

## МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Ялпачик В.Ф., к.т.н.<sup>1</sup>

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.(0619) 42-13-06

**Анотація** – робота присвячена методиці моделювання і розрахунків теплофізичних властивостей харчової сировини рослинного походження.

**Ключові слова** – теплофізичні властивості, питома теплоємність, ентальпія, виморожена вода, густина, теплопровідність, алгоритмічна мова Turbo Pascal.

*Постановка проблеми.* Теплофізичні властивості харчової сировини самі по собі представляють відносно малий інтерес. Концепція їх суттєвої необхідності та моделювання полягає у їх використанні в рамках крайових задач теплопровідності – розв’язування цих задач має приводити до температурних полів, які в рамках заданих значень похибок співпадають з експериментально вимірними. При цьому температурні поля також приводять до аналогічно вивірених значень тривалості процесів охолодження чи заморожування відповідних об’єктів харчової сировини, значень теплових потоків (перша похідна температурного поля за координатою) з їх поверхні в охолоджуюче чи нагріваюче середовища, значень загальної кількості відведеної чи підведеної теплоти за заданий проміжок часу (теплове навантаження) [2,7,9,13,15,16]. Якщо при моделюванні процесів холодильної чи теплової обробки об’єктів харчової сировини взяти за основу диференціальне рівняння теплопровідності, то виникає необхідність у значеннях чотирьох теплофізичних величин, що загалом залежать від температури, – ізobarної питомої теплоємності  $C(T)$ , питомої ентальпії  $I(T)$ , густини  $\rho(T)$  та теплопровідності  $\lambda(T)$ . Необхідні значення температури  $T$  для процесів холодильної та зворотної теплової обробки лежать сьогодні в діапазоні від мінус 40 °С до 40 °С, мають для деяких видів сировини тенденцію до зниження нижньої межі [1,10,14].

*Аналіз останніх досліджень.* Специфіка об’єктів харчової сировини в даній роботі полягає, перш за все, в протіканні фазового перетворення вода-лід або лід-вода, тобто вони є об’єктами з внутрішніми стоками чи джерелами теплоти, інтенсивність яких визначається динамікою фазового перетворення. У цьому плані необхідне моделювання процесів холодильної обробки та холодильного зберігання рослинної сировини, диференціальне рівняння теплопровідності в загальному вигляді має бути записано як

$$C(T) \cdot \rho(T) \frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T(\vec{r}, \tau)] + I(\vec{r}, \tau), \quad (1)$$

де функція  $T(\vec{r}, \tau)$  моделює температурне поле у просторі  $\vec{r}$  та у часі  $\tau$ , а функція  $I(\vec{r}, \tau)$  – відповідно, об'ємну густину (інтенсивність, Дж/м<sup>3</sup>) джерел чи стоків теплоти в об'єкті. У разі фазового перетворення вода-лід останню достатньо просто виписати у явному виді [11]:

$$\begin{aligned} I(\vec{r}, \tau) &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0, \Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V \cdot \Delta \tau} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0, \Delta \tau \rightarrow 0} \frac{L(T^*) \cdot \rho(T^*) \cdot \Delta V \cdot \{\omega(\tau + \Delta \tau) - \omega(\tau)\} \cdot W_{in}}{\Delta V \cdot \Delta \tau} = \\ &= L(T) \cdot \rho(T) \cdot W_{in} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \frac{d\omega(T)}{dT}. \end{aligned}$$

При цьому  $\Delta V$  означає довільний елемент об'єму,  $\Delta \tau$  – довільний проміжок часу,  $\Delta Q$  – кількість теплоти, а  $\omega(T)$  – рівноважна при температурі  $T$  масова частка вимороженої в елементі  $\Delta V$  води, тобто льоду по відношенню до початкового вологовмісту  $W_{in}$ .

Якщо одержаний для  $I(\vec{r}, \tau)$  вираз підставити в рівняння (1), то одержимо вже однорідне диференціальне рівняння теплопровідності, в якому фігуруватиме ефективне значення питомої теплоємності  $C_e(T)$

$$\left\{ C(T) - L(T) \cdot \rho(T) \cdot W_{in} \cdot \frac{d\omega(T)}{dT} \right\} \cdot \rho(T) \frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T(\vec{r}, \tau)]$$

$$C_e(T) = C(T) - L(T) \cdot \rho(T) \cdot W_{in} \cdot \frac{d\omega(T)}{dT}. \quad (2)$$

Питома теплоємність  $C_e(T)$  саме враховує вплив на теплоємність сировини фазового перетворення вода – лід чи лід – вода, який визначається змінами масової частки вимороженої води (льоду) зі зміною температури (похідна  $\frac{d\omega(T)}{dT}$ ). Слід тут також відмітити, що так звана «істинна теплоємність  $C(T)$ » експериментально, на відміну від  $C_e(T)$ , не вимірюється.

