

УДК 532.246

ДИНАМІКА ТЕПЛОМАСООБМІНУ І ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ЗОНІ КОНДЕНСАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ

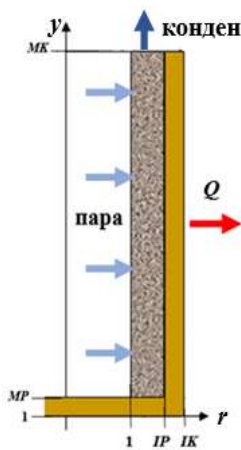
професор, д.т.н. Сорокова Н.М., аспірант Половинкін К.О.

Національний технічний університет України

"КПІ імені Ігоря Сікорського"

Теплові труби (ТТ) застосовуються для термостабілізації термонапружених елементів промислового обладнання, електричних двигунів, радіоелектронної апаратури, літальних апаратів, машин оборонної промисловості і т.і. Це пов'язано з тим, що ефективна теплопровідність ТТ на кілька порядків є вищою, ніж у високотеплопровідних матеріалів [1]. Геометричні характеристики і продуктивність ТТ обираються в залежності від особливостей їх використання, на основі детальних досліджень тепломасопереносу і фазових перетворень в кожній зоні ТТ. Дійовим способом впливу на теплопередавальні характеристики ТТ є умови тепловідведення в зоні конденсації, оптимальний вибір яких доцільно проводити із залученням методу математичного моделювання.

В зоні охолодження ТТ тепломасообмін відбувається внаслідок конденсації насиченої пари на капілярно-пористій структурі (гніті), розташованій на внутрішній поверхні стінки ТТ, та передачі теплоти конденсації через стінку охолоджуючій рідині. Конденсат по капілярно-пористій структурі гніту під дією капілярних сил переміщується уздовж бічної поверхні ТТ в зону нагріву, де випаровується, відводячи теплоту від термонапруженої поверхні.



Математична модель для розрахункової області (рис.1) включає рівняння енергії, масопереносу рідини і пари:

$$c_{\text{еф}} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_{\text{еф}r} \frac{\partial T}{\partial r} + w_{\text{еф}y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{еф}r} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + LI_V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial (w_{pr} U_p)}{\partial r} + \frac{\partial (w_{py} U_p)}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_p r \frac{\partial U_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_p \frac{\partial U_p}{\partial y} \right) + I_V, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial t} + \frac{\partial (w_{\text{п}r} U_{\text{п}})}{\partial r} + \frac{\partial (w_{\text{п}y} U_{\text{п}})}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{п}} r \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} \right) - I_V. \quad (3)$$

Рис.1

Розрахункова область

Тут U_p , $U_{\text{п}}$ – об’ємні концентрації рідини і пари; $w_{\text{п}}$, w_p – швидкості фільтрації фаз, що визначаються за законом Дарсі:

$w_{\psi} = -K \nabla P_{\psi} / \mu_{\psi}$ ($\psi = \text{п}, \text{р}$), де $K = 0,4 d_b^{2,75} \exp(8,4 \cdot 10^{-3} \Pi d_b^{-0,22})$ – коефіцієнт проникності [1], d_b – діаметр волокон гніту, мкм, Π – пористість; ∇P_{ψ} , μ_{ψ} – градієнт тиску і динамічний коефіцієнт в’язкості фази ψ ; ефективні теплопровідність, теплоємність і швидкість теплоносія в пористому шарі $\lambda_{\text{еф}} = \lambda_{\text{т}} \Psi_{\text{т}} + \lambda_{\text{р}} \Psi_{\text{р}} + \lambda_{\text{п}} \Psi_{\text{п}}$, $c_{\text{еф}} = c_{\text{т}} \Psi_{\text{т}} \rho_{\text{т}} + c_{\text{р}} U_{\text{р}} + c_{\text{п}} U_{\text{п}}$, $w_{\text{еф}r} = (w_{\text{р}r} c_{\text{р}} U_{\text{р}} + w_{\text{п}r} c_{\text{п}} U_{\text{п}}) / c_{\text{еф}}$, де об’ємні частки твердої $\Psi_{\text{т}} = 1 - \Pi$, рідкої $\Psi_{\text{р}} = U_{\text{р}} / \rho_{\text{р}}$ і парової $\Psi_{\text{п}} = 1 - \Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{р}}$ фаз.

