

Dr hab. inż. Zbigniew PAŁACHA, prof. SGGW

Inż. Dawid BUŁKA

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW w Warszawie

ANALIZA WPŁYWU WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA NA CZAS ZAMRAŻANIA WYBRANYCH OWOCÓW W TRADYCYJNYCH ZAMRAŻARKACH OWIEWOWYCH®

Analysis of the impact of the heat transfer coefficient for the freezing time some fruits in traditional air blast®

Słowa kluczowe: owoce, czas zamrażania, współczynnik wnikania ciepła.

W pracy prezentowanej w artykule przeprowadzono analizę czasu zamrażania 10 wybranych owoców (agrest, borówki, jabłka, jagody czarne, maliny, porzeczki czarne i czerwone, śliwki, truskawki i wiśnie). Obliczono i porównano czas zamrażania owoców, w zależności od wartości współczynnika wnikania ciepła oraz temperatury końcowej owoców (-18 i -30°C). Niezależnie od wartości współczynnika wnikania ciepła oraz temperatury końcowej owoców, najkrótszy czas zamrażania otrzymano dla porzeczki czarnej, a najdłuższy dla śliwek. Zaproponowano model potęgowej przydatny do szybkiego oszacowania czasu zamrażania owoców.

Key words: fruits, freezing time, heat transfer coefficient.

In the work presented in the article analyzes freezing time 10 selected fruits (gooseberries, red whortleberries, apples, blueberries, raspberries, black and red currants, plums, strawberries and cherries). Calculated and compared fruit freezing time, depending on the value of heat transfer coefficient and the final temperature of fruits (-18 and -30°C). Irrespective of the value of heat transfer coefficient and the final temperature of fruits, the shortest freezing time obtained for black currants and the longest for plums. Proposed power-law model useful to estimate the freezing time of fruits.

WSTĘP

Zamrażanie żywności w powietrzu jest najbardziej popularną i powszechnie stosowaną metodą zamrażania. W ok. 90% zamrażalni stosuje się obecnie zamrażarki powietrzne. Powietrze jest bardzo złym medium chłodzącym. Wskutek małej wartości przewodności cieplnej właściwej ($\lambda = 0,0195 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) w temperaturze 25°C, współczynniki wnikania ciepła (α) są niewielkie i w rezultacie czas zamrażania jest długi [1]. W celu skrócenia czasu zamrażania dąży się do uzyskania jak największej wartości współczynnika wnikania ciepła, ale zabieg ten jest energochłonny. Przyjmuje się, że współczynnik wnikania ciepła rośnie wg zależności $\alpha \approx u^{0,69}$, a zapotrzebowanie energii do napędu wentylatorów $N \approx u^3$. W efekcie, np. wzrost prędkości powietrza w zamrażarce owiewowej z 3 do 4 m/s podnosi wartość współczynnika wnikania ciepła o 21%, a zapotrzebowanie mocy rośnie blisko o 115% [1]. Należy zaznaczyć, że wzrost mocy wentylatorów zwiększa bilans ciepła zamrażarki i zapotrzebowanie mocy sprężarek, zatem prędkość strumienia powietrza należy planować bardzo ostrożnie, zwracając uwagę na jej równomierny rozkład w przekroju zamrażarki i dokładny owiew zamrażanych produktów.

Oprócz wartości współczynnika wnikania ciepła, na czas zamrażania wpływają inne czynniki zależne od rodzaju

i właściwości fizycznych zamrażanych produktów, takie jak: wielkość, kształt, gęstość i przewodność cieplna właściwa oraz czynna różnica temperatury [11, 12, 13]. Ogólnie, parametrem mającym największy wpływ na czas zamrażania jest wymiar charakterystyczny materiału. Nieco mniejszy wpływ odgrywiają kształt materiału, współczynnik wnikania ciepła, temperatura medium chłodzącego i rodzaj surowca. Natomiast najmniejszy wpływ wykazały temperatura początkowa oraz temperatura końcowa materiału w jego centrum termicznym [2, 3, 4, 7, 8, 9].