З іншого боку, для оцінки значень «істинної теплоємності»  $C(T)$  можуть бути застосовані різні розрахункові співвідношення, якщо відомим є компонентний склад об'єкту досліджень та теплоємність відповідних компонент. Якщо, наприклад, виходити з того, що харчова плодоовочева сировина складається (для діапазону температур від мінус 40°C до 40°C) з «сухої» частини, води та льоду, то з прийнятною похибкою  $C(T)$  може бути розрахована за адитивною формулою (за питомими об'ємами, масовими частками компонент  $W_i$ ) [3,11,16].

$$C(T) = C_{сух}(T)W_{сух} + C_B(T)W_B + C_L(T)W_L. \quad (3)$$

У формулі (3)  $C_{сyx}(T)$ ,  $C_B(T)$ ,  $C_L(T)$  означають температурні залежності теплоємностей відповідно «сухої» частини, води та льоду, а величини  $W_{сyx}$ ,  $W_B$ ,  $W_L$  - відповідні значення їх масових часток, які також залежать від температури через залежність від температури рівноважної частки вимороженої води  $\omega(T)$ .

$$W_{сyx} = 1 - W_{in}, \quad W_B = W_{in} (1 - \omega(T)), \quad W_L = W_{in} \omega(T). \quad (4)$$

*Постановка завдання.* Для усіх видів харчової сировини, що досліджуються у даній роботі, загальними мають бути визначення теплофізичних властивостей води та льоду, відрізняються вони значеннями та залежностями для  $C_{сyx}(T)$  і  $\omega(T)$ . Величину  $\omega(T)$  визначають експериментальним шляхом [5,6,15,16] безпосередньо вимірюючи  $\omega(T)$  або  $(1 - \omega(T))$  - масову частку «рухомої» води, наприклад, методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Розраховують  $\omega(T)$  також шляхом обробки експериментальних калориметричних даних [13,14,15,16] для об'єкту досліджень.

Недавно [14,16] розроблено методику прямого розрахунку  $C_{сyx}(T)$ , якщо відомий конкретний склад «сухої» частини об'єкту досліджень – плодоовочевої сировини. Таким чином, якщо скористатись даними із [16] з температурних залежностей питомих теплоємностей компонент «сухої» частини плодів, ягід, овочів, то виникає незалежна можливість розраховувати  $C_{сyx}(T)$  для усіх об'єктів досліджень даної роботи.

У роботі [16] температурна залежність питомої теплоємності компонент «сухої» частини об'єктів досліджень даної роботи представлена поліномами другого порядку за температурою  $t$  (у градусах Цельсія) коефіцієнти яких наведені в таблиці 1.

$$C_i(T) = a_i + b_i t + c_i t^2, \quad t = T - 273.15, \quad [C] = \text{Дж}/(\text{кгK}). \quad (5)$$

Сумарна питома теплоємність «сухої» частини може представлятись за адитивною формулою як  $C_{сyx}(T) = \sum_{i=1}^5 C_i(T)$ .

Температурні залежності теплоємності льоду та води (в тому числі і у її переохоложеному стані) можна знайти знову ж у [16]. Теплота фазового перетворення  $L(T)$  у всьому температурному діапазоні виражається через питомі теплоємності води  $C_B(T)$  та льоду  $C_L(T)$  як

$$L(T) = 333,6 \cdot 10^3 - \int_T^{273,15} C_B(x) \cdot dx + \int_T^{273,15} C_L(x) \cdot dx. \quad (6)$$

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів формули (5)

№ п/п	Назва речовини	$a$	$b$	$c$
-------	----------------	-----	-----	-----

1	Протеїн	2008,2	1,2089	$-1,3129 \cdot 10^{-3}$
2	Жир	1984,2	1,4733	$-4,8008 \cdot 10^{-3}$
3	Карбогідрат	1548,8	1,9625	$-5,9399 \cdot 10^{-3}$
4	Клітковина	1845,9	1,8306	$-4,6509 \cdot 10^{-3}$
5	Зола	1092,6	1,8896	$-3,6817 \cdot 10^{-3}$

