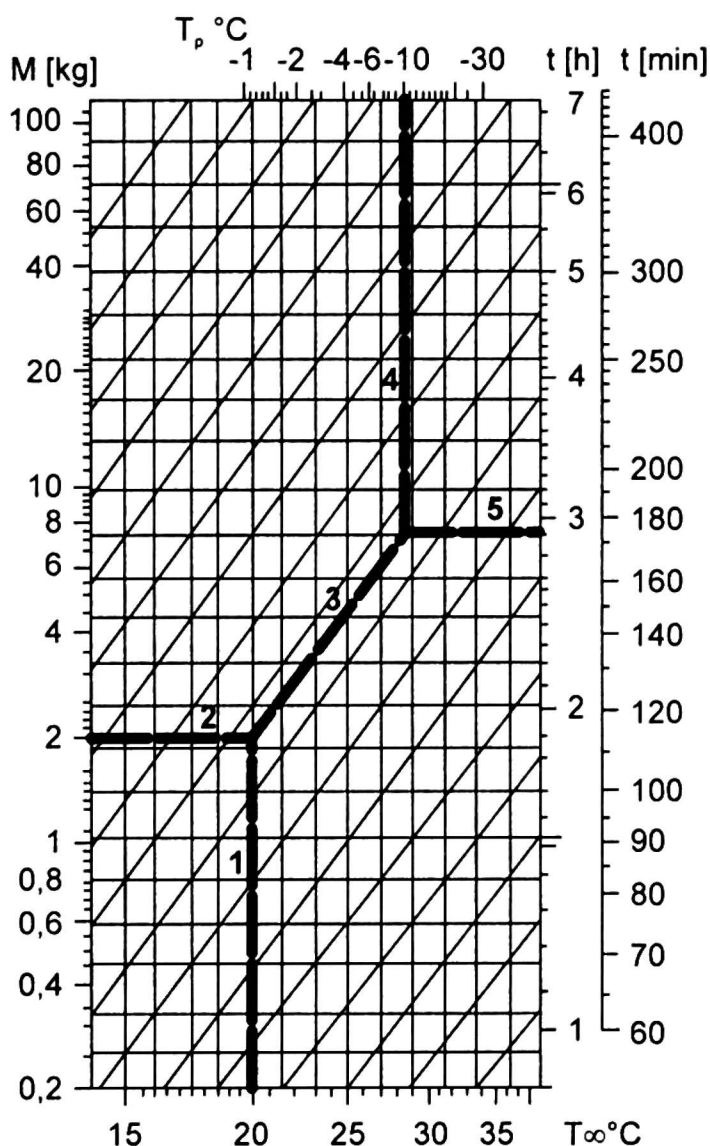
a wartość współczynników n , p , c wynika z tabeli 2, uwzględniającej obok kształtu produktu podstawowe warunki procesu.

Tabela 2. Wartości współczynników n , p , c modelu Salvadori i in. [24], gdzie n , p , c – stałe użyte w równaniu (24)

Kształt	Warunki procesu			Współczynniki		
	T_0 [°C]	T_p [°C]	Bi	n	p	c
Płyta nieskończona	5÷35	-10÷-31	1÷151	0,74	0,03	0,45
Walec nieskończony	5÷45	-10÷-35	1÷44	0,74	0,05	0,47
Kula	5÷45	-10÷-35	1÷44	0,715	0,03	0,45

Model Salvadori i in. został opracowany z przeznaczeniem do wyznaczania czasu rozmrażania produktów o wysokiej zawartości wody. Bardzo istotną jego zaletą jest to, że do realizacji obliczeń wymagane są tylko właściwości termofizyczne produktu w stanie zamrożonym, co wydatnie zmniejsza liczbę niezbędnych danych wejściowych.

