

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСУ У ШАРУВАТИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛАХ

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

*Явища контактного тепло- і масообміну між матеріалами різної фізико-хімічної структури досить широко розповсюджені у технологічних процесах різних галузей промисловості, що спонукає до необхідності подальших досліджень їх кінетики, наприклад, при сушінні капілярно-пористих тіл. Встановлено, що багатьма дослідниками вивчалися нестационарні задачі тепло- і масообміну кусково-однорідної необмеженої двошаруватої плити з оточуючим середовищем, проте окремі деталі цих процесів досі не встановлені. Авторами статті наведено аналітичний розв'язок нестационарної задачі тепло- і масопровідності кусково-однорідної необмеженої двошаруватої плити, яка однією поверхнею приймає участь у конвективному тепло- і масообміні з оточуючим середовищем з постійними потенціалами тепло- й масоперееносу, а іншою поверхнею є тепло- та вологоізолювана. Дана модель адекватно описує процеси тепло- та масообміну у художньому полотні, виставленому у приміщенні музею, до якого рухається потік відвідувачів. Перший прошарок моделює фарби, котрі нанесені на полотно художньої картини, а другий – безпосередньо основу картини (саме художнє полотно). У результаті розв'язку поставленої задачі методами математичної фізики встановлено вплив окремих тепло- та масообмінних критеріїв на тепло- й масопереенос у даній плиті. Отримані авторами результати можуть бути використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів нестационарного тепло- і масообміну у шаруватих капілярно-пористих тілах, а також для розроблення більш досконалих алгоритмів керування штучним мікрокліматом приміщень музею на основі сучасних інформаційних технологій та нечітких логічних регуляторів/контролерів, як на стадіях проектування (конструювання) систем штучного інтелекту управління мікрокліматом музейних приміщень, так і у режимах їх реальних експлуатацій.*

*Ключові слова: концепція, аналіз, тепло- і масообмін, шаруватість, капілярно-пористі тіла, модель, плита, художнє полотно, музейні експонати.*

### Постановка проблеми

Явище контактного тепло- і масообміну між матеріалами різної фізико-хімічної структури широко використовується у різних галузях промисловості, наприклад, у хімічній (при сушінні добрив). Тому виникає необхідність дослідження кінетики сушки шаруватих капілярно-пористих тіл. Теоретично це питання зводиться до визначення полів двох типів (температури і вологи) для шаруватих плит із заданими тепловими і вологісними режимами на їх поверхнях і з'ясуванню того, яким чином впливають на ці поля різні тепло- і масообмінні характеристики тіл, котрі приймають участь у контактному тепло- і масообміні.

### Аналіз дослідження і публікацій

Нестационарна задача конвективного тепло- й масообміну двошаруватої плити була розв'язана Г.А. Ореховим [1], а цієї ж плити з граничними умовами другого роду – у роботі [2]. При цьому автор вказаних публікацій використав підходи, розвинуті у роботах Ликова А.В. та ін. [3-5]. Проте авторами цитованих вище робіт не дано розв'язку нестационарної задачі тепло- і масообміну пусково-однорідної необмеженої двошаруватої плити, яка однією поверхнею приймає участь у конвективному тепло- і масообміні з оточуючим середовищем з постійними потенціалами тепло- і масоперееносу, а іншою поверхнею тепло- і вологоізолюваною. Крім того, не з'ясований вплив окремих тепло- і масообмінних критеріїв на тепло- і масопереенос у самій плиті. Саме в такій постановці формується задача аналізу процесів тепло- і масообміну експонатів музею (художніх картин), які виставлені у їх приміщеннях, і знаходяться під постійним впливом температурних і вологісних полів, що виникають внаслідок наявності потоків відвідувачів цих музеїв.

**Мета роботи** полягає у розв'язку аналітичними методами нестационарної задачі тепло- і масопровідності кусково-однорідної необмеженої двошаруватої плити (модель художньої картини, виставленої в приміщенні музею, до якого рухається потік відвідувачів музею) яка однією поверхнею приймає участь у конвективному тепло- і масообміні з оточуючим середовищем (по суті, це приміщення музею і потік його відвідувачів) з постійними потенціалами

тепло- й масопереносу, а іншою поверхнею, що є тепло- та вологоізольована, контактує зі стінкою приміщення музею. У результаті розв'язку даної задачі можна встановити вплив окремих тепло- й масообмінних критеріїв на тепло- й масоперенос у даній плиті.

### Виклад основного змісту дослідження

1. Розв'язок задачі для граничних умов третього роду.

