

TECHNIKA ODWRÓCONEJ FLUIDYZACJI W ROZMRAŻANIU PRODUKTÓW ROLNICZYCH I SPOŻYWCZYCH

Dariusz Góral, Franciszek Kluza

Streszczenie. W pracy zbadano możliwości wykorzystania odwróconej fluidyzacji do intensyfikacji wymiany ciepła w procesie rozmrażania żywności oraz przeprowadzono próbę obliczenia czasu trwania tego procesu. Eksperymenty przeprowadzono na laboratoryjnym stanowisku do rozmrażania techniką odwróconej fluidyzacji, badając kostkę marchwi, ziemniaka i jabłka o wymiarach 1 cm × 1 cm × 1 cm. Obliczenia czasu rozmrażania wykonano według modelu Planka. Stwierdzono, że użycie techniki odwróconej fluidyzacji pozwala na uzyskanie w powietrzu szybkości procesu zbliżonej do szybkości rozmrażania w wodzie przy takich samych temperaturach środowiska rozmrażającego. Przeprowadzona analiza statystyczna wyników obliczeń czasu rozmrażania w badanej metodzie prowadzi do stwierdzenia, że w przypadku użycia modelu Planka uzyskuje się wartości odbiegające od rzeczywistych średnio o $\pm 24,8\%$.

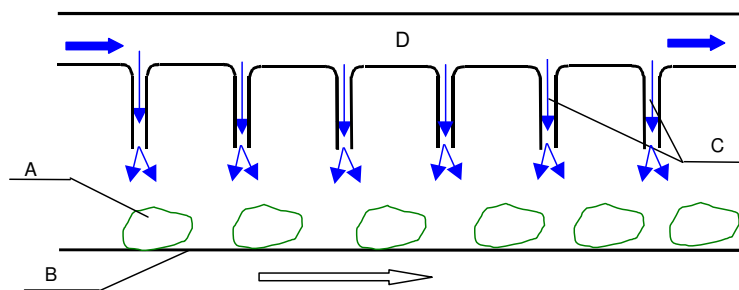
Słowa kluczowe: czas rozmrażania, odwrócona fluidyzacja, rozmrażanie żywności

WYKAZ OZNACZEŃ

- A – powierzchnia, m²
- α – współczynnik wnikania ciepła, W·m⁻²·K⁻¹
- Bi – liczba Biota
- D – wymiar charakterystyczny, m
- Fo – liczba Fouriera
- H – entalpia, zmiana entalpii
- λ – przewodność cieplna, W·m⁻¹·K⁻¹
- r – promień, m
- Ste – liczba Stefana
- T – temperatura, °C
- T_o – temperatura otoczenia, °C
- T_k – temperatura krioskopowa, °C
- t – czas, s
- V – objętość, m³