На базі температурної залежності для ефективної теплоємності (2) інтегруванням можливо одержати температурну залежність для ентальпії  $I(T)$  плодоовочевої сировини. Наприклад, якщо для ентальпії за „нуль“ її відрахунку взяти температуру 233,15 К (мінус 40 °С), то

$$I(T) = \int_{233,15}^T C_B(x) \cdot dx. \quad (7)$$

При цьому, для більш простого інтегрування  $C(T)$  за формулами (2, 3) необхідно (щоб уникнути інтегрування можливої складної залежності від температури добутку  $\omega(T)$  на  $L(T)$ ) її складові послідовно представити як

$$C(T) = C_{\text{сyx}}(T)(1 - W_{\text{in}}) + C_B(T) W_{\text{in}} (1 - \omega(T)) + C_L(T) W_{\text{in}} \omega(T) \quad \text{та}$$

$$C_B(T) = C_{\text{сyx}}(T) \cdot (1 - W_{\text{in}}) + C_L(T) \cdot W_{\text{in}} + \frac{d}{dT} \{W_{\text{in}} \cdot (1 - \omega(T)) \cdot L(T)\}. \quad (8)$$

Таким чином, для повного і послідовного розрахунку значень ефективної теплоємності та ентальпії за формулами (2, 3, 5, 6, 7, 8) залишається отримати співвідношення для розрахунку масової частки вимороженої води  $\omega(T)$  та її першої похідної за температурою.

На рис. 1 представлені залежності масової частки вимороженої води від температури для деяких видів плодоовочевої сировини, побудовані за експериментальними даними різних авторів.

Дані з частки вимороженої води при різних температурах одержують з експериментальних вимірювань калоричних (ентальпії, теплоємності) властивостей досліджуваних об'єктів шляхом розрахунку вкладу, викликаного фазовим перетворенням вода – лід. Майже пряме вимірювання  $\omega(T)$  здійснюється методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР) шляхом інтегрування відгуку протонів рухомих молекул води (рідинної фази води) на магнітне поле.

У процесі розморожування (нагрівання попередньо замороженого об'єкту) перегрів льодяної фази води не спостерігається, тому в такому процесі можна більш точно визначити  $T_{\text{кр}}$  та точки на кривій  $\omega(T)$  у її околі.

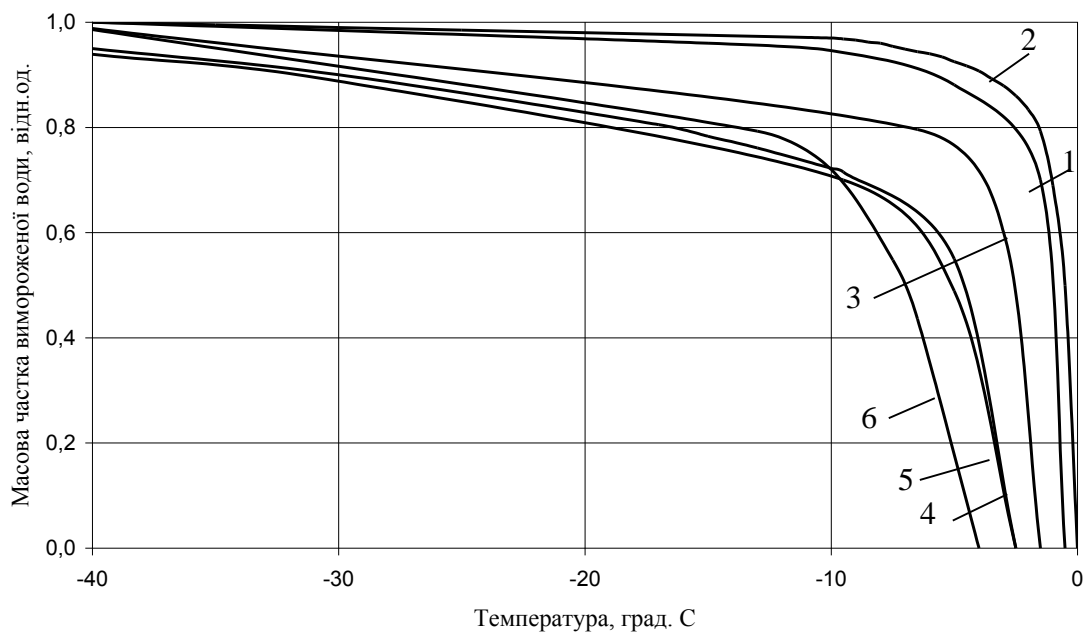


Рис. 1. Залежності масової частки вимороженої води від температури для плодовоовочевої сировини:

- 1 – огірки,  $T_{кр} = - 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; 2 – шпинат,  $T_{кр} = - 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 3 – морква,  $T_{кр} = - 1.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; 4 – ягоди вишні,  $T_{кр} = - 2.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 5 – виноград "Молдова", нижня ягода в гронах,  $T_{кр} = - 2.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
 6 – виноград "Молдова", верхня ягода в гронах,  $T_{кр} = - 3.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Теоретичні основи формування  $\omega(T)$  базуються на аксіомі Рауля. Аксіома Рауля визначає зміщення значення температури  $T_{кр}$  початку кристалізації (формування значень кріоскопічної різниці температур) води у водних розчинах. За цією аксіомою кріоскопічна різниця температур пропорційна (для слабких розчинів) концентрації розчину. По мірі вимерзання води в сировині концентрація розчинених речовин зростає і температура вимерзання наступних порцій води знижується. Ця закономірність якісно підтверджується для багатьох видів харчової сировини, відображається випуклою кривою залежності масової частки вимороженої води від температури типу кривих на рис. 1. Плодовоовочева сировина демонструє, в основному, значення  $T_{кр}$  на рівні мінус  $2,0 \div 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , при цьому навіть для одного виду сировини ці значення змінюються у залежності від умов вирощування, клімату тощо. Наприклад, такі види як ягоди вишні, винограду, морква можуть мати  $T_{кр}$  до мінус  $5 \dots 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Останнє стає суттєвою перепорою до стандартизації теплофізичних властивостей такої сировини в області від'ємних температур. Пояснення цих закономірностей полягає, перш за все, в тому, що плодовоовочева сировина представляє собою багатокомпонентний „розчин“, у якому, в залежності від умов вирощування, змінюється відносна концентрація розчинених компонент.

Якщо виходити з аксіоми Рауля, то уявленням про енергію зв'язку  $E(T)$  води з розчиненими і нерозчиненими у сировині речовинами (вільна, слабо зв'язана, сильно зв'язана вода) можна надати кількісну інтерпретацію [6]

(безперервний спектр енергій зв'язку через відповідну температуру вимерзання  $T$ ).

Таким чином, енергію зв'язку можна виразити як

$$E(T) = L(T) \cdot \left\{ 1 - \frac{T(\omega) - 273,15}{273,15} \right\}. \quad (9)$$

Функція  $T(\omega)$  в (9) є функцією, оберненою до  $\omega(T)$ . З (9) очевидно, що коли змінюється відносна концентрація розчинених компонент в одному і тому ж виді сировини, то змінюються і функції  $E(T)$  та  $\omega(T)$ . Прикладом такого перерозподілу є представлені на рисунку 1 криві для ягід винограду, відібраних з нижньої та верхньої частин грон – для них зміщені не тільки значення  $T_{кр}$ , але має місце перетин кривих 5 та 6. В цілому ж більш вираженою (криві 1, 2, 3, 4 на рисунку 1) закономірністю є зміщення кривих  $\omega(T)$  зі зміщенням значень  $T_{кр}$ .

Оскільки для досліджуваних у даній роботі видів плодоовочевої сировини немає літературних даних за  $\omega(T)$ , можна використати криві 1, 2, 3, 4 на рис. 1 для інтерполяційного одержання необхідних залежностей  $\omega(T)$  та їх похідних за заданими значеннями  $T_{кр}$ . З цією метою дані [16] для вишні, моркви та огірків були апроксимовані дрібнораціональною залежністю, коефіцієнти якої наведені в таблиці 2. Детермінант апроксимації даних за формулою (10) складає від 0,985 до 0,996.

$$\omega(T) = \frac{a + cT}{1 + bT}. \quad (10)$$

Таблиця 2 - Значення коефіцієнтів формули (10)

Назва сировини, значення $T_{кр}$	$a$	$b$	$c$
Вишня, мінус 2,0 °С	1,025225025	- 0,0036369368	- 0,0037813126
Морква, мінус 1,4 °С	1,018415538	- 0,0036619208	- 0,0037476056
Огірки, мінус 0,5 °С	0,991138538	- 0,0036633242	- 0,0036351885

Густина плодоовочевої сировини має бути віднесена до теплофізичних характеристик на відміну від теплофізичних властивостей в тому сенсі, що об'єкти досліджень даної роботи (гарбуз, кабачок, солодкий перець, виноград, баклажан, кукурудза молочно-воскової стиглості) мають суттєво неоднорідну (гетерогенну) структуру та характеризуються високою пористістю – наявністю нерозчинених атмосферних газів та розчинених в розчині газів, що виділяються з розчину в процесі кристалізації води при температурах нижчих за  $T_{кр}$ .