Dotychczas opracowano wiele rozwiązań stosowanych do wyznaczania czasu rozmrażania ryb [26–30]. Jednym z najbardziej znanych jest model Stefanowskiego i in. [26–28] oparty na nomogramie do szybkiego wyznaczania czasu w warunkach rozmrażania parą pod ciśnieniem i konwekcyjnego rozmrażania ryb w wodzie. Korzystając z tego nomogramu (rys. 3), można w prosty sposób określić czas rozmrażania ryb, znając tylko ich masę, temperaturę środowiska i temperaturę początkową produktu.



Rysunek 3. Nomogram do wyznaczania czasu rozmrażania ryb w wodzie w warunkach konwekcji swobodnej [27], gdzie: M – masa ryb; T_p – temperatura początkowa produktu; T – temperatura środowiska rozmrażającego; t – czas rozmrażania

Podstawową zaletą nomogramu w tej metodzie jest możliwość szybkiego porównania rozmrażania produktów w środowisku pary pod ciśnieniem w stosunku do tradycyjnej metody rozmrażania w wodzie.

Wadą wszystkich modeli graficznych jest konieczność korzystania z wykresów lub nomogramów, co wydłuża czas konieczny do wykonania obliczeń, stwarza możliwość popełnienia grubych błędów poprzez niewłaściwe lub niedokładne odczytanie danych i w większości wypadków uniemożliwia zautomatyzowanie obliczeń poprzez wykorzystanie metod komputerowych.

Podsumowanie

Większość z przedstawionych modeli analityczno-empirycznych wywodzi się z podstawowego rozwiązania Planka, które dotyczyło analizy procesu zamrażania. Zasadnicze znaczenie tego rozwiązania wynika z faktu, że podstawowe równanie modelu zostało wyprowadzone przy uwzględnieniu praw wymiany ciepła. Wszystkie

modele obliczeniowego wyznaczania czasu rozmrażania mają uwarunkowania w stosowaniu. Przyczyną jest komplikacja problemu wynikająca z charakteru procesu, niemożliwość ujęcia pełnego mechanizmu zjawiska, w którym udział bierze materiał biologiczny, oraz założenie o decydującym wpływie wymiany ciepła na czas rozmrażania.

W obliczeniach stosowane są różnego rodzaju współczynniki kształtu. Najczęściej stosowane współczynniki P i R wywodzące się od Planka wyprowadzone zostały ze stosunku objętości do powierzchni obiektów poddawanych procesowi. Stosunek ten $2V/Ad$ jest dokładny dla wszystkich kształtów wtedy, gdy liczba Biota dąży do zera. W wypadku dużych liczb Bi nie ma dobrego i prostego współczynnika kształtu. W pracach z lat 70 powszechnie zastępowano skomplikowany kształt geometryczny produktu przez kulę lub płytę o tym samym wymiarze charakterystycznym. Stosowanie tego typu zamienników kształtu jest ograniczone ze względu na niemożliwość stwierdzenia odpowiedniej korelacji bez badań eksperymentalnych [2]. Znany współczynnik $EHTD$ jest słuszny dla $Bi \rightarrow 0$, podobnie jest ze współczynnikiem MCP opracowanym przez Phama. Dodatkowo współczynniki te mogą być obciążone błędem systematycznym, ponieważ zależą od warunków środowiska. Natomiast stosowanie skomplikowanego matematycznie współczynnika E jest uciążliwe, szczególnie w warunkach produkcyjnych.

Metody graficzne i semigraficzne powstały jako wynik wykreślnego rozwiązania zagadnienia wyznaczania czasu rozmrażania danego rodzaju produktu metodą numeryczną. Oprócz modeli przedstawionych w niniejszej pracy istnieje szereg innych podobnych sposobów obliczania czasu rozmrażania [4, 6, 10, 25]. Są one zazwyczaj dokładne tylko dla jednego wybranego produktu lub kształtu, co ogranicza zakres ich stosowania.