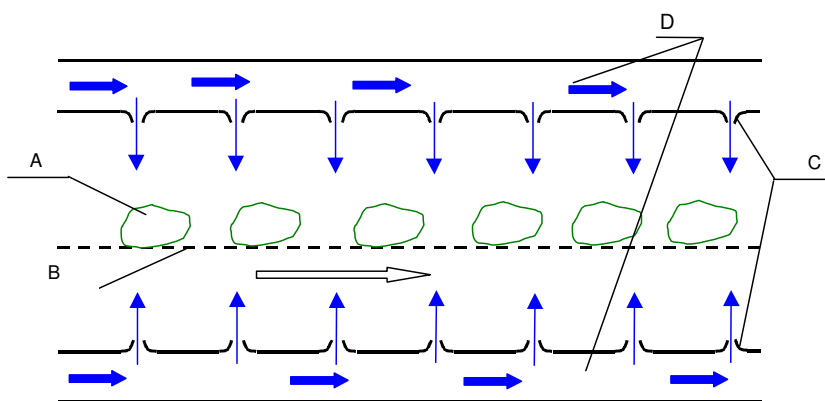
WSTĘP

Mrożenie żywności w okresie maksymalnej podaży ma na celu zachowanie jej wysokiej jakości, porównywalnej z jakością produktu świeżego i wysokiej atrakcyjności handlowej. Efekty natychmiastowego zamrożenia mięsa, owoców i warzyw są często zaprzeczane przez nieodpowiednie metody rozmrażania. Rozmrażanie jest wciąż mało docenianym procesem, niejednokrotnie przeprowadzanym w sposób niekontrolowany, co powoduje widoczne obniżenie jakości produktu. Brak jest też na ogół wskazań ze strony producenta odnośnie prawidłowego rozmrażania i zastosowania surowców mrożonych. Przykładami przemysłowego stosowania tego procesu w skali masowej jest rozmrażanie pulp owocowych wykorzystywanych później do produkcji dżemów, czy też rozmrażanie ryb w przetwórnicy umieszczonej na łodzi po wcześniejszym ich transporcie w stanie zamrożonym przez statki połowowe [Cleland 1990, Ignaczak i in. 1992].



Rys. 1. Urządzenie wykorzystujące zjawisko impingement: A – produkt, B – taśma, C – dysze, D – komora sprężonego powietrza

Fig. 1. Impingement stand: A – product, B – belt, C – nozzles, D – plenum chamber

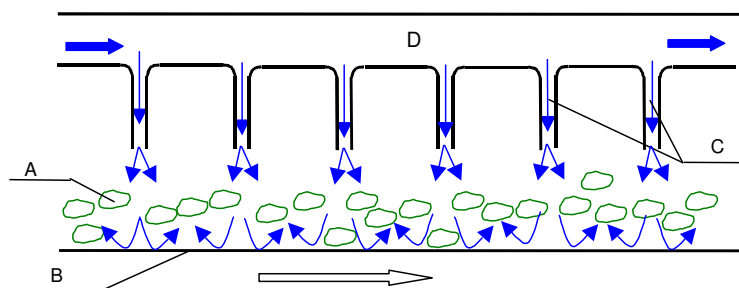


Rys. 2. Zastosowanie metody impingement w układzie podwójnym z wykorzystaniem krótkich dysz: A – produkt, B – taśma, C – dysze, D – komora sprężonego powietrza

Fig. 2. Double impingement using short nozzles: A – product, B – belt, C – nozzles, D – plenum chamber

Niedawne teorie tłumaczące zmiany związane z procesem zamrażania i rozmrażania produktów mięsnych, rybnych i drobiowych związane ze stopniem zniszczenia struktury komórkowej przez rozrastające się kryształy lodu zostały uzupełnione przez teorie denaturacji białek i naruszenia struktury żelu białkowego w procesie zamrażania. Stopień zniszczenia żelu zależy od wielu czynników, wśród których za najważniejsze uważa się szybkość procesu zamrażania [Pałacha i Remiszewska 1993, Zalewski 1993]. Z tego względu wciąż prowadzone są prace nad sposobami umożliwiającymi zwiększenie szybkości zamrażania i rozmrażania. W ostatniej dekadzie wprowadzono do produkcji urządzenia wykorzystujące zjawisko impingement (rys. 1, 2), które wiąże się ze znaczną intensyfikacją wymiany ciepła głównie poprzez wzrost współczynnika wnikania ciepła [Salvadori i Mascheroni, 2002]. Dzięki temu następuje istotne skrócenie czasu obróbki produktu.

Zjawisko impingement może być również stosowane w przypadku fluidyzacji poprzez tworzenie tzw. odwróconej fluidyzacji (rys. 3).



Rys. 3. Urządzenie wykorzystujące zjawisko odwróconej fluidyzacji: A – produkt, B – taśma, C – dysze, D – komora sprężonego powietrza

Fig. 3. Reverse fluidized bed with impingement: A – product, B – belt, C – nozzles, D – plenum chamber

Metoda ta polega na odpowiednim przeprowadzeniu gazu, wypływającego pionowo z dysz z dużą prędkością, przez warstwę produktu znajdującego się na poziomej taśmie lub rynnie. Strumień gazu wprowadzany jest do nieruchomego złoża od góry, odbija się od taśmy lub dna rynny i wraca przez złożo do otoczenia.