Як відомо, загальних рецептів для розрахунку густини неоднорідних структур, починаючи з сумішей вода – пісок чи двофазних течій рідина – газ, не існує і не може бути. Тому єдина розрахункова формула для густини  $\rho$  - адитивний підсумок питомих об'ємів ( $1/\rho$ ) компонент об'єкту досліджень - рідинної, в тому числі і переохолодженої, води, льоду, „сухої“ частини, атмосферних газів [8]

$$\frac{1}{\rho} = \frac{W_{\text{сух}}}{\rho_{\text{сух}}} + \frac{W_B}{\rho_B} + \frac{W_L}{\rho_L} + \frac{W_g}{\rho_g}. \quad (11)$$

Ефективність формул типу (11) є достатньо високою, коли вклади в її правій частині одного порядку, чого немає у нашому випадку за рахунок суттєво малих значень густини  $\rho_g$  такого компоненту як газ. Дещо нівелюється цей недолік достатньо малими значеннями масової частки  $W_g$  атмосферних газів у плодоовочевій сировині, яка, в нашому випадку, розраховується за емпіричною формулою [11]

$$W_g = W_g^0 + 37,0 \cdot 10^{-6} \cdot \omega(T). \quad (12)$$

Величина  $W_g^0$  дорівнює масовій частці газів, що знаходяться в порах продукту,  $37,0 \cdot 10^{-6}$  – максимальна розчинність атмосферних газів у воді при температурі ( $T_{\text{кр}} + 0$ ). Пропорційність кількості газів, що виділяються при заморожуванні, значенню  $\omega(T)$  – чисто емпірична закономірність. Як і у випадку з теплоємністю, густини  $\rho_B$  води та  $\rho_L$  льоду в залежності від температури можуть бути залучені з [16] та ряду новітніх робіт.

Відносно температурної залежності густини  $\rho_{\text{сух}}(T)$  „сухої“ частини плодоовочевої сировини, то вона може бути виділена з експериментальних даних для сировини в цілому, або розрахована знову ж таки за адитивною формулою (за питомими об'ємами) через густини та концентрації компонент „сухої“ частини.

При цьому густина  $\rho_i(T)$   $i$  – тої компоненти розраховується у залежності від температури за лінійною формулою [16], коефіцієнти якої наведено в таблиці 3.

$$\rho_i(T) = a_i + b_i t, \quad t = T - 273,15, \quad [\rho] = \text{кг/м}^3. \quad (13)$$

Таблиця 3 - Значення коефіцієнтів формули (13)

№ п/п	Назва речовини	$a$	$b$
1	Протеїн	1329,9	- 0,51840
2	Жир	925,59	- 0,41757
3	Карбогідрат	1599,1	- 0,31046
4	Клітковина	1311,5	- 0,36589

5	Зола	2423,8	- 0,28063
---	------	--------	-----------

Теплопровідність харчової сировини, як і її густина, також не може визначатись як класична фізична величина за причини неоднорідності структури сировини. Найбільш простою формулою для прогнозування  $\lambda(T)$  є знову ж адитивна (за питомими об'ємами) через знання температурних залежностей теплопровідностей  $\lambda_i(T)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  компонент

$$\frac{\lambda(T)}{\rho(T)} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i(T) \cdot W_i}{\rho_i(T)}. \quad (14)$$

Але тут, як і в разі формули (11), знову ж виникає компонент – нерозчинені атмосферні гази, теплопровідність та густина яких є суттєво малими, що приводить до великих значень похибок прогнозування за (14). У цьому плані (14) можна залучити для розрахунку провідності теплоти через „суху“ компоненту харчової сировини і використати дані [16] для температурних залежностей теплопровідностей  $\lambda_i(T)$ ,  $i=1, 2, 3, \dots$  компонент у поліноміальному виді

$$\lambda_i(T) = a_i + b_i t + c_i t^2, \quad t = T - 273,15, \quad [\lambda] = \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}). \quad (15)$$

Коефіцієнти цих поліномів представлені в таблиці 4.

Таблиця 4 - Значення коефіцієнтів формули (15)

№ п/п	Назва речовини	$a \cdot 10^1$	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^6$
1	Протеїн	1,7881	1.1958	- 2,7178
2	Жир	1,8071	- 2.7604	- 1,7749
3	Карбогідрат	2,0141	1,3874	- 4,3312
4	Клітковина	1,8331	1,2497	- 3,1683
5	Зола	3,2962	1,4011	- 2,9069

Надалі теплопровідність плодоовочевої сировини в цілому не може бути розрахована за (14) за причини „непрацездатності“ цієї моделі, чи за неврахуванням структури об'єкту досліджень, як, наприклад, наявність капілярних утворень, вздовж яких, можливо, переноситься теплота за механізмом теплової труби (випаровування - транспорт пари - конденсація). У цілому харчову сировину часто класифікують як капілярно-пористе колоїдне тіло, що має суттєво гетерогенну структуру. Саме в такому розумінні необхідно побудувати методику розрахунку  $\lambda(T)$  не звертаючи увагу,



наприклад, на те, що теплопровідність вздовж структурних волокон сировини суттєво відрізняється від теплопровідності поперек волокон.