Celem artykułu jest analiza wpływu wartości współczynnika wnikania ciepła na czas zamrażania dziesięciu wybranych owoców zamrażanych tradycyjną metodą owiewową. Zakres pracy obejmował obliczenie i porównanie czasu zamrażania owoców o różnych kształtach, w zależności od temperatury końcowej owoców.

METODYKA BADAŃ

1. Materiał badawczy

Materiałem badawczym wybranym do analizy czasu zamrażania były następujące owoce: agrest, borówki, jabłka, jagody czarne, maliny, porzeczki czarna i czerwona, śliwki, truskawki i wiśnie.

2. Założenia wstępne

Założono, że temperatura początkowa (t_p) wszystkich owoców przed procesem zamrażania wynosiła 15°C, a średnia temperatura powietrza mrożącego (t_m) wynosiła -35°C. Owoce zamrażano do średniej temperatury końcowej (t_e) - 18 i -30°C. Entalpia owoców w temperaturze -40°C wynosiła 0 kJ/kg [1].

Owoce zamrażano tradycyjną metodą owiewową.

3. Metody obliczeniowe

3.1. Obliczanie czasu zamrażania

Czas zamrażania owoców w kształcie kuli o średnicy d_e obliczano z równania [5]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{6\Delta t} \left(\frac{d_e}{\alpha} + \frac{d_e^2}{4\lambda_e} \right) \quad (1)$$

Czas zamrażaniu owoców w kształcie prostopadłościanu (kostka jabłka o boku $l_e = 10$ mm) obliczano z równania [5]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{\Delta t} \left(P \frac{l_e}{\alpha} + R \frac{l_e^2}{\lambda_e} \right) \quad (2)$$

gdzie: $\Delta i = i_p - i_e$ – różnica entalpii produktu w temperaturze odpowiednio początkowej (t_p) i końcowej (t_e), kJ/kg,

ρ_z – gęstość produktu w stanie zamrożenia, kg/m³,

$\Delta t = t_{kr} - t_m$ – różnica temperatury między temperaturą krioskopową produktu (t_{kr}) i temperaturą powietrza mrożącego (t_m), °C,

α – współczynnik wnikania ciepła od powierzchni produktu do powietrza, W/(m²×K),

λ_e – przewodność cieplna właściwa produktu w stanie zamrożonym, W/(m×K),

P, R – współczynniki zależne od stosunku boków odpowiednio $a:l$ i $b:l$ (dla kostki jabłka $P = 0,1677$ i $R = 0,0417$ [6]).

3.2. Obliczanie entalpii produktu

Entalpię produktu w temperaturze początkowej (t_p) obliczano ze wzoru [8]:

$$i_p = c_e [t_{kr} - (-40)] + q_z + c_o (t_p - t_{kr}) \quad (3)$$

Entalpię produktu w temperaturze końcowej ($t_e = -18^\circ\text{C}$) obliczano ze wzoru [8]:

$$i_e = c_e [-18 - (-40)] \quad (4)$$

Entalpię produktu w temperaturze końcowej ($t_e = -30^\circ\text{C}$) obliczano ze wzoru [8]:

$$i'_e = c_e [-30 - (-40)] \quad (5)$$

gdzie: c_o – ciepło właściwe produktu nie zamrożonego, kJ/(kg×K),

c_e – ciepło właściwe produktu zamrożonego, kJ/(kg×K),

q_z – jednostkowe ciepło zamarzania produktu, kJ/kg.

Jednostkowe ciepło zamarzania produktu (q_z) obliczano ze wzoru [8]:

$$q_z = q_{zw} \cdot x_w \quad (6)$$

gdzie: q_{zw} – jednostkowe ciepło zamarzania czystej wody, 335,2 kJ/kg,

x_w – ułamek masowy wody w produkcie, kg/kg.

3.3. Obliczanie gęstości produktu w stanie zamrożonym

Gęstość owoców w stanie zamrożonym obliczano ze wzoru [10]:

$$\rho_z = \rho_o \left[1 - x_w \left(1 - \frac{t_{kr}}{t_e} \right) \cdot 0,083 \right] \quad (7)$$

gdzie: ρ_o – gęstość produktu w stanie nie zamrożonym, kg/m³.