Zwiększenie szybkości procesu wiąże się z dokładnym określeniem czasu rozmrażania w zależności od warunków i kształtów geometrycznych produktu. Pozwala to na projektowanie i kontrolę technologii rozmrażania. Rozmrażanie produktów o kształcie płyty, walca i kuli może być opisane przy użyciu podstawowych równań przekazywania ciepła [Heldman i Singh 1981]. Pierwsze opisuje przewodzenie ciepła w warstwie rozmrożonej produktu, której grubość wynosi x :

$$q = A(T_p - T_k)\lambda / x \quad (1)$$

gdzie: T_p jest temperaturą powierzchni produktu. Drugie równanie charakteryzuje wnikanie ciepła od środowiska do powierzchni produktu:

$$q = \alpha A(T_{\infty} - T_p) \quad (2)$$

gdzie: T_{∞} jest temperaturą środowiska rozmrażającego. Biorąc pod uwagę stacjonarność procesu, wyrażenia 1 i 2 mogą być przekształcone do postaci:

$$q = \frac{A(T_{\infty} - T_k)}{1/\alpha + x/\lambda} \quad (3)$$

Szybkość, z jaką ciepło jest doprowadzane do granicy frontu lodowego, wynika z równania:

$$q = AL\rho \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

gdzie dx/dt reprezentuje szybkość przemieszczania frontu lodowego. Z porównania zależności (3) i (4) i otrzymujemy dobrze znane równanie Planka [1941]:

$$t \frac{AD}{2V} = \frac{\Delta H}{T_o - T_k} \left(0,5 \frac{D}{\alpha} + 0,125 \frac{D^2}{\lambda} \right) \quad (5)$$

lub w bezwymiarowej formie:

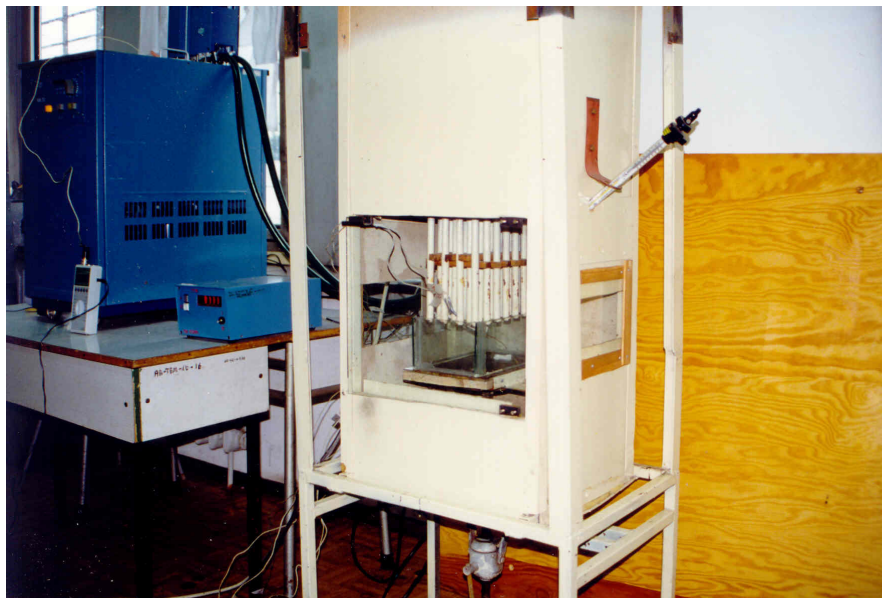
$$F_o \frac{AD}{2V} = \frac{0,5}{Bi \cdot Ste} + \frac{0,125}{Ste} \quad (6)$$

Oba wzory dotyczą czasu rozmrażania płyty. Plank przyjmował temperaturę krioskopową, właściwości cieplne i dostrzegalny efekt cieplny powyżej i poniżej temperatury zmiany fazy jako nieistotne w porównaniu z utajonym ciepłem zamarzania L . Stosowanie relacji 6:3:2 jako zależności pomiędzy czasem rozmrażania płyty, walca i kuli w tych samych warunkach nie zawsze jest prawdziwe dla materiałów biologicznych [Cleland i in. 1986, Cleland 1990]. Ostateczna weryfikacja dokładności metod stosowanych do przewidywania czasu rozmrażania musi być przeprowadzona na podstawie eksperymentalnych wyników. Najdokładniejsze rezultaty otrzymuje się, stosując metody numeryczne. Metody skończonych różnic i skończonego elementu zostały przetestowane na szeregu danych eksperymentalnych i ich wyniki nie odbiegają o więcej niż $\pm 10\%$ od danych eksperymentalnych [Hossain i in. 1992]. Powszechne stosowanie metod numerycznych jest ograniczone przez wymagania sprzętowe oraz długi czas obliczeń. Stąd dla celów praktyki produkcyjnej wykorzystuje się metody uproszczone, które dają możliwość szybkiej predykcji.

