

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі для випадку випаровування з поверхні гравітаційно стікаючої плівки

А.В.Форсюк, С.М.Василенко, М.О.Прядко

На кафедрі промислової теплоенергетики УДУХТ проведено експериментальне дослідження дискретно-локальних тепло-гідродинамічних характеристик процесу випаровування з поверхні гравітаційно стікаючих плівок яблучних соків при наявності супутного парового потоку.

В результаті аналізу дослідних даних було запропоновано емпіричну залежність для визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі при випаровуванні з поверхні та залежність для визначення величини зведеної еквівалентної шорсткості поверхні розподілу фаз. Це дало можливість розробити методику розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від поверхні труби до плівки, яка випаровується.

Розрахунок складається з таких етапів:

- знаходять безрозмірну товщину плівки δ^+ за одним з відомих рівнянь:

$$Re_p = 2(\delta^+)^2 \text{ при } Re_p < 50; \quad (1)$$

$$Re_p = -32,2\delta^+ + 20\delta^+ \ln \delta^+ + 50 \text{ при } 50 \leq Re_p \leq 1124; \quad (2)$$

$$Re_p = 4(3\delta^+ + 2,5\delta^+ \ln \delta^+ - 64) \text{ при } Re_p > 1124. \quad (3)$$

Критеріальне число Рейнольдса визначається як

$$Re_p = \frac{4\Gamma_v}{\nu}, \quad (4)$$

де Γ_v – об’ємна густина зрошення, $\text{м}^2/\text{с}$; ν – в’язкість рідини, $\text{м}^2/\text{с}$.

- Задаваючись густиною теплового потоку q_i , $\text{Вт}/\text{м}^2$; швидкістю пари ω_p , $\text{м}/\text{с}$; дотичною напругою на міжфазній межі τ_i , Па , – знаходять адіабатну дотичну напругу τ_{ia} :

$$\tau_i = \tau_{ia} - 0,6 \frac{q_i}{r} \omega_n, \quad (5)$$

де r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

- Визначають безрозмірну дотичну напругу τ_i^* та граничну безрозмірну дотичну напругу $\tau_{i\text{гр}}^*$, що є межою двох областей характерного впливу міжфазної дотичної напруги на величину еквівалентної піщаної шорсткості стікаючої плівки (встановлені результати аналізу дослідних даних):

$$\tau_i / \left[\rho g \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = \tau_i^* \quad (6)$$

$$\tau_{i\text{гр}}^* = 63 \text{Re}_p^{-0.875} \times \text{Ka}^{0.1196}, \quad (7)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; об’ємна густина зрошення, м²/с; v – в’язкість рідини, м²/с; $\text{Ka} = \frac{\sigma^3}{\rho^3 g v^4}$ – критеріальне число Капиці; σ – поверхневий натяг, н/м.

- Залежно від величини τ_i^* пропонуються такі формули для визначення безрозмірної еквівалентної піщаної шорсткості поверхні розподілу фаз k_s^+ та еквівалентної піщаної шорсткості k_s :

$$k_s^+ = 3370 \tau_i^{*0.685} \times \text{Re}_p^{4.54} \times \text{Ka}^{-1.347} \quad \text{при } \tau_i^* < \tau_{i\text{гр}}^*; \quad (8)$$

$$k_s^+ = 473 \times 10^3 \tau_i^{*-0.87} \times \text{Re}_p^{3.16} \times \text{Ka}^{-1.0925} \quad \text{при } \tau_i^* \geq \tau_{i\text{гр}}^*; \quad (9)$$

$$k_s \times \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} = k_s^+. \quad (10)$$

- За формулою Колбрука-Уайта визначається коефіцієнт опору парового ядра f'_{ia} :

$$\frac{1}{\sqrt{f'_{ia}}} = 1,74 - 0,87 \ln \left(\frac{2k_s}{D} + \frac{18,6}{\text{Re}_n \sqrt{f'_{ia}}} \right), \quad (11)$$

де D – внутрішній діаметр труби, м; Re_n – критеріальне число Рейнольдса для парового ядра.

- Визначається адіабатна дотична напруга за формулою:

$$\tau_{ia} = \frac{f'_{ia}}{8} \rho_n \overline{\omega_n^2} . \quad (12)$$

- Якщо отримане значення адіабатної дотичної напруги відрізняється від попередньо визначеного за формулою (5), то змінюється значення τ_i і розрахунки повторюються доти, доки різниця між прийнятим значенням адіабатної дотичної напруги та визначеним не стане менше деякої попередньо заданої величини ϵ .
- Отримавши таким чином значення дотичної напруги, визначається величина динамічної швидкості u^* , м/с:

$$u^* = \left(\frac{\tau_i}{\rho} + \frac{g\delta^+ v}{u^*} \right)^{\frac{1}{2}} .$$

- Визначається коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²·К):

$$St = \frac{\alpha}{\rho c u^*} ,$$

де c – теплоємність рідини, що випаровується, Дж/(кг·К).

Критеріальне число Стантона пропонується розраховувати за емпіричною формулою, що отримана в результаті аналізу експериментальних даних

$$St = 0.0356 Pr^{-0.469} ,$$

де Pr – критеріальне число Прандтля для рідини.