3.4. Obliczanie współczynnika wnikania ciepła

Współczynnik wnikania ciepła obliczano ze wzoru [1]:

$$\alpha = 9,7 \cdot u^{0,69} \quad (8)$$

gdzie: α – współczynnik wnikania ciepła, W/(m²×K),

u – prędkość strumienia powietrza w wolnym przekroju zamrażarki, m/s.

Założono, że prędkość strumienia powietrza będzie wzrastała od 1 do 9 m/s, z przyrostem o 1 m/s.

4. Zestawienie danych wyjściowych przyjętych do analizy czasu zamrażania

W tabeli 1 zestawiono dane wyjściowe owoców niezbędne do obliczenia czasu zamrażania, a w tabeli 2 zestawiono obliczone wartości współczynnika wnikania ciepła przy zmianie prędkości strumienia powietrza mrożącego.

Tabela 2. Obliczone wartości współczynnika wnikania ciepła przy różnych prędkościach powietrza mrożącego

Table 2. The calculated value of the heat transfer coefficient at different speeds freezing air

Prędkość powietrza, m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Współczynnik α , W/(m ² ·K)	10	16	21	25	30	33	37	41	44

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

OMÓWIENIE I Dyskusja Wyników

W tabelach 3 i 4 podano obliczone wartości czasu zamrażania dla poszczególnych owoców w zależności od przyjętej wartości współczynnika wnikania ciepła i ich końcowej temperatury -18 i -30°C. Natomiast na rysunkach 1 – 3 przedstawiono przykładową ilustrację zmiany czasu zamrażania w zależności od wartości współczynnika wnikania ciepła dla porzeczek czarnych, truskawek i śliwek.

Analizując poszczególne wartości czasu zamrażania należy stwierdzić, że bez względu na rodzaj owoców, wraz ze wzrostem współczynnika wnikania ciepła, czas zamrażania

Tabela 1. Dane wyjściowe owoców do obliczania czasu zamrażania

Table 1. Output data of fruits to calculating freezing time

Owoce Dane	Agrest	Borówki	Jabłka	Jagody czarne	Maliny	Porzeczki czarne	Porzeczki czerwone	Śliwki	Truskawki	Wiśnie
Kształt surowca	kula	kula	kostka	kula	kula	kula	kula	kula	kula	kula
Wymiar [mm]	$d_e = 18^*$	$d_e = 10^{[12]}$	10x10x10	$d_e = 9^{[9]}$	$d_e = 20^{[9]}$	$d_e = 8^*$	$d_e = 10^*$	$d_e = 35^{[13]}$	$d_e = 24^{[13]}$	$d_e = 19^{[2]}$
X_w [kg/kg]	0,883 ^[6]	0,851 ^[6]	0,868 ^[4]	0,851 ^[4]	0,858 ^[4]	0,847 ^[6]	0,842 ^[4]	0,857 ^[1]	0,900 ^[1]	0,830 ^[6]
t_{kr} [°C]	-1,7 ^[9]	-1,5 ^[1]	-2,0 ^[9]	-1,9 ^[1]	-1,1 ^[1]	-1,0 ^[9]	-1,0 ^[9]	-2,2 ^[9]	-1,2 ^[9]	-3,3 ^[9]
ρ_o [kg/m ³]	1050 ^[1]	1000 ^[9]	990 ^[9]	1000 ^[9]	998 ^[9]	1000 ^[9]	1000 ^[9]	1030 ^[9]	950 ^[9]	1040 ^[9]
$\rho_{z(-18)}$ [kg/m ³]	980	935	929	939	934	934	934	966	884	981
$\rho_{z(-30)}$ [kg/m ³]	977	932	926	936	932	932	932	962	882	976
c_o [kJ/(kg·K)]	3,77 ^[9]	3,60 ^[9]	3,60 ^[9]	3,60 ^[9]	3,56 ^[9]	3,69 ^[9]	3,69 ^[9]	3,68 ^[9]	3,88 ^[9]	3,64 ^[9]
c_e [kJ/(kg·K)]	1,93 ^[9]	1,89 ^[9]	1,89 ^[9]	1,89 ^[9]	1,88 ^[9]	1,89 ^[9]	1,89 ^[9]	1,88 ^[9]	2,01 ^[9]	1,89 ^[9]
λ_e [W/(m·K)]	1,88 ^[9]	1,86 ^[9]	1,79 ^[9]	1,76 ^[9]	1,82 ^[9]	1,86 ^[9]	1,86 ^[9]	1,80 ^[9]	1,95 ^[9]	1,67 ^[9]
q_z [kJ/kg]	293,6 ^[9]	285,3 ^[9]	282,0 ^[9]	275,0 ^[9]	283,8 ^[9]	279,6 ^[9]	279,6 ^[9]	286,1 ^[9]	289,6 ^[9]	279,6 ^[9]
i_p [kJ/kg]	430,5	417,5	415,0	407,8	414,2	412,4	412,4	420,5	430,4	415,6
i_e kJ/kg]	42,5	41,6	41,6	41,6	41,4	41,6	41,6	41,4	44,2	41,6
i_e' [kJ/kg]	19,3	18,9	18,9	18,9	18,8	18,9	18,9	18,8	20,1	18,9