Celem pracy było zbadanie możliwości wykorzystania odwróconej fluidyzacji do intensyfikacji wymiany ciepła w procesie rozmrażania żywności oraz przeprowadzenie obliczeniowego wyznaczenia czasu trwania tego procesu, przy wykorzystaniu jednego z uproszczonych modeli.

METODY

Badania wykonano na laboratoryjnym stanowisku do prowadzenia procesu rozmrażania techniką odwróconej fluidyzacji znajdującym się w Zakładzie Inżynierii Chłodnictwa Akademii Rolniczej w Lublinie.



Rys. 4. Laboratoryjne stanowisko do badań nad odwróconą fluidyzacją
Fig. 4. The view of laboratory impingement stand

Materiałem użytym do badań były, uprzednio zamrożone do temperatury -35°C w warunkach konwekcji swobodnej, ziemniak, marchew i jabłko w postaci kostki o wymiarach $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. Produkty te wybrano ze względu na dostępność ich danych termofizycznych niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń (tab. 1).

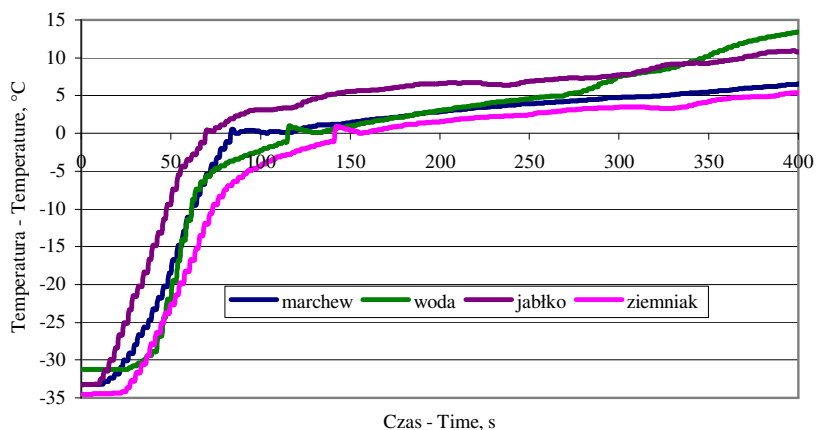
Tabela 1. Dane termofizyczne użyte do obliczeń weryfikujących [Gruda i Postolski 1999]
Table 1. Thermophysical properties used in thawing time calculations

Badany produkt Investigated product	Temperatura krioskopowa Cryoscopic temperature, $^{\circ}\text{C}$	Utajone ciepło zamarzania Latent heat of freezing, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Przewodność cieplna produktu niezamrożonego Thermal conductivity of unfrozen product, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Jabłko – apple	-2,0	282,0	0,538
Marchew – carrot	-1,35	293,6	0,571
Ziemniak – potato	-1,7	258,6	0,517

Temperaturę środowiska w czasie rozmrażania utrzymywano na stałym poziomie 15°C, a proces prowadzono do uzyskania temperatury 10°C w centrum termicznym próby. Pomiary powtarzano trzykrotnie. Każdorazowo podczas obróbki rozmrażalniczej dokonywano pomiarów temperatury w próbkach za pomocą wielokanałowego komputerowego miernika temperatury wyposażonego w termopary NiCrNi. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1 pomiar na s. Na podstawie zarejestrowanych wyników uzyskiwano krzywe przebiegu rozmrażania i wyznaczano czas rozmrażania. Współczynnik wnikania ciepła wyznaczono poprzez zastosowanie metody zamienników produktu wykonanych z miedzi [Góral i Kluza 2000]. Obliczenia czasu rozmrażania realizowano, wykorzystując równanie Planka. Błąd wyznaczenia czasu procesu oceniano jako stosunek błędu bezwzględnego obliczeń do rzeczywistej wartości czasu procesu. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, stosując pakiet Statgraphics v. 5.0 [StatGraphics 1991].

