

ТРИВАЛІСТЬ ЗАМОРОЖУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.О. Потапов, Д.П. Семенюк

Отримані формули для інженерних розрахунків тривалості охолодження та заморожування харчової сировини з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик.

В основу розрахунків покладено інтегральне рівняння збереження та перенесення енергії в процесах із фазовими переходами й хімічними реакціями.

***Ключові слова:** охолодження, заморожування, теплопровідність, теплоємність.*

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.А. Потапов, Д.П. Семенюк

Получены формулы для инженерных расчетов длительности охлаждения и замораживания пищевого сырья с учетом температурной зависимости теплофизических характеристик.

В основание расчетов положено интегральное уравнение сохранения и переноса энергии в процессах с фазовыми переходами и химическими реакциями.

***Ключевые слова:** охлаждение, замораживание, теплопроводность, теплоемкость.*

DURATION OF FREEZING OF RAW FOOD MATERIALS WITH RESPECT TO THERMAL CHARACTERISTICS

V. Potapov, D. Semeniuk

The basis of the problem in question is the integral equation of conservation and transfer of energy in processes with phase transitions and chemical reactions. Solution of the equation is obtained in the approximation of constant body density and temperature dependency for specific heat coefficient and thermal conductivity coefficient.

The solution for the equation is obtained. It lies in duration of the process which is composed of cooling process duration and freezing process duration.

The obtained formulae are suitable for engineering calculations of durations of cooling and freezing of food products with respect to thermal characteristics.

***Keywords:** cooling, freezing, thermal conductivity, heat capacity.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Рівень розробок під час моделювання процесів заморожування є нижчим, ніж для процесів охолодження, що пов'язано зі складністю фізичних процесів, які супроводжують це явище. Кожний із запропонованих у літературі методів обчислення тривалості заморожування специфічно пов'язаний із початковою фізичною схемою процесу, його початковими та граничними умовами, а в вирішенні звичайно вводяться допущення, які його спрощують. Найчастіше таке завдання називають завданням про теплопровідність у системах із рухомою межею поділу, яка полягає в уявленні про переміщення межі поділу між твердою і рідкою фазами від периферії в глиб тіла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще в минулому столітті були запропоновані відповідні вирішення цього завдання, одержані Г. Ляме і Б. Клапейроном, Д. Нейманом, а потім Г. Стефаном. У холодильній технології найчастіше користуються вирішенням завдання про заморожування, розробленим Р. Планком у 1913 р. й істотно розвиненим ним та іншими дослідниками в подальші роки [1–3]. Формула Планка як фундаментальна включена в рекомендації Міжнародного інституту холоду, але добре відомо, що на практиці всі допущення, які входять у формулу Планка, не виконуються.

Професором В.П. Оніщенко показано, що модернізацію формул указанного типу слід вважати недоцільною, і альтернативою є моделювання процесу заморожування в рамках краєвої задачі теплопровідності [4]. При цьому слід відмовитися від використання відомої граничної умови Г. Стефана, яка підтверджувала наявність джерела теплоти на рухомій межі контакту охолодженого й замороженого шару продукту, тому що реально такої межі під час заморожування продуктів не існує. Не існує й експериментальних значень дійсної теплоємності продуктів, у якій би не враховувалася теплота фазового переходу.

У той же час такий метод розв'язання краєвої нелінійної задачі теплопровідності [4] з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик (ТФХ) харчової сировини потребує використання спеціальних комп'ютерних програм, що для інженерних розрахунків, безумовно, не є доцільним.

Мета статті. Метою даної роботи є отримання інженерної формули розрахунку тривалості заморожування, яка б ураховувала температурну залежність теплофізичних властивостей харчової сировини.

Об'єктом дослідження є харчовий продукт у процесі охолодження й заморожування від початкової температури до температури холодильного зберігання.

В основу розрахунків покладено інтегральне рівняння збереження та перенесення енергії в процесах із фазовими переходами й хімічними реакціями:

$$\int_V \frac{\partial(c\rho T)}{\partial\tau} dV + \oint_S j dS = \int_V \frac{\partial(L\rho)}{\partial\tau} dV + \int_V \frac{\partial(q\rho)}{\partial\tau} dV, \quad (1)$$

де j – щільність теплового потоку; z – питома теплоємність; ρ – густина тіла; T – абсолютна температура; L – питома теплота фазових переходів; q – питома теплота фізико-хімічних і біохімічних реакцій; τ – поточний час, V – об'єм тіла; S – площа поверхні тіла.

