

**Е.В. Білецький**, д-р техн. наук, проф. (НТУ «ХПИ», Харків)  
**О.В. Петренко**, канд. техн. наук, доц. (ХДУХТ, Харків)

## МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛООБМІННИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ БІНГАМІВСЬКИХ РІДИН

Теплові процеси є найбільш поширеними в харчових та хімічних технологіях. Інтенсивність теплообміну в великій мірі залежить від гідродинамічних режимів руху рідини. Як правило, з огляду на високу в'язкість неньютоновських рідин, течія відбувається в ламінарному режимі, рідше в перехідному. Створення турбулентного режиму руху, хоча і бажане, але важко організовується, в зв'язку з великими витратами енергії. Неізотермічні умови протікання процесів зустрічаються набагато частіше, ніж ізотермічні. Підведення і відведення теплових потоків до теплопередаючої поверхні здійснюється різними способами. Процес передачі тепла при течії рідини здійснюється за рахунок теплопровідності і конвекції.

Розглянемо стисло методику складання рівнянь теплообміну і визначення коефіцієнтів теплопередачі для неньютонівської (бінгамівської) рідини у випадку де зовнішнє середовище вважається нескінченним тепловим резервуаром із заданою температурою. У рівнянні теплообміну є конвективні складові та складові з теплопровідністю. Теплообмін в каналі з неньютонівською рідиною відбувається при малих значеннях числа Пекле, незважаючи на те, що бінгамівська рідина має велику в'язкість. Рух теплоносія в каналі вважається інерційним і теж відповідає малим значенням числа Пекле. Таким чином, в гідродинамічному аспекті неньютонівські рідини і теплоносії рухаються в різних режимах, а в тепловому аспекті – в одному. Схема теплообміну для течії бінгамівської рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар зображено на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема теплообміну для течії бінгамівської рідини в каналі, який занурено в тепловий резервуар: а – вигляд в об'ємному розмірі; б – схема течії та характеристик теплообміну з тепловим резервуаром

Для теплообміну бінгамівської рідини в каналі зі стінкою із заданою температурою виконуються такі рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{V}^+ \rho c_p \frac{dT^+}{dz} &= \dot{e}^+ S^+ + \alpha_i^+ (T_\Gamma^+ - T^+) P^+ + \alpha_k^+ (T^+ - T_k^+) P_k^+; \\ \dot{V}^- \rho c_p \frac{dT^-}{dz} &= \dot{e}^- S^- + \alpha_i^- (T_\Gamma^- - T^-) P^- + \alpha_k^- (T^- - T_k^-) P_k^-; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} = 0; \quad -\lambda_k \left. \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \right|_{\Gamma^\pm} = \alpha_k^\pm (T_\Gamma - T^\pm) \Big|_{\Gamma^\pm},$$

де:  $\dot{V}^\pm$  – витрати течії текучої частини вище та нижче ядра течії, м<sup>3</sup>/с;  $T^\pm$  – температури текучої частини вище та нижче ядра течії, °С;  $\dot{e}^\pm$  – питомі дисипації енергії текучої частини вище й нижче ядра течії Дж/м<sup>3</sup>;  $S^\pm$  – площі поперечних перерізів текучої частини вище й нижче ядра течії, м<sup>2</sup>;  $T_k^\pm$  – температури ядра, які примикають до верхньої та нижньої ділянок текучої частини, °С;  $T_\Gamma^\pm$  – температури верхній та нижніх стінок каналу, °С, де " $\Gamma$ " =  $hy$ ,  $ax$ ;  $\alpha_i^\pm$  – коефіцієнти тепловіддачі на стінках на лініях  $y = \pm h$ , Дж/м<sup>2</sup> °С;  $\alpha_k^\pm$  – коефіцієнти тепловіддачі на границях ядра течії на лініях  $y = \Gamma^\pm$ , Дж/м<sup>2</sup> °С;  $P^\pm$  – довжини периметрів стінок перетину каналу, м;  $P_k^\pm$  – довжини периметрів границь перетину ядра течії, м;  $\lambda$ ,  $\lambda_k$  – коефіцієнти теплопровідності текучої частини і ядра в'язкопластичної рідини, Дж/м °С.

Якщо температури стінок каналу відомі (що буває найчастіше), то рівняння теплообміну приймають наступний вид:

$$\begin{aligned} \dot{V}^+ \rho c_p \frac{dT^+}{dz} &= \dot{e}^+ S^+ + K^+ (T^{+\infty} - T^+) P^+ + K_k^+ (T^+ - T_k^+) P_k^+, \\ \dot{V}^- \rho c_p \frac{dT^-}{dz} &= \dot{e}^- S^- + K^- (T^{-\infty} - T^-) P^- + K_k^- (T^- - T_k^-) P_k^-, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_k^\pm}{\partial z^2} = 0; \quad -\lambda_k \left. \frac{\partial T_k^\pm}{\partial y} \right|_{\Gamma^\pm} = \alpha_k^\pm (T_\Gamma - T^\pm) \Big|_{\Gamma^\pm},$$

де:  $T^{\pm\infty}$  – температури теплового резервуара вище й нижче каналу, °С;  $K^\pm$  – коефіцієнти теплопередачі між частинами теплового резервуара та текучою частиною бінгамівської рідини вище та нижче ядра течії, Дж/м<sup>2</sup> °С;  $K_k^\pm$  – коефіцієнти теплопередачі між текучою частиною і ядром в'язкопластичної рідини, Дж/м<sup>2</sup> °С.

Коефіцієнти теплопередачі можливо визначити з коефіцієнтів тепловіддачі за звичайними правилами, які є відомими із літератури.