

**В.О. Потапов**, д-р техн. наук, проф. (*ХДУХТ, Харків*)  
**Д.П. Семенюк**, канд. техн. наук, доц. (*ХДУХТ, Харків*)

## **УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ**

Як відомо класичним рівнянням при розрахунку тривалості процесу заморожування служить формула Планка.

Існують варіанти формули Планка для тіл правильної форми. У роботах деяких вчених висловлено припущення, що теоретично обґрунтованим шляхом для розрахунку тривалості процесу охолодження та заморожування є пряме розв'язання тривимірної нестационарної крайової задачі теплопровідності. В основу формули Планка покладено наступні допущення: розподіл температур за об'ємом тіла в процесі заморожування залишається постійним (квазістационарне наближення) та одновимірним, теплофізичні характеристики тіла залишаються постійними, перед початком заморожування тіло охолоджено до криоскопічної температури, фронт заморожування переміщається симетрично від поверхні тіла до його центру, виконуються граничні умови третього роду на поверхні тіла.

Раніше авторами було запропоновано модель заморожування у разі несиметричних граничних умов, що має місце в плиткових апаратах при контактному заморожуванні.

Проте у існуючих формулах не враховується вплив підведення теплоти від центральної зони продукту, яка при заморожуванні найчастіше має температуру вище криоскопічної. При цьому, чим інтенсивніше проходить процес охолодження в апараті, тим більший градієнт температур по об'єму тіла та більше додаткове теплопідведення від центральних зон продукту. У цих умовах розрахована тривалість заморожування за формулою Планка є меншою ніж експериментальна. Це призводить, до передчасного завершення процесу холодильного оброблення продукту, а відповідно до погіршення його якості при подальшому зберіганні.

Нами було зроблено спробу отримати новий наближений метод розв'язання задачі динаміки нестационарного теплообміну та заморожування для тіл довільної форми при врахуванні теплопідведення від центральної частини тіла, яка має температуру вищу за криоскопічну.

При проведенні розрахунків ми розглядали тіло довільної форми, яке охолоджується з внутрішнім джерелом теплоти, що діє на межі між замороженою та не замороженою частинами тіла за умов симетричного теплообміну з граничною умовою третього роду.

В результаті проведених розрахунків ми отримали розрахункову формулу для визначення тривалості заморожування (час досягнення фронтом кристалізації центру тіла  $x=0$ ).

$$\tau = \frac{-1}{2 \cdot CH \cdot T'} \cdot \ln \left[ \frac{(BT - T')}{BT} \right] \cdot \left[ \frac{(1 + Bi)}{\sqrt{T'} \cdot \sqrt{(1 + Bi)^2 \cdot T' - 4 \cdot BT \cdot Bi}} \right] \cdot \left[ a \tanh \left[ \frac{(-Bi + 1)}{\sqrt{T'} \cdot \sqrt{(1 + Bi)^2 \cdot T' - 4 \cdot BT \cdot Bi}} \right] - \operatorname{atanh} \left[ \frac{(1 + Bi)}{\sqrt{T'} \cdot \sqrt{(1 + Bi)^2 \cdot T' - 4 \cdot BT \cdot Bi}} \right] \right]$$

В цьому випадку темп охолодження не замороженої області визначається наступним чином:

$$T' = \frac{\lambda_c}{c_c \cdot \rho_c} \cdot \frac{T_c - T_k}{R^2},$$

- де  $T_c$  – температура незамороженої області;  
 $\lambda_c$  – теплопровідність незамороженої частини продукту;  
 $c_c$  – питома теплоємність незамороженої частини, Дж/кг·К;  
 $\rho_c$  – густина незамороженої частини, кг/м<sup>3</sup>.

Таким чином, запропонована методика розрахунку тривалості охолодження тривимірних тіл у процесі симетричного теплообміну при врахуванні теплопідведення від центральної частини тіла, яка має температуру вищу за криоскопічну, описує змінювання температури у центрі тіла та дозволяє розраховувати тривалість процесу.

Викладений підхід до моделювання процесів заморожування може застосуватись при описанні інших способів заморожування.

Перспективою подальших досліджень у цьому напрямку є експериментальне підтвердження отриманих теоретичних викладок, а також визначення можливості застосування викладеного підходу до розв'язання інших задач динаміки тепло- та масообмінних процесів.