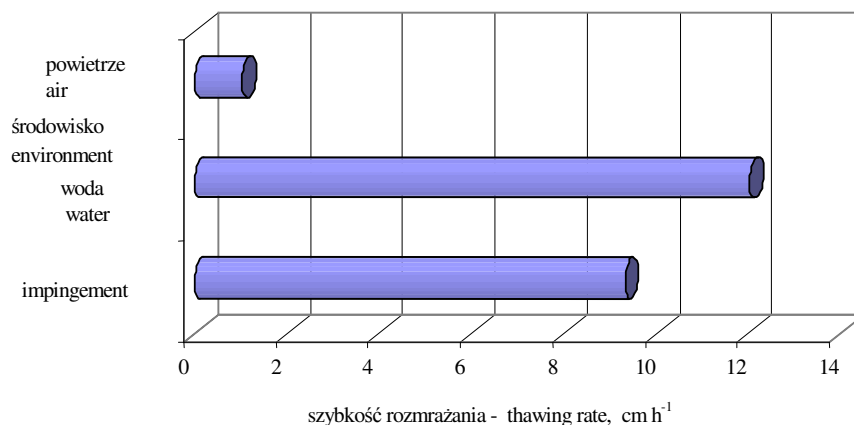
WYNIKI I ICH DYSKUSJA

Badając kinetykę rozmrażania, stwierdzono, że użycie techniki impingement pozwala na uzyskanie szybkości zbliżonej do szybkości rozmrażania w łaźni wodnej przy takich samych temperaturach środowiska rozmrażającego (rys. 5). Jednocześnie technika impingement pozbawiona jest wielu wad związanych ze zmianą właściwości produktu przez nasiąkanie wodą. Znaczne szybkości rozmrażania badaną techniką (rys. 6) są związane z uzyskiwaniem współczynnika wnikania ciepła o wartości co najmniej 120 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Zwiększenie szybkości rozmrażania, a przez to skrócenie czasu procesu, ma istotne znaczenie ze względu na zachowanie właściwości smakowych i zdrowotnych produktu, a także może korzystnie wpływać na jakość produktu, ze względu na ograniczenie możliwości rozwoju mikroflory na jego powierzchni.



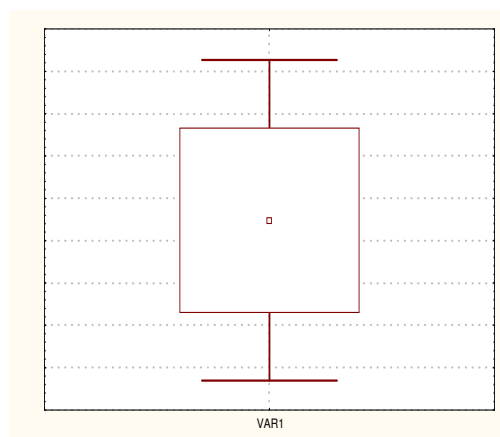
Rys. 5. Krzywe rozmrażania badanych produktów metodą odwróconej fluidyzacji i rozmrażania ziemniaka w wodzie

Fig. 5. Impingement thawing curves of investigated products and water thawing curve of potato



Rys. 6. Szybkość rozmrażania kostki ziemniaka
Fig. 6. Thawing rates of potato cube

Badając możliwość wykorzystania modelu Planka do obliczania czasu rozmrażania, stwierdzono duży rozrzut błędów obliczeń. Świadczy o tym wartość wariancji i zakresu (odpowiednio 1434 i 75,68). Graficzną prezentację kształtowania się wartości błędów obliczeń przedstawia wykres Box'a i Whiskera (rys. 7). Wielkość skrzynki na tym wykresie, która obejmuje 50% wartości, świadczy o dużym rozrzucie błędów. Jednocześnie skrzynka przesunięta jest wyraźnie ponad wartość 0, co świadczy o zawyżaniu wartości obliczonego czasu rozmrażania w stosunku do wartości rzeczywistych. Wartość średniego błędu wynosi 24,8% (tab. 2).



