

где  $r_{mn}^2 = n^2 \pi^2 \delta^2 - \mu_{m1}^2 \frac{h^2}{R^2}$ ;  $q_{mn}^2 = n^2 \pi^2 \delta^2 - \mu_{m2}^2 \frac{h^2}{R^2}$ ;  $c_{k, mn}$ ,  $d_{k, mn}$ ,  $e_{km}$  — коэффициенты Фурье для трансформанты Лапласа функции  $xU_n(x)$ ,  
 $c_{k, mn} = \frac{4i_{mn} k \pi}{(k^2 \pi^2 + t_{mn}^2)^2} (\operatorname{ch} t_{mn} - (-1)^k)$ ;  $d_{k, mn} = \frac{2k \pi}{(k^2 \pi^2 + t_{mn}^2)^2} [2S_{mn} - 2 \times$   
 $\times (-1)^k S_{mn} \operatorname{ch} S_{mn} + (-1)^k (S_{mn}^2 + k^2 \pi^2) \operatorname{sh} S_{mn}]$ ;  $e_{k, m} = \frac{4km[(-1)^{k+m}-1]}{\pi^2 (k^2 + m^2)^2}$ ,  
 $e_{k, k} = \frac{1}{2}$ .

На основании анализа полученных зависимостей установлено, что с помощью формы решения задачи (1), (4) охлаждения пластины, ограниченной сферическими телами, можно описать температурные поля, время охлаждения полутуш мяса для разных способов с различной системой воздухораспределения, в частности, для охлаждения мяса при естественной конвекции используется решение (1) и (7); для быстрого охлаждения мяса методом воздушного душирования применяется решение (1) и (4); при туннельной системе с продольным и поперечным движением воздуха используется решение (1), (7).

#### Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967. — 600 с.
2. Шеффер А. П., Саатчан А. К., Кончаков Г. Д. Интенсификация охлаждения, замораживания и размораживания мяса. — М.: Пищ. пром-сть., 1972. — 376 с.

Поступила в редколлегию 21.11.82.

УДК 621.58.

А. В. ОВСЯННИК, В. С. МУРАШОВ, канд. техн. наук

#### НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС НАМОРАЖИВАНИЯ ЖИДКОСТИ ВО ФРИЗЕРАХ

Процесс фризирования смеси можно условно разбить на три стадии термической обработки: охлаждение смеси от начальной температуры до криоскопической; кристаллизация (замораживание) и переохлаждение смеси, т. е. понижение ее температуры от криоскопической до требуемой. Производительность фризера зависит от толщины намораживаемого слоя смеси и времени намораживания, поэтому для определения производительности фризера и его расчета необходимо рассчитать толщину намораживаемого слоя. Задача теплообмена во фризере на участке с фазовым переходом рассматривается как сопряженная нестационарная при граничных условиях IV рода на внутренней поверхности и граничных условиях III рода на наружной.

При постановке задачи и расчетах сделаны следующие допущения [1]: температура поверхности раздела фаз во фризере не изменяется в течение всего процесса намораживания и равна криоскопической температуре смеси мороженого; теплофизические характеристики на-

мораживаемого слоя и стенки, определяемые по соответствующим температурам, неизменны; процесс кристаллизации смеси обусловлен только передачей тепла путем теплопроводности.

Схема задачи представлена на рисунке. В соответствии со схемой математическая модель процесса намораживания описывается следующими уравнениями:

для стенки цилиндра

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad r_0 \leq r \leq r_0 + \delta;$$

для намораживаемого слоя смеси

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad r_0 - \xi \leq r \leq r_0;$$

граничные условия и условия сопряжения

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = \frac{\alpha_0}{\lambda_1} (T_1 - T_0), \quad r = r_0 + \delta; \quad (1)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad r = r_0; \quad (2)$$

$$T_1 = T_2 = T(\xi), \quad r = r_0; \quad (3)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_{\text{см}} (T_2^{\text{вх}} - T_{\text{кр}}) + \rho \beta \frac{d\xi}{d\tau}, \quad r = r_0 - \xi; \quad (4)$$

$$T_2 = T_{\text{кр}}, \quad r = r_0 - \xi. \quad (5)$$

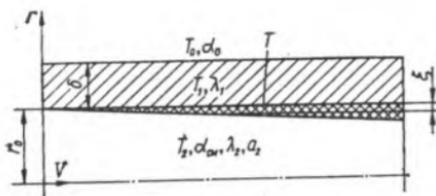


Схема модели процесса намораживания смеси на внутренней поверхности цилиндра фризера.