Źródło: Indeks górny ^[n] oznacza pozycję literaturową, indeks górny * oznacza wartość założoną, brak indeksu – wartości obliczone

Source: Superscript [n] means references superscript * is the value established, the Lack of index – calculated values

Tabela 3. Obliczony czas zamrażania [min] dla wybranych owoców ($t_e = -18^\circ\text{C}$)Table 3. The calculated freezing time [min] for selected fruits ($t_e = -18^\circ\text{C}$)

Owoce	Współczynnik wnikania ciepła, W/(m ² ·K)								
	10	16	21	25	30	33	37	41	44
Agrest	58,5	37,0	28,6	24,2	20,4	18,7	16,8	15,3	14,3
Borówki	29,5	18,6	14,3	12,0	10,1	9,2	8,3	7,5	7,0
Jabłka	29,5	18,5	14,1	12,1	9,9	9,0	8,3	7,3	6,8
Jagody czarne	26,3	16,6	12,7	10,7	9,0	8,2	7,4	6,7	6,2
Maliny	58,6	37,2	28,7	24,4	20,6	18,9	17,0	15,5	14,5
Porzeczki czarne	22,9	14,4	11,0	9,3	7,8	7,1	6,4	5,8	5,4
Porzeczki czerwone	28,7	18,1	13,9	11,7	9,8	9,0	8,0	7,3	6,8
Śliwki	113,8	73,1	57,0	48,7	41,5	38,2	34,6	31,8	29,9
Truskawki	69,4	44,2	34,1	29,0	24,5	22,5	20,3	18,5	17,4
Wiśnie	62,8	39,9	30,8	26,2	22,1	20,2	18,2	16,6	15,6

Źródło: Opracowanie własne

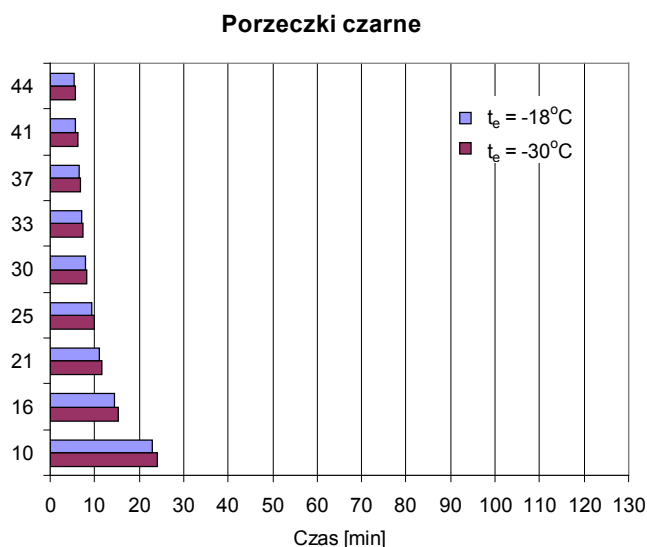
Source: Own study

Tabela 4. Obliczony czas zamrażania [min] dla wybranych owoców ($t_e = -30^\circ\text{C}$)Table 4. The calculated freezing time [min] for selected fruits ($t_e = -30^\circ\text{C}$)