Розв'язок рівняння (1) одержаний у квазіодновимірному наближенні за постійної щільності тіла й температурної залежності для коефіцієнта питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Подамо рівняння (1) у такому вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial\tau} \left[\int_V \rho(C_e T) dV \right] = \oint_S j dS, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad C_e = \frac{dH_e}{dT} = \frac{d}{dT} (T + q + L),$$

де H_e – ефективна ентальпія продукту, C_e – ефективна питома теплоємність продукту, яка враховує всі теплові ефекти, включаючи фазові переходи й теплоту фізико-хімічних і біохімічних реакцій.

Якщо допустити, що щільність продукту не змінюється в процесі заморожування, що практично має місце, то після усереднення всіх величин за об'ємом і поверхнею тіла одержуємо:

$$R_V \rho \frac{d}{d\tau} (C_e T) = j_s, \quad (3)$$

де R_V – відношення об'єму до площі поверхні продукту, j_s – середня щільність теплового потоку на поверхні тіла.

Середню щільність теплового потоку на поверхні тіла можна визначити наступним чином. Зовнішній потік теплоти від поверхні тіла дорівнює

$$j_s = \alpha(t_s - t_\infty)S, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, t_s – температура поверхні продукту, t_∞ – температура охолоджувального середовища.

Внутрішнє перенесення теплоти до поверхні тіла в квазіодновимірному наближенні описується наступним рівнянням [5]

$$j_s = -\lambda \frac{\Gamma}{R_x} (t_c - t_s), \quad (5)$$

де t_c – температура в центрі продукту; λ – коефіцієнт теплопровідності; R_x – мінімальна відстань до термічного центру продукту; Γ – коефіцієнт форми тіла:

$$\Gamma = 1 + \frac{R_x}{R_y} + \frac{R_x}{R_z} \quad (1 \leq \Gamma \leq 3), \quad (6)$$

де R_y, R_z – відстань від термічного центру продукту до найбільш віддалених точок на його поверхні (осі R_x, R_y, R_z – взаємно перпендикулярні).

Визначимо середньооб'ємну температуру продукту як середнє арифметичне між температурою центру та поверхні

$$t = \frac{1}{2}(t_c + t_s). \quad (7)$$

Виключивши із системи рівнянь (3–5) величини t_c і t_s , одержуємо наступне диференціальне рівняння, яке визначає кінетику середньооб'ємної температури t за умови, що питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності залежать від температури:

$$\rho R_V \frac{d}{d\tau} \Phi_e(t) \cdot (t + 273) \stackrel{-}{=} - \frac{2\alpha}{1 + \alpha \frac{R_x}{2\Gamma\lambda(t)}} (t - t_\infty). \quad (8)$$

Температурну залежність для питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності продукту можна задати відомими функціями, наприклад, які запропоновані в [1]:

$$C(t) = \begin{cases} C_0 & t > t_{кр} \\ C_m + (C_t / t) & t \leq t_{кр} \end{cases}; \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & t > t_{кр} \\ \lambda_m - (\lambda_t / t) & t \leq t_{кр} \end{cases}, \quad (10)$$

де C_m , C_t , λ_m , λ_t – емпіричні коефіцієнти температурної залежності для ТФХ [1]; C_0 , λ_0 – питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності продукту за температур вищих ніж криоскопічна $t_{кр}$.

Згідно з цією моделлю ТФХ приймаються постійними за позитивних температур і змінюються за гіперболічним законом за негативних температур.

З урахуванням температурної залежності для ТФХ і рівнянь (8) одержуємо наступне диференціальне рівняння за температур $t \leq t_{кр}$.

$$\frac{\left[1 + \frac{\alpha R_x}{2\Gamma \lambda_m - (\lambda_t / t)} \right] \cdot C_m - (273 \cdot C_t / t^2)}{t - t_{\infty}} dt = - \frac{2\alpha}{\rho R_V} d\tau. \quad (11)$$

Його розв'язок при початковій умові $t(0) = t_{кр}$, де $t_{кр}$ – криоскопічна температура продукту, має наступний вигляд:

$$\tau_{зам} = \frac{\rho R_V}{2\alpha} \left[B_1 \ln \left(\frac{t}{t_{кр}} \right) + B_2 \ln \left(\frac{t - t_{\infty}}{t_{кр} - t_{\infty}} \right) + \right. \\ \left. + B_3 \ln \left(\frac{\lambda_m t_{кр} - \lambda_t}{\lambda_m t - \lambda_t} \right) + 273 C_t \frac{t_{кр} - t}{t_{\infty} t_{кр} t} \right], \quad (12)$$