W warunkach przemysłowych wykorzystanie metod numerycznych nie zawsze jest możliwe ze względu na długi czas trwania operacji obliczeniowych (np. 10 000 s dla metody elementów skończonych [8, 11]) oraz ze względu na wysoki koszt oprogramowania i sprzętu komputerowego. Z tych powodów, dla obliczeń inżynierskich, odpowiedniejsze jest używanie modeli analityczno-empirycznych. Z drugiej strony, nie istnieje prosta i łatwa w praktycznym zastosowaniu analityczna metoda wyznaczania czasu rozmrażania z wyprowadzeniem uwzględniającym warunek brzegowy trzeciego rodzaju. Sytuacja ta tłumaczy stałe zapotrzebowanie na uproszczone metody obliczeń czasu rozmrażania produktów rolniczych i żywności.

Literatura

- [1] Bailey C., James S.J., Kitchell A.G., Hudson W.R. 1974. Air-, water- and vacuum-thawing of frozen pork legs. *J. Sci. Fd Agric.* 25: 81–97.
- [2] Bailey C., James S.J. 1974. Predicting thawing time of frozen pork legs. *ASHRAE J.* 3: 68–69.

- [3] Bakal A., Hayakawa K-I. 1973. Heat transfer during freezing and thawing of foods. W: Advances in food research. Academic Press, N. York.
- [4] Baxter D.C. 1962. The fusion times of slabs and cylinders. *J. Heat Transfer* 4: 317.
- [5] Calvelo A. 1990. Recent studies on meat freezing. W: Developments in meat science-2, Applied Science Publishers, London, 1981. cytowane przez Cleland A.C.: Food refrigeration processes analysis, design and simulation. Elsevier Applied Science, London.
- [6] Charm S.E. 1971. The fundamentals of food engineering. The AVI Pub. Comp., Westport.
- [7] Charm S.E., Brand D.H., Baker D.W. 1972. A simple method for estimating freezing & thawing times of cylinders & slabs. *ASHRAE J.* 11: 39–45.
- [8] Cleland A.C. 1990. Food refrigeration processes analysis, design and simulation. Elsevier Applied Science, London.
- [9] Cleland D.J. 1991. A generally applicable simple method for prediction of food freezing and thawing times. Proceedings of the XVIII th. International Congress of Refrigeration.
- [10] Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L. 1986. Prediction of freezing and thawing times for foods – a review. *Int. J. Refrig.* 9(5): 182.
- [11] Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L., Byrne S.J. 1986. Prediction of thawing times for foods of simple shape. *Int. J. Refrig.* 9(6): 220–228.
- [12] Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L., Byrne S.J. 1987. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods. *Int. J. Refrig.* 10(1): 32–39.
- [13] Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L. 1987. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae. Part 1: regular shapes. *Int. J. Refrig.* 10(5): 156–164.
- [14] Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L. 1987. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae. Part 2: irregular shapes. *Int. J. Refrig.* 10(6): 234–240.
- [15] Cziżow G.B. 1974. Procesy cieplne w technologii chłodniczej produktów żywnościowych. WNT, Warszawa, (tłum. z rosyjskiego).
- [16] Hossain M.M., Cleland D.J., Cleland A.C. 1992. Prediction of freezing and thawing times for foods of regular multi-dimensional shape by using an analytically derived geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15(4): 227–234.
- [17] Hossain M.M., Cleland D.J., Cleland A.C. 1992. Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15(4): 235–240.
- [18] Hossain M.M., Cleland D.J., Cleland A.C. 1992. Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.* 15(4): 241–246.
- [19] Konczakow G.D. 1968. Analitическое исследование процесса размораживания мяса в воздухе. *Chłodilnaja Technika* 2: 28–31.
- [20] Piotrowicz A. 1991. Wpływ akumulacji ciepła w warstwie rozmrożonej na czas rozmrażania stałego produktu żywnościowego w izotermicznym ośrodku grzejnym. *Chłodnictwo* 1: 3–8.
- [21] Pham Q.T. 1984. Extension to Planck's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes. *Int. J. Refrig.* 7(6): 377–383.