Owoce	Współczynnik wnikania ciepła, W/(m ² ·K)								
	10	16	21	25	30	33	37	41	44
Agrest	61,8	39,1	30,2	25,6	21,6	19,7	17,7	16,2	15,2
Borówki	31,2	19,7	15,1	12,7	10,7	9,7	8,7	7,9	7,4
Jabłka	31,2	19,5	14,9	12,5	10,5	9,5	8,5	7,7	7,2
Jagody czarne	27,8	17,5	13,4	11,3	9,5	8,7	7,8	7,1	6,6
Maliny	62,1	39,4	30,4	25,8	21,8	20,0	18,0	16,4	15,4
Porzeczki czarne	24,2	15,2	11,7	9,8	8,2	7,5	6,7	6,1	5,7
Porzeczki czerwone	30,4	19,1	14,7	12,4	10,4	9,5	8,5	7,7	7,2
Śliwki	120,1	77,2	60,1	51,4	43,7	40,3	36,5	33,5	31,6
Truskawki	73,6	46,8	36,2	30,7	26,0	23,8	21,5	19,6	18,4
Wiśnie	66,3	42,1	32,5	27,6	23,3	21,4	19,3	17,6	16,5

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

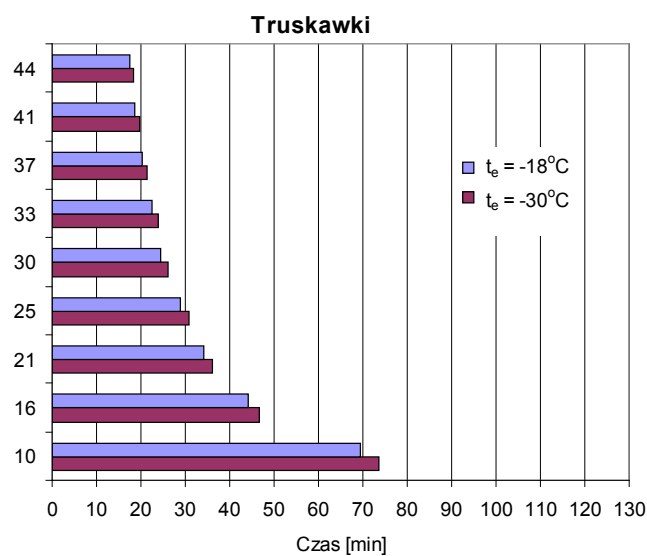


Rys. 1. Wpływ współczynnika wnikania ciepła na czas zamrażania porzeczki czarnej.

Fig. 1. The impact of heat transfer coefficient for the freezing time of black currants.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



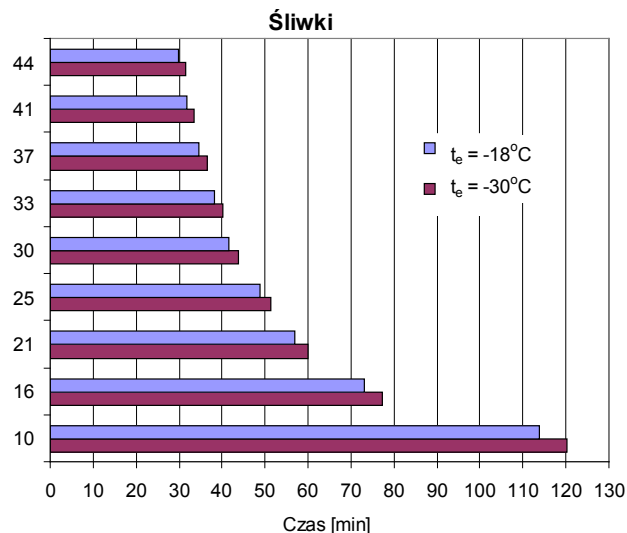
Rys. 2. Wpływ współczynnika wnikania ciepła na czas zamrażania truskawek.