Коефіцієнти дифузії D_p і $D_{\text{п}}$ в капілярах гніту знаходяться по формулам:

$D_p = \gamma_{Dp} [\exp(A_D / RT) - 1]^{-1}$ [2], $D_{\text{п}} = \gamma_{D\text{п}} T^{3/2} / P_{\text{п}}$, де A_D – енергія дифузійної активації, R – універсальна газова стала, γ_{Dp} , $\gamma_{D\text{п}}$ – дифузійні коефіцієнти.

Інтенсивність фазових перетворень знаходиться [2] як різниця потоків рідини, що випаровується, та пари, що конденсується

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_{\text{т}} \Big|_{v=0} \left(\exp \left[A / (RT \Big|_{v=0}) \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[A / (RT_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad \gamma_c = \text{const.} \quad (4)$$

Тут $\varphi_{\text{т}}$ – відносна вологість парогазової суміші, якій згідно ізотермі сорбції відповідає концентрація U_p в даній точці; v – нормаль; A – енергія активації.

Граничні умови на поверхні $r=1$, $MP \leq y \leq MK$ являють умови III роду:

$$-D_{\Pi} \frac{\partial U_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{v=0} + \frac{\partial(w_{\Pi r} U_{\Pi})}{\partial r} \Big|_{v=0} = -\gamma_{\Pi, c} (U_{\Pi} \Big|_{r=1} - \rho_{\Pi, c} \Psi_{\Pi}), \quad D_p \frac{\partial U_p}{\partial r} \Big|_{r=1} + \frac{\partial(w_{p r} U_p)}{\partial r} \Big|_{r=1} = I_c \Big|_{r=1},$$

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=1} + w_{\text{эф}r} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=1} = \alpha(T_c - T \Big|_{r=1}) + LI \Big|_{r=1}.$$

Через границю $1 \leq r \leq IP$, $y = MK$ конденсат відводиться під дією капілярних сил в зону транспорту, а зміною T і U_{Π} на цій границі можна знехтувати:

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=MK} = 0; \quad -D_p \frac{\partial U_p}{\partial y} \Big|_{y=MK} + \frac{\partial(w_{p r} U_p)}{\partial y} \Big|_{y=MK} = \frac{K}{\mu_p} \frac{P \Big|_{y=MK} - P_k}{\partial y} U_p \Big|_{y=MK}; \quad \frac{\partial U_{\Pi}}{\partial y} \Big|_{y=MK} = 0;$$

$$\frac{\partial w_{py}}{\partial y} \Big|_{y=MK} = \frac{K}{\mu_p} \frac{P \Big|_{y=MK} - P_k}{\partial y}; \quad \frac{\partial w_{\Pi x}}{\partial x} \Big|_{v=0} = 0,$$

де капілярний тиск P_k розраховується за виразом, отриманим у [2], що є аналогічним формулі Лапласа $P_k = 2\sigma(T)/r^*$, $r_{\min} < r^* < r_{\max}$, r_{\min} і r_{\max} – мінімальний і максимальний радіуси пор, r^* – характеристичний параметр дисперсності розмірів пор.

Результати розрахунку у деяких вузлових точках, де $m=5=MP+2$, а $m=12=MK-2$ (рис.1) представлені на рис.2. Розглядалась мідна ТТ, з довжиною зони конденсації $l = 0,25$ м, $d_b = 20$ мкм, $\Pi = 0,7$. Ізотерма сорбції для пористої мідної структури [3] $W^{-1} = W_{\max}^{-1} - 35,5 \ln \phi$, де $W_{\max} = 0,45\%$, а $U_p = 0,01 W_{\Pi T}$.