Основою такої побудови нами вибрано теорію узагальненої провідності у викладенні різних авторів, зокрема проф. Дульнева Г.Н.

Побудова розрахункових формул проводиться у рамках сполучення методів теорії протікання теплоти та елементарної комірки. Елементарні комірки виділяються за допомогою адіабатичних та ізотермічних перерізів, що утворюють ізопотенціальні поверхні, або поверхні, непроникні для ліній течій. З іншого боку, харчову сировину можна розглядати як суміш ізольованих компонент, теплопровідність, густина яких заздалегідь відома. При цьому ці ізольовані компоненти взаємопроникають одна в одну, мають кубічну, паралелепіпедну, тощо, форми. Різні методи усереднення властивостей компонент в об'ємі елементарної комірки призводять до різних моделей розрахунку цих властивостей.

П'ять різних таких моделей розрахунку теплопровідності було нами детально розглянуто, при цьому харчова сировина розглядалась як гетерогенна ізотропна система з ізольованими та взаємопроникаючими компонентами. Загальне число компонентів у ній дорівнює чотирьом – суха частина, вода, лід, атмосферне повітря. Водяна пара, її можливе транспортування за капілярами та наступна конденсація не враховувались відповідно з даними розрахунків в [11]. Найбільш вірогідним поясненням такого результату є відносно великі значення вологовмісту об'єктів наших досліджень, заповненість капілярних каналів рідиною. Аналогічне розрахункове моделювання механізму переносу теплоти за рахунок фільтрації рідини через капілярні канали також привело до негативного результату – відповідний внесок в загальну теплопровідність складає величину на рівні похибок експериментальних даних. Тому в подальших розрахунках харчова сировина та продукти (в рамках тільки задач холодильної технології) розглядались як гетерогенні ізотропні системи з ізольованими та взаємопроникаючими компонентами, загальною кількістю чотири компоненти – суха частина, вода, лід, атмосферне повітря.

Найбільш прийнятні результати в рамках їх співставлення з експериментальними даними для плодоовочевої сировини продемонструвала так звана модель комбінованого перерізу елементарних комірок [11]. При цьому теплопровідність води та льоду в діапазоні температур від мінус 40 °С до 40 °С розраховувалась за модифікованими нами співвідношеннями [16], а теплопровідність повітря (на ізобарі 1 атм у залежності від температури) за наступною формулою [7]

$$\lambda_T(T) = 1,2 \cdot 10^{-3} + 8,08 \cdot 10^{-5} T + 3,21 \cdot 10^{-8} T^2 - 9,42 \cdot 10^{-11} T^3 + 4,68 \cdot 10^{-14} T^4. \quad (16)$$

Залишковий алгоритм розрахунку значень перколяції теплоти в плодоовочевій сировині через значення теплопровідностей компонент (при заданій температурі) виглядає так:

1) розраховуються ефективні теплопровідності (перколяції теплоти)  $L_i$ ,  $i=1,2,3,4$  середовищ, що в об'єкті охоплюють кожну  $i$ -ту компоненту (модель переносу теплоти в шаровому середовищі з компонентами, що паралельні потокові теплоти) за формулою

$$L_i = \sum_{j \neq i} \lambda_j V_j, \quad (17)$$

де  $V_j$  – об'ємні концентрації компонент (крім  $i$ -тої), перенормовані до одиниці;

2) розраховуються ефективні теплопровідності  $K_i$  бінарних підсистем, що складаються з  $i$ -тої компоненти ( $\lambda_i, V_i$ ) та компоненти ( $L_i, m=1-V_i$ ) за формулою

$$K_i = L_i \left[ 1 - \frac{m}{(1-v)^{-1} - (1-m)(1-m^{1/3})(1+m^{1/3})^{-1}} \right], \quad (18)$$

де  $v = \lambda_i / L_i$ ;

3) ефективна теплопровідність (перколяція теплоти) всієї системи (плодоовочевої сировини) розраховується як

$$\lambda(T) = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{K_i - L_i}{\lambda_i - L_i}. \quad (19)$$