Fig. 2. The impact of heat transfer coefficient for the freezing time of strawberries.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

uległ skróceniu. Wzrost współczynnika wnikania ciepła z 10 do 44 W/(m²·K) (4,4-krotny), spowodował podobne obniżenie czasu zamrażania, bez względu na końcową temperaturę owoców. W przypadku kostek jabłka spadek czasu zamrażania był największy (4,3-krotny), a najmniejszy dla śliwek (3,8-krotny) (tab. 3 – 4). Analiza rysunków 1 – 3 pozwala stwierdzić, że największe skrócenie czasu zamrażania wystąpiło, kiedy wartość współczynnika wnikania ciepła wzrosła z 10 do 30 W/(m²·K). Powyżej wartości 30 W/(m²·K), jego wzrost miał coraz mniejsze znaczenie w obniżeniu



Rys. 3. Wpływ współczynnika wnikania ciepła na czas zamrażania śliwek.

Fig. 3. The impact of heat transfer coefficient for the freezing time of plums.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

czasu zamrażania. Tendencję tę zauważono zarówno w temperaturze końcowej owoców -18°C jak i -30°C . Ponadto, im wymiar charakterystyczny owocu był większy ($d_{\text{śliwki}} > d_{\text{truskawki}} > d_{\text{porzeczki czarne}}$), tym wpływ współczynnika wnikania ciepła na czas zamrażania był bardziej wyraźny (rys. 1 – 3). Ponieważ wzrost wartości współczynnika wnikania ciepła pociąga za sobą znaczny wzrost zapotrzebowania mocy, wydaje się, że w tradycyjnych zamrażarkach owiewowych nie powinien on przekraczać wartości 30 W/(m²·K).

Spośród badanych owoców najdłuższym czasem zamrażania charakteryzowały się śliwki dla najmniejszej wartości współczynnika wnikania ciepła (10 W/(m²·K)). Wyniósł on odpowiednio 113,8 minuty dla $t_e = -18^\circ\text{C}$ i 120,1 minuty dla $t_e = -30^\circ\text{C}$ (tab. 3 – 4, rys. 3). Z kolei, najkrótszy czas zamrażania dla tej samej wartości współczynnika α , stwierdzono dla porzeczki czarnej. Wyniósł on odpowiednio 22,9 minuty dla $t_e = -18^\circ\text{C}$ i 24,2 minuty dla $t_e = -30^\circ\text{C}$ (tab. 3 – 4, rys. 1). Czas zamrażania śliwek dla każdej wartości współczynnika wnikania ciepła był od 5,0 do 5,5 razy dłuższy niż w przypadku porzeczki czarnej. Największy wpływ na wartość czasu zamrażania miała średnica zamrażanego surowca (średnica porzeczki czarnej była 4,4 razy mniejsza od średnicy śliwek).

Wartości czasu zamrażania borówek, jagód czarnych, porzeczki czarnej i czerwonej oraz kostek jabłka (tab. 3 – 4) były zbliżone do siebie dla każdej wartości współczynnika wnikania ciepła. Podobnie, zbliżone wartości czasu zamrażania stwierdzono dla agrestu, malin, truskawek i wiśni (tab. 3 – 4). Tym niemniej, czas zamrażania drugiej grupy owoców, był od 2 do 3 razy dłuższy niż owoców grupy pierwszej. Różnica ta wynikała głównie z blisko dwukrotnie większej średnicy owoców drugiej grupy. Rodzaj owocu oraz jego właściwości fizyczne nie miały tak istotnego wpływu na czas zamrażania, jaki miał ich wymiar charakterystyczny. Spostrzeżenia te znalazły potwierdzenie wcześniej w pracy Pałachy i Krystian [8].

