

Питання технології заморожування сільськогосподарської продукції і технічні розрахунки необхідні при цьому, вимагають знання теплофізичних характеристик, проте достатньо повна інформація по даній проблемі відсутня.

Аналіз останніх досліджень. Питання визначення теплофізичних характеристик плодів і овочів, зокрема соків, досліджувались в роботах Громова М.А. [3,4]. Їм узагальнені у вигляді таблиць дані багатьох досліджень і отримані емпіричні формули, які добре узгоджуються лише для соків, а табличні дані для плодів і овочів є тільки для окремих температур і носять фрагментарний характер.

Метою даної роботи є визначення теплофізичних характеристик овочів і винограду при позитивних і негативних температурах.

Основна частина. Проведені нами дослідження показали [5,6], що зміни коефіцієнта теплопровідності різних овочів і винограду від температури мають аналогічний характер (Рис. 1).

Для всіх овочів і винограду залежність $\lambda = f(t)$ описується запропонованою нами формулою.

$$\lambda = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 + a_6 \cdot T^6 + \dots + a_9 \cdot T^9$$

або

$$\lambda_t = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot T^i$$

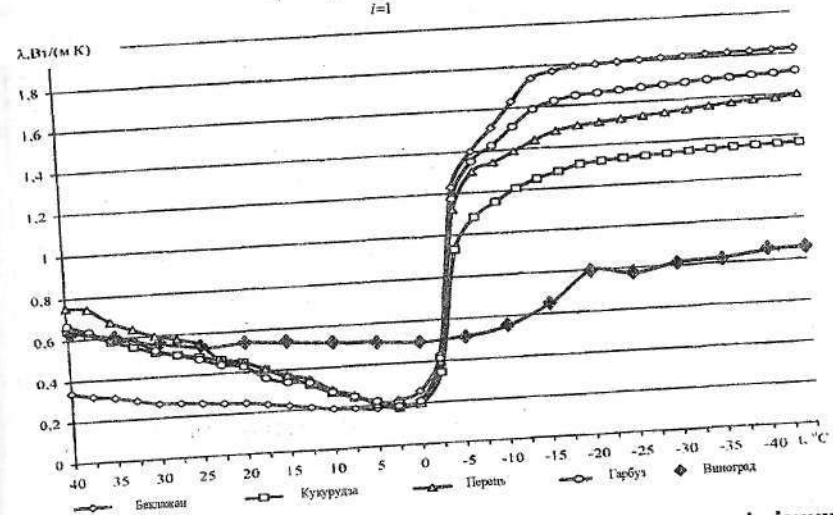


Рис. 1. Залежність зміни коефіцієнта теплопровідності різних овочів і винограду від температури

УДК 664.8.0375:635

РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОВОЧІВ І ВИНОГРАДУ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ

Ялпачик В.Ф. к.т.н.

Таврійська державна агротехнічна академія

Постановка проблеми. Одним з найефективніших способів консервації рослинної сировини при якнайменших втратах і максимальному збереженні харчових і смакових властивостей є заморожування з подальшим низькотемпературним зберіганням. Цей спосіб консервації дозволяє максимально зберегти початкові сезонні якості і харчову цінність продукції рослинництва, характеризується низьким рівнем витрат (порівняно із стерилізацією), підвищенням рівня готовності для індивідуального споживання [1,2]

де λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);
 a_i — емпіричний коефіцієнт, залежний від виду овочів і винограду від їх структури, змісту вологи і інших параметрів;
 T — поточна температура плоду, К°.

Значення емпіричних коефіцієнтів для овочів і винограду було уточнено експериментальним шляхом (табл. 1).