У рамках наведених вище положень, допущень та розрахункових формул нами розроблені розрахункові процедури на алгоритмічній мові Turbo Pascal, які при заданих вхідних даних щодо вологовмісту  $W_{in}$ , температури початку кристалізації води  $T_{kp}$ , масової концентрації атмосферних газів, протеїну, жиру, вуглеводнів, клітковини та золи розраховують значення густини, питомої ефективної теплоємності, питомої ентальпії, ефективної теплопровідності (перколяції теплоти), масової частки вимороженої води при кожній заданій температурі плодовоовочевого об'єкту в діапазоні від мінус 40 °С до 40 °С. Ці процедури дозволяють проводити розрахунки для всіх досліджуваних плодів та овочів на єдиній інформаційній основі щодо властивостей компонент.

Початковою для розрахунків виступає процедура

**PROCEDURE TPHYS (J: integer; TK: extended; Var Cp, RSu, LD: extended) ,**

у якій  $j$  – вихідне значення номеру речовини, теплофізичні властивості якої мають бути розраховані,  $TK$  – вихідне значення температури в градусах Кельвіна,  $Cp$  (Дж/кгК),  $RSu$  (кг/м<sup>3</sup>),  $LD$  (Вт/мК) – відповідно розраховані значення питомої ефективної теплоємності, фізичної густини та коефіцієнту теплопровідності. Відповідно, процедура

**PROCEDURE ENTHALPY (TK, TCR:extended;**

**Var**

**IOCR, ICrM, IOT, ITM, IOM, W0M, WTM, WCrM, WCrT:extended) ;**

для заданих значень температури ТК і температури початку кристалізації води  $T_{кр}$  розраховує значення внесків (інтеграли) в ентальпію плодоовочевого об'єкту від льоду та води. При цьому IOCR, ICrM, IOT, ITM, IOM відповідно інтеграли від температурної залежності питомої теплоємності льоду за температурою у межах від температури „нуля“ підрахунку  $T_0=233,15$  К до  $T_{кр}$ , від  $T_{кр}$  до температури плавлення льоду  $T_M=0^\circ\text{C}$ , від  $T_0$  до змінної температури плодоовочевого об'єкту ТК, від змінної температури ТК до  $T_M$ , від  $T_0$  до  $T_M$ .

Розраховані значення **W0M, WTM, WCrM, WCrT** мають аналогічний сенс як інтеграли від температурної залежності для питомої теплоємності рідинної води, в тому числі і в переохолодженому стані.

Нарешті, процедура

**PROCEDURE ENTALbio (J:integer;Tk:extended;VAR IT:extended) ;**

розраховує внесок (при змінній температурі  $T_k$ ) в ентальпію плодоовочевого об'єкту від  $j$  – того компонента „сухої“ частини - протеїну, жиру, вуглеводню, клітковини, золи. Цей внесок, на відміну від попередніх, один, оскільки ці компоненти не терплять фазового перетворення у досліджуваному діапазоні температур.

Вхідний масив  $K_{in}$  індивідуальних характеристик (хімічний склад,  $T_{кр}$ ) несе в розрахункову процедуру.

**PROCEDURE WATEROUT (Kin:ED;T:extended;VAR WT,DWT:extended) ;**

значення температури початку кристалізації води  $T_{кр}$  та поточне значення температури  $T$  сировини. Розраховуються відповідні температурі  $T$  значення рівноважної частки вимороженої води  $WT$  та її похідної за температурою  $DWT$ .

Кінцевою процедурою розрахунку всього комплексу теплофізичних характеристик плодоовочевого об'єкту в цілому є процедура

**PROCEDURE XYZPROP (T:extended;Kcoef,Coef:ed;var RPH,CE,IPT,L,W,DW:extended.**

Тут вхідними виступають поточне значення температури  $T$  сировини та масиви **Kcoef,Coef** індивідуальних її характеристик (хімічний склад,  $T_{кр}$ , пористість). У подальшому, при апробації даної методики розрахунків виникне необхідність аналізу теплофізичних характеристик сировини з різним вологовмістом  $W_{in}$  і, відповідно, різним складом (за масовими концентраціями в сумі  $(1 - W_{in})$ ) „сухої“ її частини. Тому при змінних значеннях  $W_{in}$  відповідні значення масових концентрацій компонент „сухої“ частини перераховуються у масивах **Kcoef,Coef** пропорційно  $(1 - W_{in})$ .

