

О.О. Коваленко, д-р техн. наук, доц. (ОНАХТ, Одеса)
О.Б. Василів, канд. техн. наук, доц. (ОНАХТ, Одеса)
С.В. Іщенко, асп. (ОНАХТ, Одеса)
С.В. Фуркало, асп. (ОНАХТ, Одеса)

УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВІДДАЧІ У РАЗІ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ ВИМОРОЖУВАННЯМ

Для розрахунку процесу тепловіддачі при виморожуванні використовують критеріальні рівняння виду: $Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot (L/d)^m$

– для природної конвекції; $Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot K^C$ – для вимушеної конвекції. Зазначені рівняння не враховують певні особливості процесу кристалізації та конструкції установки, а саме: наявність переохолодження розчину; взаємний вплив кристалізаторів; фазовий перехід, а тому результати розрахунків за ними мають суттєві похибки. В даній роботі за мету було поставлено врахувати зазначені вище фактори в структурі рівняння для розрахунку тепловіддачі в системі «розчин – тверда фаза». Розглядається процес кристалізації, який здійснюється на вертикальних кристалізаторах, що виконані у формі трубки Фільда і розміщені всередині циліндричної ємності. Для отримання залежності, яка б враховувала зазначені вище фактори, скористаємося методом аналізу розмірностей. Залежною змінною є середній коефіцієнт тепловіддачі від розчину до фронту кристалізації. Загальний вигляд функціональної залежності можна представити у вигляді:

$$\bar{\alpha}_p^n = f(d_{кр}, L_{кр}, \Delta_{кр}, d_{ф}, \rho_p, \mu_p, c_p^p, \lambda_p, g, \Delta\rho, r_{ф}, \Delta T), \quad (1)$$

або, згрупувавши окремі величини в комплекси для зменшення кількості змінних, та з врахуванням що $\Delta h = c_p^p \cdot \Delta T$, так

$$\bar{\alpha}_p^n = f\left(\frac{L_{кр}}{d_{кр}}, \frac{\Delta_{кр}}{d_{кр}}, \frac{r_{ф}}{\Delta h}, d_{ф}, \rho_p, \mu_p, c_p^p, \lambda_p, g, \Delta\rho\right). \quad (2)$$

Список перерахованих параметрів представлений в табл.1. Всі ці параметри містять чотири основних розмірності: довжину (L), масу (M), температуру (T) і час (Θ). Користуючись аналізом розмірностей, замінимо цю функцію залежністю між критеріями подібності. У даному випадку число змінних $n = 10$, число їх одиниць виміру $m=4$. Тоді, згідно π-теоремі число безрозмірних комплексів, що описують

процес, буде дорівнює $(n - m) = 6$.

Таблиця 1 – Список параметрів процесу кристалізації

Параметр	Символ	Розмірність
Коефіцієнт тепловіддачі від розчину до фронту кристалізації	α_p	$M \cdot \Theta^{-3} \cdot T^{-1}$
Діаметр кристалізатора	$d_{кр}$	M
Висота кристалізатора	$L_{кр}$	M
Крок розміщення кристалізаторів	$\Delta_{кр}$	M
Діаметр зовнішньої поверхні твердої	d_{ϕ}	M
Густина розчину	ρ_p	$M \cdot L^{-3}$
Коефіцієнт динамічної в'язкості розчину	μ_p	$M \cdot L^{-1} \cdot \Theta^{-1}$
Питома теплоємність розчину за постійного тиску	c_p^p	$L^2 \cdot \Theta^{-2} \cdot T^{-1}$
Коефіцієнт теплопровідності розчину	λ_p	$M \cdot L \cdot \Theta^{-3} \cdot T^{-1}$
Прискорення вільного падіння	g	$L \cdot \Theta^{-2}$
Зміна густини розчину при охолодженні	$\Delta\rho$	$M \cdot L^{-3}$
Питома теплота фазового переходу	r_{ϕ}	$L^2 \cdot \Theta^{-2}$
Зміна ентальпії розчину	Δh	$L^2 \cdot \Theta^{-2}$

Представимо вихідну функцію (2) у степеневому вигляді:

$$\alpha_p = C \cdot \left(\frac{L_{кр}}{d_{кр}}\right)^a \cdot \left(\frac{\Delta_{кр}}{d_{кр}}\right)^b \cdot \left(\frac{r_{\phi}}{\Delta h}\right)^c \cdot d_{\phi}^d \cdot \lambda_p^e \cdot (c_{pp})^f \cdot \rho_p^g \cdot \mu_p^h \cdot \Delta\rho_p^i \cdot g^j.$$

Отримаємо безрозмірні комплекси $K_1 = L_{кр}/d_{кр}$, $K_2 = \Delta_{кр}/d_{кр}$ та число Стефана $Ste = r_{\phi}/\Delta h$. Складемо рівняння розмірностей без врахування показників степенів a , b та c :

$$\frac{M}{\Theta^3 \cdot T} = L^d \cdot \left(\frac{M \cdot L}{\Theta^3 \cdot T}\right)^e \cdot \left(\frac{L^2}{\Theta^2 \cdot T}\right)^f \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^g \cdot \left(\frac{M \cdot L}{\Theta}\right)^h \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^i \cdot \left(\frac{L}{\Theta^2}\right)^j.$$

В результаті розв'язку рівняння розмірностей та подальшого згрупування окремих величин, отримаємо:

$$Nu = C \cdot Gr^j \cdot Pr^f \cdot Ste^c \cdot K_1^a \cdot K_2^b. \quad (3)$$

Для визначення невідомих показників степенів та коефіцієнта C в рівнянні (3) необхідно провести узагальнення виконаних експериментальних досліджень по вивченню впливу конструктивних та режимних параметрів на процес тепловіддачі