

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПЛОДОВООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

Ялпачик В.Ф., д-р техн. наук, проф.
Таврійський державний агротехнологічний університет

Для визначення теплових навантажень під час охолодження і заморожування сировини в діапазоні температур від $+40^{\circ}\text{C}$ до -40°C було проведено математичне моделювання процесів заморожування об'єктів плодовоовочевої сировини в промислових умовах.

Одним з аспектів математичного моделювання процесів формування температурних полів у тілах неправильної геометричної форми є те, що самого рівняння теплопровідності недостатньо для досягнення цілей моделювання. Специфіку процесу визначає динаміка теплообміну на поверхні цього об'єкта.

У цьому випадку диференціальне рівняння теплопровідності записується як одномірне і нестационарне з граничними умовами третього роду, яке містить усереднені по поверхні теплообміну значення коефіцієнтів тепловіддачі.

Для аналізу процесів із тілами неправильної геометричної форми необхідно вводити так званий коефіцієнт геометричної форми Γ . Такий коефіцієнт фігурує сьогодні в багатьох гідродинамічних і теплових розрахункових співвідношеннях.

Ця ідея не є новою, хоча і не знайшла широкого застосування в холодильній технології через складність чисельних рішень. Вона розглядалась у теоретичних роботах Михайлова і Фікіна, а в задачах холодильної технології харчових продуктів отримала застосування і розвиток у працях проф. В.П. Онищенко.

Для вирішення завдань цієї роботи коефіцієнт геометричної форми Γ записується таким чином:

$$\frac{1}{x^{\Gamma}} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) x^{\Gamma} \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{1}{\Phi} - 1; \quad \Phi = \frac{V}{RS}, \quad (2)$$

де V , R , S – відповідно об'єм, характерний розмір, площа поверхні.

При цьому показник Γ приймає значення від 0 до 2 відповідно для таких тіл правильної геометричної форми, як нескінченна пластина, нескінченний циліндр, куля, і пов'язаний представленими

співвідношеннями з характерним розміром R , поверхнею S і об'ємом V досліджуваних об'єктів.

$$\begin{cases} C_e(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{x^r} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T)x^r \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right]; & x \in [R_1, R_2], \quad \tau > 0, \\ T(x,0) = f(x), \\ \lambda[T(R_1,\tau)]\frac{\partial T(R_1,\tau)}{\partial x} + \alpha_1(\tau)[T_{c1}(\tau) - T(R_1,\tau)]\frac{F_1}{F_2} = 0, \\ -\lambda[T(R_2,\tau)]\frac{\partial T(R_2,\tau)}{\partial x} + \alpha_2(\tau)[T_{c2}(\tau) - T(R_2,\tau)] = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де $T(x, \tau)$ – температурне нестационарне та одномірне поле;
 $C_e(T)$ – ефективна питома теплоємність продукту;
 $\rho(T)$ – густина продукту;
 $\lambda(T)$ – ефективна теплопровідність (перколяція теплоти) продукту;
 R_1, R_2 – координати, характерні розміри відповідно до внутрішньої та зовнішньої поверхні теплообміну з величинами поверхонь F_1, F_2 ;
 $\alpha_1(\tau), \alpha_2(\tau)$ – змінні в часі коефіцієнти тепловіддачі відповідно з внутрішньої та зовнішньої поверхні теплообміну;

$T_{c1}(\tau), T_{c2}(\tau)$ – температури охолоджувального середовища, що омиває відповідно внутрішню та зовнішню поверхні.

Теплофізичні властивості плодоовочевої сировини значною мірою залежать від температури. Крайова задача теплопровідності для отримання температурних полів об'єктів заморожування має бути нелінійною, щоб урахувати теплові ефекти, що виникають під час перебігу фазових перетворень вода – крига. Саме цей ефект визначає «непрацездатність» лінійних задач, навіть якщо останню розбивають на зони, у межах яких теплофізичні властивості слабо залежать від температури. Причина «непрацездатності» полягає в тому, що лінійні задачі теплопровідності мають завжди як рішення температурні профілі з постійним знаком кривизни.

Важливий аспект необхідної математичної моделі впливає з її призначення: не тільки розрахунковим шляхом проектувати доцільні режими заморожування конкретної харчової продукції, оцінювати енерго- і ресурсозберігальні можливості, підбирати технічні засоби для здійснення обраних технологічних режимів заморожування, а й проводити автоматичний контроль процесів заморожування з метою мінімізації втрат маси сировини, значень показників харчової цінності, витрат енергії.