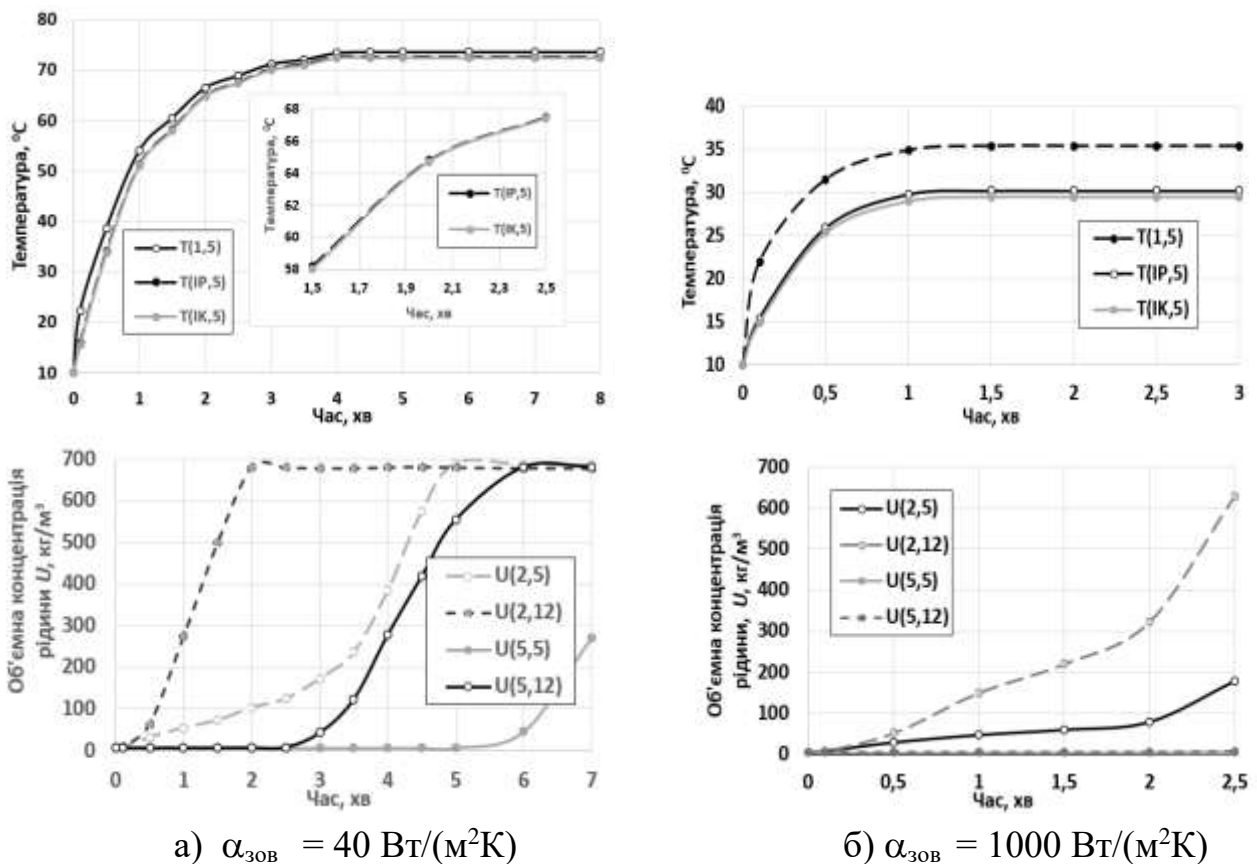


Рис.2 Зміна в часі температури та об'ємної концентрації рідкої фази в деяких вузлових точках системи гніт-стінка ТТ при різних інтенсивностях тепловіддачі α_{30V} від наружної поверхні ТТ

Висновки. Розроблена математична модель і метод її реалізації показують адекватні якісні результати і можуть бути корисними при аналізі різних впливових факторів на ефективність роботи ТТ при конструюванні або обранні режимів експлуатації ТТ.

Перелік посилань

1. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. 288 с.
2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н., Кольчик Ю.Н. Молекулярно-радиационная теория и методы расчета тепло- и массообмена. Киев: Наукова думка, 2014. 744 с.

3. Сорокова Н., Половинкін К. (2024). Математична модель і метод розрахунку динаміки тепломасообміну в зоні конденсації теплової труби. Scientific Works, 88(1), 63–69. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2962>.