- [22] Plank R. 1941. Beiträge zur Berechnung und Bewertung der Gefriereschwindigkeit von Lebensmitteln. *Kälte-Ind. Beih.* 3(10): 1.
- [23] Salvadori V.O., Mascheroni R.H. 1989. Thawing time prediction for simple shaped foods using a generalized graphical method. *Int. J. Refrig.* 12(7): 232–236.
- [24] Salvadori V.O., Mascheroni R.H. 1991. Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *J. Fd Engng* 13: 67–78.
- [25] Sokulski M.B. 1972. A graphic method of temperature determination in freezing and defrosting processes. *Science and Technology* 2: 355–367.
- [26] Stefanowski W.M. 1980. Inżyneryjny metod rasczeta prodolžitelnosti razmorażiwaniya ryby. *Izwestija Wuzow-Piszczewaja Technologija* 2: 109–112.
- [27] Stefanowski W.M. 1987. Razmorażiwaniye ryby. Agropromizdat, Moskwa.
- [28] Stefanowski W.M., Chomczenko W.N. 1978. Opredelenije prodolžitelnosti razmorażiwaniya ryby pogrūženijem w wodu. *Rybnoe Chozjaistwo* 11: 61–64.
- [29] Uswijat N.E. 1973. Opredelenije wremeni razmorżiwaniya standartnyh rybnyh blokow pri oroszenii wodoj. *Rybnoe Chozjaistwo* 4: 58–60.
- [30] Uswijat N.E., Golowkin N.A., Gejnc R.G. 1972. Prodolžitelnost' razmorażiwaniya ryby w wode. *Cholodilnaja Technika* 49(8): 46–48.
- [31] Vanichseni S., Haughey D.P., Nottingham P.M. 1972. Water- and air-thawing of frozen lamb shoulders. *J. Fd Technol.* 7: 259–270.

Wykaz oznaczeń

A	— powierzchnia [m^2]
c	— pojemność cieplna właściwa [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Bi	— liczba Biota, $Bi = \frac{hd}{k}$
d	— wymiar charakterystyczny [m]
Fo	— liczba Fouriera, $Fo = \frac{\alpha t}{d^2}$
h	— współczynnik wnikania ciepła [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
$H, \Delta H$	— entalpia, zmiana entalpii [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]
k	— przewodność cieplna [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
L	— utajone ciepło zamarzania [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Q	— ciepło [W]
$P, R, EHTD, E$	— współczynniki kształtu
Pk	— liczba Planka, $Pk = \frac{\rho_z c_z (T_{kr} - T_p)}{\Delta H}$
Ste	— liczba Stefana, $Ste = \frac{c_n \rho_n (T_0 - T_{kr})}{\Delta H}$
t	— czas [s]
T	— temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
V	— objętość [m^3]

- α — dyfuzyjność cieplna [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 β — stosunek wymiarów rozmrażanej próbki
 ρ — gęstość [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Indeksy

- c — centrum, koniec procesu
kr, k — krioskopowy
n — niezamrożony
o — otoczenie, środowisko
p — początek procesu
z — zamrożony

Critical review of the models predicting thawing time of agricultural products

Key words: thawing time, thawing models, graphical thawing models

Summary

Correct determination of the thawing time makes possible to design adequate installation and technology, it may also reduce the energy consumption. Thus, it is necessary to apply the proper formulas to predicting precisely that time for differentiated technological conditions and agricultural products. This paper characterized 12 analytical-empirical methods to predict the time of thawing, beginning from the oldest Plank's model up to most complex and developed model by Hossain et al. The way of formation, characteristics and application possibilities of graphical methods to predicting this value, were also described. It was started that there exist some limiting factors in all the methods resulting in inability of formulating whole mechanism of thawing process. Such a simulation keeps still developing of new, simplified method to calculate the thawing time for agricultural products and food.