Розглянемо необмежену кусково-однорідну двошарувату плиту з товщиною першого прошарку  $\ell_1$  й другого  $\ell_2$ , яка приймає участь у конвективному тепло- і масообміні з оточуючим середовищем, потенціали тепло- і масопереносу котрого постійні й дорівнюють, відповідно,  $t_c$  й  $\theta_c$ . (Перший прошарок  $\ell_1$  моделює основу художньої картини, а другий, товщиною  $\ell_2$ , описує прошарок фарб, які нанесені на основу митцем (майстром пензля минулих століть). У початковий момент часу температура й потенціал масопереносу плити постійні й дорівнюють, відповідно,  $t_0$  й  $\theta_0$ . Під дією потенціалів  $t_0$  й  $\theta_0$  у плиті виникають температурне і вологісне поля, котрі визначаються системою диференціальних рівнянь сушіння 1, що записана для кожного прошарку плити. Якщо початок координат обирати кожний раз на лівій поверхні кожного прошарку, то ця система приймає вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\sigma t_i(\bar{x}_i, \tau)}{\sigma \tau} = a_i \cdot \nabla t_i(\bar{x}_i, \tau) + \frac{\varepsilon_i \rho_i c_{mi}}{c_i} \cdot \frac{\sigma \theta_i(\bar{x}_i, \tau)}{\sigma \tau}, \\ \frac{\sigma \theta_i(\bar{x}_i, \tau)}{\sigma \tau} = a_{mi} \cdot \nabla^2 \theta_i(\bar{x}_i, \tau) + a_{mi} \cdot \delta_i + a_{mi} \cdot \delta_i \cdot \nabla^2 t_i(\bar{x}_i, \tau), \quad i = (1, 2). \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови задач складаються з наступних:

1) початкових умов:  $t_i(\bar{x}_i, 0) = t_0$ ,  $\theta_i(\bar{x}_i, 0) = \theta_0$ ; 2) граничних умов на лівій поверхні:  $-\lambda_1 \cdot \nabla t_1(0, \tau) + \alpha \cdot [t_c - t_1(0, \tau)] - (1 - \varepsilon_1) \rho_1 \cdot \beta \cdot [\theta_1(0, \tau) - \theta_c] = 0$ ;

$\lambda_{m1} \cdot \nabla \theta_1(0, \tau) + \lambda_{m1} \cdot \delta_1 \cdot \nabla t_1(0, \tau) + \beta \cdot [\theta_1(0, \tau) - \theta_c] = 0$ , й на правій поверхні плити:  $\lambda_{m2} \cdot \nabla t_2(\ell_2, \tau) = 0$ ,  $\lambda_{m2} \cdot \nabla \theta_2(\ell_2, \tau) + \lambda_{m2} \cdot \delta_2 \cdot \nabla t_2(\ell_2, \tau) = 0$ ; 3) умов спряження температурного і вологісного полів у місці дотику прошарків:

$t_1(\ell_1, \tau) = t_2(0, \tau)$ ,  $\theta_1(\ell_1, \tau) = \theta_2(0, \tau)$ ,  $\lambda_1 \cdot \nabla t_1(\ell_1, \tau) = \lambda_2 \cdot \nabla t_2(0, \tau)$ ,  $\lambda_{m1} \cdot [\nabla \theta_1(\ell_1, \tau) + \delta_1 \cdot \nabla t_1(\ell_1, \tau)] = \lambda_{m2} \cdot [\nabla \theta_2(0, \tau) + \delta_2 \cdot \nabla t_2(0, \tau)]$ .

Будемо розшукувати розподіл температури і вологи по поперечному перерізу плити у довільний момент часу. Тут, у (1), а також вищенаведені наступні позначення:  $t$  – температура;  $\theta$  – потенціал переносу речовини;  $\tau$  – час;  $\ell$  – товщина прошарку;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності;  $a_m$  – коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу;  $\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт;  $c$  – питома теплоємність;  $c_m$  – питома масоємність;  $\rho$  – питома теплота фазового переходу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\lambda_m$  – коефіцієнт масопровідності;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $\beta$  – коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці питомих масоємностей.

Перепишемо систему рівнянь (1) й граничні умови для безрозмірних величин. Якщо ввести безрозмірні потенціали тепло- й масопереносу  $T_i = \frac{t_i - t_c}{t_c - t_0}$ ,  $\theta_i = \frac{\theta_i - \theta_c}{\theta_0 - \theta_c}$ , безрозмірну координату

$X_i = \frac{\bar{x}_i}{\ell_i}$  й безрозмірний час  $F_0 = \frac{a_i \cdot \tau}{\ell_i^2}$ , тоді система рівнянь (1) приймає вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\sigma T_i}{\sigma F_0} = \frac{a_i}{a_1} \cdot \frac{\sigma^2 T_i}{\sigma x_i^2} - \frac{\varepsilon_i \cdot \rho_i \cdot c_{mi}}{c_i} \cdot \frac{(\theta_0 - \theta_c)}{(t_c - t_0)} \cdot \frac{\sigma \theta_i}{\sigma F_0}, \\ \frac{\sigma \theta_i}{\sigma F_0} = \frac{a_{mi}}{a_1} \cdot \frac{\sigma^2 \theta_i}{\sigma x_i^2} - \frac{a_{mi} \cdot \delta_i}{a_1} \cdot \frac{(t_c - t_0)}{(\theta_0 - \theta_c)} \cdot \frac{\sigma^2 T_i}{\sigma x_i^2}. \end{cases} \quad (2)$$