Аналіз графіків показує наявність чітких зон. Перша зона лежить в області позитивних температур, від температури кипіння (100°С) при атмосферному тиску (0,1 МПа) до 0°С і наголошується плавним зниженням коефіцієнта теплопровідності з пониженням температури, що викликано, на нашу думку, зниженням конвективної складової перенесення теплоти і наближенням до значення чистої теплопровідності твердих структур плоду поблизу нуля. Таким чином, строго кажучи, в цій зоні ми маємо справу не з коефіцієнтом теплопровідності, а з деякою еквівалентною величиною що враховує перенесення теплоти як теплопровідністю (скелетні структури), так і конвективне перенесення теплоти (капілярна волога і внутріклітинна волога).

Друга зона: від 0°С до криоскопічної температури, яка для кожного плоду має своє значення, але в середньому від -0,5°С до -2,5°С. В цій зоні ми маємо практично нульове значення теплопровідності, оскільки майже вся кількість теплоти витрачається на фазовий перехід. Температура при цьому залишається незмінною до 2,5 години (при температурі заморожування -20°С).

Табл. 1. Емпіричні коефіцієнти для овочів і винограду

Коефіцієнт	Овочі, виноград				
	Баклажан	Кукурудза	Перець	Гарбуз	Виноград
a_0	$8,379 \cdot 10^8$	$-1,6 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^8$
a_1	$-2,295 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^4$	$-8,6 \cdot 10^8$	$-5,9 \cdot 10^5$	$-1,7 \cdot 10^7$
a_2	$2,748 \cdot 10^5$	$-1,4 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^7$
a_3	-1880,3	0,036	$-9,5 \cdot 10^4$	-35	0,086
a_4	8,036	0,002	$4,9 \cdot 10^2$	0,12	5,043
a_5	-0,022	$-1 \cdot 10^{-5}$	-1,74	-0,00025	$-2,05^7$
a_6	$3,754 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,004	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
a_7	$-3,664 \cdot 10^{-8}$	$-1,1 \cdot 10^{-11}$	$-5,74 \cdot 10^{-6}$	$-1,4 \cdot 10^{-10}$	$-2,45 \cdot 10^{-6}$
a_8	$1,564 \cdot 10^{-11}$	0	$4,9 \cdot 10^{-6}$	0	$6,9 \cdot 10^{-10}$
a_9	0	0	$-1,9 \cdot 10^{-12}$	0	$-1,7 \cdot 10^{-11}$

Третя зона: від криоскопічної температури до -15...-20°С є перехідною і її не можна рекомендувати як температуру припинення заморожування, не тільки в ній відбувається різке збільшення коефіцієнта теплопровідності, ні мабуть пов'язано з підвищенням теплопровідності замерзаючих структур плоду. В той же час в клітках залишається незамерзла волога.

Четверта зона від -15...-20°С до -25...-45°С є зоною виходу на положу ділянку зміни (λ). В цій зоні закінчується основні процеси кристалізації і структуризації замерзлого плоду. Цю зону можна рекомендувати як зону температур припинення заморожування.

Після виходу на положу ділянку зміни (λ) в зону термодинамічної стійкості подальший зниження температури можна припинити.

Таким чином, завдяки дослідженню коефіцієнта теплопровідності в широких межах: від +100°С до -195°С можна зробити висновок про наявність декількох зон теплової обробки, відповідних локально-стабільним значенням коефіцієнта теплопровідності, придатних для підготовки до тривалого зберігання. Їх вибирають залежно від мети зберігання плодовоовочевої продукції. (рис. 2).

На рисунку 2 умовно позначено: S_T — стерилізація +88...+98°С; P_C — пастеризація +78...+74°С; $ДП_C$ — тривала пастеризація +63...+65°С; K_X — короткочасне зберігання в холодильних камерах +2...+8°С (від 2 діб до 2 місяців для різних плодів і овочів); D_X — тривале зберігання від допустимої -12°С до бажаної -30...-45°С; $ОД_X$ — зона дуже тривалого зберігання більше року до декількох років.

Знання значень коефіцієнтів теплопровідності як функції від температури дозволяє виконувати більш точний розрахунок процесів заморожування, зберігання в замороженому вигляді і дефростації плодовоовчевої продукції.