Rys. 7. Wykres Box'a i Whiskera dla błędów obliczeń
Fig. 7. Box and Whisker plot of calculated error

Tabela 2. Wyniki obliczeń czasu rozmrażania
Table 2. Results of thawing time prediction

Badany produkt Investigated product	Czas rzeczywisty Real time h	Czas obliczony Predicted time h	Błąd Error %
Marchew – carrot	0,078	0,106	26,7
Jabłko – apple	0,038	0,100	61,7
Ziemniak – potato	0,108	0,095	-13,98

Szczególnie wysoki średni błąd obliczeń (aż 61%) uzyskano w przypadku rozmrażania jabłek. Analizując przytoczone wyniki, należy stwierdzić, że używanie modelu Planka do obliczeń czasu rozmrażania w przypadku odwróconej fluidyzacji może prowadzić do uzyskania wartości obarczonych zbyt wysokim błędem i nie powinno być zalecane.

WNIOSKI

1. Użycie techniki odwróconej fluidyzacji pozwala na uzyskanie w powietrzu szybkości procesu zbliżonej do szybkości rozmrażania w wodzie przy takich samych temperaturach środowiska rozmrażającego.

2. Badając możliwość obliczeniowego wyznaczania czasu rozmrażania, wykorzystano model Planka. Stwierdzono duży rozrzut wyników obliczeń, o czym świadczy wartość wariancji i zakresu (odpowiednio 1434 i 75,68).

3. Analizując szczegółowo wyniki obliczeń czasu rozmrażania, należy stwierdzić, że używanie modelu Planka w przypadku techniki odwróconej fluidyzacji może prowadzić do dużych zróżnicowanych błędów (średnio $\pm 24,8\%$). W związku z tym istnieje prawdopodobieństwo, że większość z metod uproszczonych będzie również prowadziła w tym przypadku do znacznych błędów.

PIŚMIENNICTWO

- Cleland A. C., 1990. Food refrigeration processes analysis, design and simulation. Elsevier Applied Science, London.
- 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.
- Góral D., Kluza F., 2000. Próba oceny współczynnika wnikania ciepła w konwekcyjnym zamrażaniu żywności w powietrzu. *Inżynieria Rolnicza* 5 (16), 63-68.
- Heldman D. R., Singh P. R., 1981. Food Process Engineering. Second Edition. The AVI Publishing Co., Inc. Westport.
- 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.
- Gruda Z., Postolski J., 1999. Zamrażanie żywności. WNT, Warszawa.

- Ignaczak R., Osińska E., Zalewski S., 1992. Optymalizacja procesu rozmrażania kurcząt metodą solankową. *Przem. Gastr.* 1, 7.
- Pałacha Z., Remiszewska G., 1993. Temperatura krioskopowa żeli skrobiowych i żelatynowych. *Chłodnictwo* 5, 29–31.
- Plank R., 1941. Beiträge zur Berechnung und Bewertung der Gefriereschwindigkeit von Lebensmitteln. *Kälte-Ind. Beih.* 3(10) 1.
- Salvadori V. O., Mascheroni R. H., 2002. Analysis of impingement freezers performance. *J. Food Eng.* 54, 133–140.
- StatGraphics, 1991. Statistical Graphics System v 5.0, STSC Inc. Rockville.
- Zalewski S. (red.), 1993. *Podstawy technologii gastronomicznej*. WNT, Warszawa.

IMPINGEMENT TECHNIQUE IN THAWING OF FOOD AND AGRICULTURE PRODUCTS

Abstract. Possibility of impingement for food thawing process was studied. Also prediction of thawing time was tested. The carrot, potato and apple formed as a 1 cm × 1 cm × 1 cm cubes were thawing on impingement laboratory stand. Calculation of thawing time were realised using Plank's model. It can be assumed that the using of impingement thawing led to thawing rate near rate of thawing in water. Results of statistical analysis provided to statement that the calculated thawing time obtained after Plank's model lead to value with 24.8% error.

Keywords: thawing time, impingement, food thawing

Dariusz Góral, Zakład Inżynierii Chłodnictwa Akademii Rolniczej w Lublinie, ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin e-mail dgoral@faunus.ar.lublin.pl
Franciszek Kluza, Zakład Inżynierii Chłodnictwa Akademii Rolniczej w Lublinie, ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin e-mail fkluz@faunus.ar.lublin.pl