Вихідними величинами процедури **XYZPROP** є значення **RPH** фізичної густини ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), питомої ефективної теплоємності **CE** ( $\text{Дж}/\text{кгК}$ ), питомої ентальпії **IPH** ( $\text{Дж}/\text{кг}$ ), ефективної теплопровідності (перколяції теплоти,

Вт/мК), масової частки вимороженої води  $W$  та її похідної  $DW$  ( $K^{-1}$ ) за температурою. Результати апробації розробленої методики розрахунку температурних залежностей теплофізичних характеристик вибраних в даній роботі плодів та овочів представлені нижче.

#### Література:

1. Антонов А.А. Совершенствование производства быстрозамороженных продуктов с использованием низкотемпературных просистем хладоснабжения: дисс. ... доктора техн. наук: 05.18.04 / А.А. Антонов. – М., 2003. – 350 с.
2. Венгер К.П. Научные основы создания техники быстрого замораживания пищевых продуктов : автореф. дисс. на соискание науч. степени доктора техн. наук : 05.18.12 „Процессы и аппараты пищевых производств” / К. П. Венгер. – М., 1992. – 44 с.
3. Гинзбург А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Колос, 1984. – 304 с.
4. Латышев В. П. Выделение воздуха при замораживании воды, водных растворов сахарозы и сухого молочного продукта / В. П. Латышев, Н. А. Цирульникова // Холодильная техника. - 1986. - № 7. - С. 39-41.
5. Платунов Е.С. Определение теплофизических характеристик пищевых продуктов в области кристаллизации связанной влаги / Е.С. Платунов, И. В. Баранов, С. С. Прошкин, В. А. Самолетов // Вестник Междунар. Академии Холода. – 1999. - № 1. – С.41-44.
6. Рютов Д.Г. Влияние связанной воды на образование льда в пищевых продуктах при их замораживании / Д.Г. Рютов // Холодильная техника. – 2001. – №5. – С. 32–37.
7. Создание систем технологического контроля процессов холодильной обработки и хранения мяса: Обзорная информация / И. Г. Чумак, В. П. Онищенко, Ю. А. Желиба, С. Е. Головский. - М.: АгроНИИТЭИММП, 1992. - 24 с.-(Холодильная промышленность).
8. Фикиин А. Хладилни технологични процеси и съоружения / А.Фикиин. – София: Техника, 1980. – 511 с.
9. Фролов С.В. Тепло-массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов / С. В. Фролов, В. Е. Куцакова, В. Л. Кипнис. – М. : Колос-Пресс, 2001. – 143 с.
10. Холодильная техника и технология : [учебник] / под ред. А. В. Руцкого. – М. : ИНФРА – М, 2000. – 286 с.
11. Холодильные установки. Проектирование : учебное пособие / [И.Г. Чумак, А.Ю. Лагутин, В.П. Чепурненко, С.Ю. Ларьяновский, Н.И. Чумак, В.П. Кочетов, В.П. Онищенко] ; под ред. докт. тех. н., проф. И.Г. Чумака. – [3–е изд.], перераб. и доп.- Одесса: Друк, 2007.- 480 с.
12. Debenedetti P.G. Supercooled and glassy Water / P. G. Debenedetti // J. Phys.: Condens. Matter ,2003. – Vol. 15. – P. R1669-R1726.
13. Frolov S. V. Freezing time for foodstuffs / S. V. Frolov, V. E. Koutsakova, O. B. Tsvetkov // Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold

Chain, IIR Proceedings Series «Refrigeration Science and Technology», Sofia, 1998. – P. 271-275.

14. Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, edited by Da-Wen Sun.–Taylor&Francis. – Published by CRC Press, 2006. – 737 s.

15. *Holdmen D.* Predicting the relationship between unfrozen water fraction and temperature during food freezing using freezing point depression / D. Holdmen // Trans. ASAE. – 1974. – Vol. 17, № 1. – P. 63–64.

16. 2002 ASHRAE Refrigeration Handbook (Si). 2002 Fundamentals./ Chapter 8. Thermal Properties of Foods, P. 8.1-8.30. / Chapter 9. Cooling and Freezing Times of Foods, P. 9.1-9.15. – Atlanta : ASHRAE, 2002.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЕ**

Ялпачик В.Ф.

**Аннотация - работа посвящена методике моделирования и расчетов теплофизических свойств пищевого сырья растительного происхождения.**

## **SIMULATION AND CALCULATION TEPLOFYZYCHESKYH PROPERTIES PYSHEVOHO RAW MATERIALS RASTYTELNOHO ORIGIN**

V. Yalpachik

### *Summary*

**This work is devoted to the method of simulation and calculation of thermophysical properties of food raw materials of plant origin.**