де

$$B_1 = 273C_t \frac{(t_\infty \alpha R_x / 2\Gamma) - \lambda_t}{\lambda_t t_\infty^2};$$

$$B_2 = \left(\lambda_m t_\infty - \lambda_t + t_\infty \frac{\alpha R_x}{2\Gamma} \right) \frac{t_\infty^2 C_m - 273C_t}{t_\infty^2 \lambda_t - \lambda_m t_\infty};$$

$$B_3 = \frac{\alpha R_x}{2\Gamma} \frac{\lambda_t^2 C_m - 273\lambda_m^2 C_t}{\lambda_t \lambda_m \lambda_t - \lambda_m t_\infty}.$$

Ця формула визначає тривалість заморожування $\tau_{зам}$ від кріоскопічної $t_{кр}$ до кінцевої середньооб'ємної температури t .

Якщо в формулу (12) покласти постійними ТФХ ($C_m=C_0$; $C_s=0$; $\lambda_m=0$; $\lambda_r=0$), то одержуємо тривалість охолодження від початкової t_0 до кріоскопічної температури

$$\tau_{охл} = \frac{1}{2} R_V C_0 \rho \frac{\lambda_0 + \alpha R_x / 2\Gamma}{\alpha \lambda_0} \ln \left(\frac{t_\infty - t_0}{t_\infty - t_{кр}} \right). \quad (13)$$

Повна тривалість процесу охолодження та заморожування від початкової температури продукту до кінцевої визначається сумою одержаних величин

$$\tau_{проц} = \tau_{охл} + \tau_{зам}. \quad (14)$$

Висновки. Одержані формули використовуються для інженерних розрахунків тривалості охолодження й заморожування харчових продуктів з урахуванням температурної залежності теплофізичних характеристик. Перспективою подальших досліджень є теоретична та експериментальна перевірка адекватності запропонованих розв'язків.

Список джерел інформації / References

1. Консервирование пищевых продуктов холодом (Теплофизические основы) / И. А. Рогов и др. – М. : Колос, 1999. - 176 с.
Rogov, I.A., Kucakova, V.E., Filippov, V.I., Frolov, S.V. (1999), *Conservation of foodstuff by cold (Heatphysical bases)* [*Konservirovanie pishhevyyh produktov holodom (Teplofizicheskie osnovy)*], Kolos, Moscow, 176 p.

2. Cleland D.J. A generally applicable simple method for prediction of food freezing and thawing times // Proc. XVIII Int. Congr. Refrig. – 1991. №4. – pp. 1884–1887.

3. Hossain Md. M., Cleland D.J., Cleland A.C. Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor// Int. J. Refrig, 1992, №15. pp. 241-246.

4. Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак [та ін.] ; за ред. І. Г. Чумака. – Одеса : Пальміра, 2006. – 522 с.

Chumak, I.G., Chepurnen'ko, V.P., Lar'janovs'kyj, S.Ju. (2006), *Refrigeration units [Holodyl'ni ustanovk]*, Pal'mira, Odesa, 522 p.

5. Потапов В. О. Удосконалена методика розрахунку тривалості заморожування / В. О. Потапов, Д. П. Семенюк // Наукові праці – Одеса : ОНАХТ, 2011. – Вип. 40, Т. 2. – С. 395–399.

Potapov, V.O., Semenjuk, D.P. (2011), „Advanced technique of duration of freezing”, *Scientific works [„Udoskonalena metodyka rozrahunku tryvalosti zamorozhuvannja”*, *Naukovi praci*], ONAHT, Odesa, Vypusk 40, T. 2, pp. 395–399.

Потапов Володимир Олексійович, д-р техн. наук, проф., факультет обладнання та технічного сервісу, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (067)3494588; e-mail: potapov@bigmir.net.

Потапов Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, проф., факультет оборудования и технического сервиса, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (067)3494588; e-mail: potapov@bigmir.net.

Potapov Vladimir, Chair of refrigerating and trade equipment; Dr. of technical sciences, Professor, Kharkiv state university of food technology and trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel: (057)3494588; e-mail: potapov@bigmir.net.

Семенюк Дмитро Павлович, канд. техн. наук, доц., факультет обладнання та технічного сервісу, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (067)3494588; e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com.

Семенюк Дмитрий Павлович, канд. техн. наук, доц., факультет оборудования и технического сервиса, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (067)3494588; e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com.

Semeniuk Dmitriy, Chair of refrigerating and trade equipment; PhD. Associate Professor, Kharkiv state university of food technology and trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel: (057)3494588; e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.М. Михайловим.
Отримано 15.03.2014. ХДУХТ, Харків.*