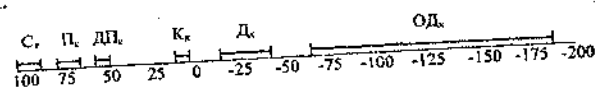


Рис. 2. Зони підготовки до зберігання плодовоовчевої продукції відповідні локально-стабільним значенням коефіцієнта теплопровідності (l)

Коефіцієнт температуропровідності вказаних овочів і винограду як при позитивних, так і при негативних температурах визначали по формулі [7,8].

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

де c — питома теплоємність, Дж/(кг·К);
 ρ — густина, кг/м³.

Теплоємність плодів і овочів визначається по формулі [7]

$$c = 4,19 - 0,028 \cdot n_c$$

де n_c — зміст сухих речовин, %.

Значення C і a приведені в табл. 2.

Коефіцієнт тепловіддачі I розраховували за допомогою методу регулярного режиму [9]. По графікам заморожування плодів в холодильній камері.

Визначаємо безрозмірну температуру θ із співвідношення

$$\theta = \frac{\Delta t_r}{\Delta t_0},$$

де Δt_r — різниця температур між плодом і температурою в холодильній камері за час t , °C;

Δt_0 — початкова різниця температур між плодом і температурою в камері, °C.

Як приклад визначимо зміни коефіцієнта тепловіддачі I від зміни температури в центрі баклажан при заморожуванні в холодильній камері при температурі мінус 40°C (Рис. 2).

Коефіцієнт тепловіддачі α

$$\alpha = \frac{c \cdot m \cdot \ln \frac{1}{\theta}}{F \cdot \tau},$$

де c — теплоємність, ($c=3,91$) кДж/кг·К;

m — маса плоду, ($m=0,127$) кг;

τ — час для даної температури, с;

F — площа, поверхні плода, м²;

Площу плодів знайдемо по формулі

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot L = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,055^2}{4} + 3,14 \cdot 0,055 \cdot 0,120 = 0,025 \text{ м}^2,$$

де D — діаметр плоду, м;

L — довжина плоду, м.

Значення зміни коефіцієнта тепловіддачі від зміни температури представлені в табл. 3.

Ентальпія плодів була визначена по формулі

$$i = c \cdot t' - r_3 \cdot \left(1 - \frac{t_{сп}}{t'}\right) \cdot \left(\frac{100 - n_c}{100}\right)$$

де i — ентальпія сировини при температурі t_2 , яка береться з своїм знаком, кДж/кг;

r_3 — затвердіння води, кДж/кг.

$$r_3 = 2,1 \cdot (160 - t').$$

Табл. 2. Значення теплоємності сировини кДж/кг·К і коефіцієнта температуропровідності м²/с от температури

Сировина	Вміст сухих речовин, % n_c	Щільність, кг/м ³ ρ	Значення питомої теплоємності, кДж/кг·К	Коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності для температур, С°										
				Значення λ і a	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	
Баклажани	9,9	680	3,913	λ 0,35 a $1,3 \cdot 10^{-7}$	0,29	0,25	0,2	0,19	1,59	1,79	1,8	1,82	1,7	1,7
	5,9	730	4,024	λ 0,75 a $2,5 \cdot 10^{-7}$	0,6	0,45	0,2	0,2	1,38	1,5	1,57	1,7	1,7	1,7
Перець	8,1	570	3,963	λ 0,65 a $3,3 \cdot 10^{-7}$	0,52	0,44	0,29	0,20	1,77	1,31	1,36	1,38	1,38	1,38
	7,6	960	3,977	λ 0,64 a $1,7 \cdot 10^{-7}$	0,51	0,42	0,29	0,2	1,41	1,63	1,64	1,65	1,65	1,65
Виноград	16,4	1040	3,731	λ 0,64 a $1,6 \cdot 10^{-7}$	0,57	0,54	0,52	0,5	0,58	0,8	0,81	0,84	0,84	0,84

Табл. 3. Зміни коефіцієнта тепловіддачі від зміни температури в центрі плоду баклажан

Температура в центрі плоду °С	2	0	0,86	-5	-10	-15	-20
Час досягнення температури в центрі плоду, мін.	10	25	35	105	110	118	135
λ , Вт/м ² ·К	2,24	1,73	0,63	0,83	1,24	1,68	2,01

Значення ентальпії для овочів і винограду приведені в табл. 4.