Obniżając średnią temperaturę końcową (t_c) owoców z -18 do -30°C otrzymano nieznacznie dłuższy czas zamrażania dla każdego owocu. Średnia długość czasu zamrażania zwiększyła się o ok. 5,5% i była niezależna od wartości współczynnika wnikania ciepła. Tłumaczy to fakt, iż obniżenie temperatury końcowej wiązało się z obniżeniem wartości entalpii dla temperatury końcowej, a to spowodowało, że różnica entalpii w temperaturze początkowej i końcowej zamrażanych owoców nieco się zwiększyła, co z kolei nieznacznie wydłużyło czas zamrażania.

Po przeanalizowaniu czasu zamrażania owoców, podjęto próbę znalezienia zależności funkcyjnej między czasem zamrażania a współczynnikiem wnikania ciepła. Do opisu tej zależności zaproponowano model potęgowy w postaci:

$$\tau = a \cdot \alpha^b \quad (9)$$

gdzie: τ – czas zamrażania, min,
 α – współczynnik wnikania ciepła, W/(m²·K),
 a, b – stałe.

Tabela 5. Zależność czasu zamrażania od wartości współczynnika wnikania ciepła opisana modelem potęgowym

Table 5. The dependence of the freezing time on the value of the heat transfer coefficient described powerlaw model

Owoce	Temperatura końcowa -18°C		Temperatura końcowa -30°C	
	Model potęgowy	R ²	Model potęgowy	R ²
Agrest	$\tau = 527,16 \cdot \alpha^{-0,956}$	0,9999	$\tau = 555,98 \cdot \alpha^{-0,955}$	0,9999
Borówki	$\tau = 277,52 \cdot \alpha^{-0,974}$	1,0000	$\tau = 294,94 \cdot \alpha^{-0,976}$	1,0000
Jabłka	$\tau = 285,55 \cdot \alpha^{-0,986}$	0,9998	$\tau = 307,20 \cdot \alpha^{-0,994}$	1,0000
Jagody czarne	$\tau = 248,01 \cdot \alpha^{-0,975}$	0,9999	$\tau = 261,56 \cdot \alpha^{-0,974}$	0,9999
Maliny	$\tau = 519,15 \cdot \alpha^{-0,948}$	0,9999	$\tau = 551,10 \cdot \alpha^{-0,949}$	0,9998
Porzeczki czarne	$\tau = 217,70 \cdot \alpha^{-0,979}$	0,9999	$\tau = 231,34 \cdot \alpha^{-0,981}$	1,0000
Porzeczki czerwone	$\tau = 270,47 \cdot \alpha^{-0,975}$	1,0000	$\tau = 286,60 \cdot \alpha^{-0,975}$	1,0000
Śliwki	$\tau = 927,27 \cdot \alpha^{-0,913}$	0,9997	$\tau = 980,01 \cdot \alpha^{-0,914}$	0,9997
Truskawki	$\tau = 607,06 \cdot \alpha^{-0,943}$	0,9998	$\tau = 645,18 \cdot \alpha^{-0,944}$	0,9998
Wiśnie	$\tau = 555,93 \cdot \alpha^{-0,948}$	0,9999	$\tau = 585,05 \cdot \alpha^{-0,947}$	0,9998

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

W tabeli 5 zestawiono równania, z których można obliczyć czas zamrażania poszczególnych owoców dla określonej wartości współczynnika wnikania ciepła (od 10 do 44 W/(m²·K)).

O słuszności doboru modelu potęgowego do opisu opracowanych danych, świadczy bardzo wysoka wartość współczynnika determinacji (R²), równa lub bliska 1. Wartość stałej b w przypadku wszystkich owoców mieściła się w przedziale od -0,994 do -0,913. Zbliżone wartości stałej b wskazują na podobny przebieg zmiany czasu zamrażania owoców w zależności od zmiany współczynnika wnikania ciepła. Praktycznie, końcowa temperatura owoców nie miała istotnego wpływu na wartość stałej b . Ogólnie, wartości stałej a w modelu potęgowym, dla końcowej temperatury owoców -30°C, mieściły się w przedziale od 231,34 (porzeczki czarne) do 980,01 (śliwki), a dla temperatury -18°C, od 217,70 do 927,27 i były odpowiednio od 5 do 6% niższe. Zaproponowany model potęgowy oraz znajomość wartości stałych a i b pozwolił na łatwość obliczyć czas zamrażania danego owocu do określonej temperatury końcowej (-18 lub -30°C), przy założonej wartości współczynnika wnikania ciepła.