В связи с тем, что точное аналитическое решение задачи найти нельзя, используется приближенный метод Лейбензона, основанный на замене истинных температурных кривых их простейшими аналогами, а именно: температура в промежутках  $r_0, r_0 + \delta$  и  $r_0, r_0 - \xi$  берется, как при стационарной теплопроводности [1—3]:

$$T_1 = C_1 \ln r + C_2; \quad T_2 = C_3 \ln r + C_4. \quad (6)$$

Используя выражение (1), (3), (5), определяем  $C_1 - C_4$ :

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = C_1 \frac{1}{r_0 + \delta} = \frac{\alpha_0}{\lambda_1} [C_1 \ln(r_0 + \delta) + C_2 - T_0];$$

$$C_1 \ln r_0 + C_2 = T;$$

$$C_3 \ln r_0 + C_4 = T;$$

$$T_{\text{кр}} = C_3 \ln(r_0 - \xi) + C_4,$$

откуда

$$C_1 = \frac{T - T_0}{[\lambda_1/\alpha_0 (r_0 - \delta)] + \ln [r_0/(r_0 + \delta)]};$$

$$C_2 = T(\xi) - \frac{(T - T_0) \ln r_0}{[\lambda_1/\alpha_0 (r_0 + \delta)] + \ln [r_0/(r_0 + \delta)]};$$

$$C_3 = \frac{T_{кр} - T_0}{\ln [(r_0 - \xi)/r_0]}; \quad C_4 = T(\xi) - \frac{[T_{кр} - T(\xi)] \ln r_0}{\ln [(r_0 - \xi)/r_0]}.$$

По известным  $C_1 - C_4$  определяется распределение температуры в стенке и слое смеси:

$$T_1 = \frac{T(\xi) - T_0}{[\lambda_1/\alpha_0 (r_0 - \delta)] + \ln [r_0/(r_0 + \delta)]} \ln \frac{r}{r_0} + T(\xi);$$

$$T_2 = \frac{T_{кр} - T(\xi)}{\ln [(r_0 - \xi)/r_0]} \ln \frac{r}{r_0} + T(\xi).$$

Температуру  $T(\xi)$  находим из условия сопряжения (2), предварительно продифференцировав уравнения (6):

$$T = \frac{\lambda_2 T_{кр} [\lambda_1/\alpha_0 (r_0 + \delta)] + \ln [r_0/(r_0 + \delta)] + \lambda_1 T_0 \ln [(r_0 - \xi)/r_0]}{\lambda_2 [\lambda_1/\alpha_0 (r_0 + \delta)] + \ln [r_0/(r_0 + \delta)] + \lambda_1 \ln [(r_0 - \xi)/r_0]}. \quad (7)$$

Подставляя уравнения (6) в формулу (4), с учетом выражения (7) получаем

$$\tau = \frac{\rho\beta}{\alpha_{см} (T_2^{вх} - T_{кр})} \int_0^{\xi} \frac{(1-C) [\ln(1-C) + B] d\xi}{(1-C) [\ln(1-C) + B] - A},$$

где  $C = \xi/r_0$ ;  $A = \frac{\lambda_2 (T_0 - T_{кр})}{\alpha_{см} r_0 (T_2^{вх} - T_{кр})}$ ;  $B = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left[ \left( \ln \frac{r_0}{r_0 + \delta} \right) + \frac{\lambda_1}{\alpha_0 (r_0 + \delta)} \right]$ .