Таблица 4. Ентальпія сировини при зміні температури

Ентальпія кДж/кг	Температура									
	298	293	288	283	278	273	268	263	258	253
Баклажан	1470,3	1440,3	1410,4	1380,4	1350,4	1320,5	1290,5	1260,5	1230,6	1200,6
Перець	1445,8	1416,4	1386,9	1357,5	1328,1	1298,7	1269,2	1239,8	1210,4	1180,9
Кукурудза	1352,4	1325,0	1297,6	1270,2	1242,8	1215,4	1188,0	1160,6	1133,2	1105,8
Тиква	1451,3	1421,7	1392,2	1362,6	1333,1	1303,5	1273,9	1244,4	1214,8	1185,3
Виноград	1426,4	1397,4	1368,4	1339,4	1310,4	1281,4	1252,4	1223,4	1194,4	1165,3

Значення ентальпії можна використовувати для приблизного визначення кількості заперечуваного при заморожуванні і дефростації тепла [10]

$$Q_k = m \cdot (i_1 - i_2),$$

де Q_k – кількість тепла, що віддається, кДж або ккал;

m – маса продукту, кг;

i_1 і i_2 – ентальпія при початковій і кінцевій температурі продуктів, кДж/кг або ккал/кг.

Усихання плодів при низькотемпературному зберіганні розраховувався [11]

$$dg = 0.622 \cdot \frac{\alpha}{\mu \cdot c_p} \cdot \frac{P_{cm} \cdot (t_{cm}(\delta) - \phi \cdot P_{max}(t_x))}{P} \cdot S \cdot \frac{d\tau}{d\delta}$$

де g – втрата маси при усиханні, кг;

P_{cm} – тиск у поверхні, Па;

t_{cm} – температура поверхні;

ϕ – відносна вологість;

P_{max} – максимальний тиск при температурі, Па;

P – тиск в камері, Па;

S – площа поверхні плоду, м²;

τ – час, с;

δ – товщина, м.

Висновки. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити висновки, що:

1. Значення коефіцієнтів теплопровідності як функції від температури дозволяє виконувати більш точний розрахунок процесів заморожування, зберігання в замороженому вигляді і дефростації плодоовочевій продукції.

2. Отримані значення коефіцієнта температуропровідності і тепловіддачі плодів при заморожуванні дозволяють оцінювати час заморожування при розробці режимів заморожування.

3. Знання ентальпії можна використовувати для приблизного визначення кількості відбираного при заморожуванні і дефростації тепла.

4. Запропонована формула для визначення усихання плодів в процесі зберігання.

5. Отримана аналітична залежність і емпіричні коефіцієнти можуть бути використані для розрахунку технологічних ліній заморожування і дефростацію овочевої продукції.

Список літератури:

1. И. Г. Чумак. Состояние и перспективы развития сферы хранения пищевого сырья в Украине // Холодильная техника и технология. – 1997. – №57 – с. 10–12.
2. І. О. Конвісер, Т. Б. Паригіна. Холодильна технологія харчових продуктів. К.: Київський державний торговельно-економічний університет, 2001. – 242 с.
3. М. А. Громов. Универсальное уравнение для расчета коэффициентов теплопроводности соков // Консервная и овощная промышленность. – 1972. – №8. – с. 32 – 33.
4. М. А. Громов. Теплофизические характеристики плодов при отрицательных температурах. // Консервная и овощная промышленность. – 1972. – №2. – с. 34 – 35.