Należy jednak podkreślić, że oprócz czasu zamrażania, dobierając optymalną metodę zamrażania owoców, należy również uwzględnić inne czynniki natury technologicznej, technicznej, ekonomicznej i organizacyjnej.

WNIOSKI

1. Czas zamrażania owoców w tradycyjnych zamrażarkach owiewowych znacząco zależał od wartości współczynnika wnikania ciepła, szczególnie dla wartości od 10 do 30 W/(m²·K).
2. Niezależnie od wartości współczynnika wnikania ciepła oraz temperatury końcowej owoców, najkrótszy czas zamrażania otrzymano dla porzeczek czarnych, a najdłuższy dla śliwek.
3. Borówki, jagody czarne, porzeczki czarne i czerwone oraz kostki jabłek uzyskały zbliżony czas zamrażania, który był od 2 do 3 razy krótszy od czasu zamrażania agrestu, malin, truskawek i wiśni.
4. Obniżenie temperatury końcowej owoców z -18 do -30°C, spowodowało nieznaczne wydłużenie czasu ich zamrażania o ok. 5,5 %, bez względu na wartość współczynnika wnikania ciepła.
5. Zaproponowany model potęgowy może być przydatny do szybkiego oszacowania czasu zamrażania owoców w tradycyjnych zamrażarkach owiewowych.

LITERATURA

- [1] GRUDA Z., J. POSTOLSKI. 1999. Zamrażanie żywności. Wyd. 3. WNT: Warszawa.
- [2] KALISZ S., M. OBIEDZIŃSKI. 2010. „Wpływ temperatury na efektywność procesu drylowania w produkcji wiśni mrożonej”. Nauka. Przyroda. Technologie 4(2): 1-11.
- [3] KLUZA F., D. GÓRAL. 1993. „Statystyczna charakterystyka oddziaływania podstawowych parametrów zamrażania produktów spożywczych na efektywny czas trwania procesu”. Chłodnictwo 28(1): 27-28.
- [4] KUNACHOWICZ H., I. NADOLNA, B., PRZYGODA, K. IWANOW. 2005. Tabele składu i wartości odżywczej żywności. Warszawa: PZW.

- [5] **PAŁACHA Z. 2014.** Zamrażanie żywności. W: Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. Wyd. 4. (red. P.P. Lewicki), Warszawa: WNT: 320-345.
- [6] **PAŁACHA Z. 2010.** Właściwości cieplne. W: Właściwości fizyczne żywności (red. Z. Pałacha, I. Sitkiewicz), Warszawa: WNT: 81-112.
- [7] **PAŁACHA Z., G. ŚWISTAK. 2015.** „Analiza czasu zamrażania wybranych warzyw przy zmiennych parametrach procesu zamrażania”. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 25/46(1): 9-14.
- [8] **PAŁACHA Z., J. KRYSZTIAN. 2014.** „Analiza czasu zamrażania wybranych owoców przy zmiennych parametrach procesu zamrażania”. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 24/45(2): 62-67.
- [9] **PAŁACHA Z., E. JANISZEWSKA. 2012.** Zamrażanie żywności. W: Wybrane zagadnienia obliczeniowe inżynierii żywności (red. D. Witrowa-Rajchert, P.P. Lewicki), Warszawa: Wyd. SGGW: 252-281.
- [10] **PAŁACHA Z., W. RACZYŃSKI. 2005.** „Opracowanie metody oznaczania gęstości wybranych owoców w stanie zamrożonym”. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 16/27(2): 55-59.
- [11] **POSTOLSKI J. 2007.** „Prawie wszystko o... technologii chłodniczej żywności” (cz. 24). Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna 1: 11-16.
- [12] **PRACA ZBIOROWA 2008.** Surowce spożywcze pochodzenia roślinnego (red. K. Świetlikowska), Warszawa: Wyd. SGGW.
- [13] **PRACA ZBIOROWA 1994.** Pomologia (red. A. Rejman), Warszawa: PWRiL.