Используя малость величины  $C = \xi/r_0$ , раскладываем числитель и знаменатель подинтегрального выражения в степенные ряды и определяем время намораживания  $\tau$  слоя смеси толщиной  $\xi$ :

$$\tau = \frac{\rho\beta}{\alpha_{см} (T_2^{вх} - T_{кр})} \left[ \frac{B}{B-A} \xi + \frac{A(1+B)}{2(B-A)^2 r_0} \xi^2 + \frac{A(1+B+AB)}{6r_0^2 (B-A)^3} \xi^3 + \dots \right] \quad (8)$$

Вследствие малости величины  $\xi$  достаточно ограничиться двумя членами ряда. С помощью выражения (8) можно определить толщину намораживаемого слоя  $\xi$  по известному времени намораживания.

Время намораживания  $\tau = 60/xn_m$ , где  $x$  — количество ножей мешалки;  $n_m$  — число оборотов мешалки, об/мин.

Определим время намораживания и толщину намораживаемого слоя на внутренней поверхности цилиндра фрисера ОФИ при условиях работы, соответствующих реальным, приняв, что коэффициент теплопроводности материала цилиндра  $\lambda_1 = 40$  Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности смеси мороженого  $\lambda_2 = 0,4$  Вт/(м·К); температуры

кипения холодильного агента  $T_0 = -30^\circ\text{C}$ ; криоскопическая температура  $T_{\text{кр}} = -3^\circ\text{C}$ ; внутренний радиус цилиндра  $r_0 = 0,05\text{ м}$ ; коэффициент теплоотдачи со стороны кипящего холодильного агента  $\alpha_0 = 4 \cdot 10^3\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; коэффициент теплоотдачи со стороны смеси мороженого  $\alpha_{\text{см}} = 1 \cdot 10^5\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; плотность смеси мороженого  $\rho = 800\text{ кг}/\text{м}^3$ ; удельная теплота льдообразования  $\beta = 335 \cdot 10^3\text{ Дж}/\text{кг}$ .

При частоте вращения мешалки  $n_m = 540\text{ об}/\text{мин}$  и количестве ножей  $x = 2$  время намораживания равно  $0,055\text{ с}$ . За это время согласно выражению (8) на поверхности цилиндра толщина намораживаемого слоя составит  $0,3\text{ мм}$ .

#### Список литературы

1. Гуйго Э. И., Ржевская В. Б., Менин Б. М. Определение продолжительности замораживания жидкости пищевых продуктов в барабанных аппаратах непрерывного действия. — Холодильн. техника, 1979, № 8, с. 36—38.
2. Лыков А. В. Сопряженные задачи конвективного теплообмена. — Минск: Ин-т тепломассообмена, 1971. — 213 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967. — 600 с.
4. Овсянник А. В. Исследование и интенсификация процессов теплообмена во фризерах непрерывного действия. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Одесса, 1981. — 22 с.

*Поступила в редколлегию 15.05.82.*

УДК 621.582.4:621.36

В. К. ГАРАЧУК, канд. техн. наук, В. А. ГЕРНЕР, Ю. А. СМИРНОВ,  
С. О. ФИЛИН

#### ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЯВЛЕНИЯ РАСШИРЕНИЯ ВОДЫ ПРИ ЗАМЕРЗАНИИ В ОХЛАДИТЕЛЯХ И ЛЬДОГЕНЕРАТОРАХ

В льдогенераторах и охладителях жидкости, работающих в области отрицательных температур, эффект изменения объема жидкости при ее переходе в твердое состояние до последнего времени не имел практического применения, а в ряде случаев рассматривался как вредный.

Приращение объема чистой воды при кристаллизации в нормальных условиях составляет более 8%. В результате этого давление в герметичном объеме достигает 207 МПа [5], что может вызвать нежелательные деформации стенок льдоформы или емкости для жидкости и вывести охладитель из строя. В то же время на отдельных этапах работы упомянутых устройств необходимо применение механических сил, например для извлечения льда из льдоформы. Использование для этой цели метода оттайки, как в термоэлектрических льдогенераторах, значительно увеличивает энергопотребление источника холода и сокращает число циклов замораживания. Использование явления расширения воды при замерзании в ряде специальных конструкций, разработанных авторами, позволяет выталкивать из ячейки образовавшийся