При введенні тепло- й масообмінних критеріїв система рівнянь (2) приймає вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\sigma T_1}{\sigma F_0} = \frac{\sigma^2 T_1}{\sigma x_1^2} - K_{01}^* \cdot \frac{\sigma \theta_1}{\sigma F_0}; \quad \frac{\sigma \theta_1}{\sigma F_0} = Lu_1 \cdot \left( \frac{\sigma^2 \theta_1}{\sigma x_1^2} - \rho_{n1} \cdot \frac{\sigma^2 T_1}{\sigma x_1^2} \right); \\ \frac{\sigma T_2}{\sigma F_0} = K_0^{-1} \cdot \frac{\sigma^2 T_2}{\sigma x_2^2} - K_{02}^* \cdot \frac{\sigma \theta_2}{\sigma F_0}; \quad \frac{\sigma \theta_2}{\sigma F_0} = K_a^{-1} \cdot Lu_2 \cdot \left( \frac{\sigma^2 \theta_2}{\sigma x_2^2} - \rho_{n2} \cdot \frac{\sigma^2 T_2}{\sigma x_2^2} \right). \end{cases} \quad (3)$$

У (3) прийняті наступні позначення:  $K_0^* = \varepsilon \cdot K_0$ ,  $K_0$  – критерій Коссовича,  $K_\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ ,  $F_0$  – критерій Фур'є,  $Lu$  – критерій інерційності,  $\rho_n$  – критерій Поснова,  $\varepsilon$  – критерій фазового перетворення. Аналогічним чином отримаємо у безрозмірному вигляді:

а) початкові умови  $T_i(x_i, 0) = 0, \theta_i(x_i, 0) = 0$ ; б) граничні умови на лівій поверхні плити:

$$\begin{cases} -\nabla T_1(0, F_0) + Bi \cdot [1 - T_1(0, F_0)] - A \cdot Bi_m \cdot [1 - \theta_1(0, F_0)] = 0, \\ -\nabla \theta_1(0, F_0) + \rho_{n1} \cdot \nabla T_1(0, F_0) + Bi_m \cdot [1 - \theta_1(0, F_0)] = 0, A = K_0 \cdot Lu_1 \cdot (1 - \varepsilon_1), \end{cases} \quad (4)$$

де:  $Bi$  – теплообмінний критерій Біо;  $Bi_m$  – масообмінний критерій Біо. На правій поверхні плити маємо:

$$\lambda_{m2} \cdot \nabla T_2(K_\ell^{-1}, F_0) = 0, -\lambda_{m2} \cdot \nabla \theta_2(K_\ell^{-1}, F_0) + \lambda_{m2} \cdot \rho_{n2} \cdot \nabla T_2(K_\ell^{-1}, F_0) = 0;$$

б) умови створення:

$$\begin{aligned} T_1(1, F_0) = T_2(0, F_0), \theta_1(1, F_0) = \theta_2(0, F_0), K_\lambda \cdot \nabla T_1(1, F_0) = \nabla T_2(0, F_0), \\ K_{\lambda m} \cdot [\nabla \theta_1(1, F_0) - \rho_{n1} \cdot \nabla T_1(1, F_0)] = \nabla \theta_2(0, F_0) - \rho_{n2} \cdot \nabla T_2(0, F_0). \end{aligned}$$

Тут введені наступні позначення:  $K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, K_{\lambda m} = \frac{\lambda m_1}{\lambda m_2}, K_\ell = \frac{\ell_1}{\ell_2}$ .

Перетворимо систему рівнянь (3) до незв'язних рівнянь типу Фур'є. Виконаємо над рівняннями системи (3) перетворення, аналогічні до проведених у [6], отримаємо чотири незв'язних рівняння типу Фур'є:

$$\frac{\sigma^2 Z_{ij}}{\sigma x_i^2} = k_{ij}^2 \cdot \frac{\sigma Z_{ij}}{\sigma F_0}, (i, j) = (1, 2)$$

відносно комбінованих функцій:

$$Z_{11} = T_1 + n_1 \cdot \theta_1, Z_{12} = m_2 \cdot T_1 + \theta_1, Z_{21} = T_2 + n_3 \cdot \theta_2, Z_{22} = m_4 \cdot T_2 + \theta_2, \quad (5)$$

де  $k_{i1}^2$  й  $k_{i2}^2$  є коренями рівняння:

$$k^4 - (1 - \rho_{n1} \cdot K_{0i}^* + L_{ui}^{-1}) \cdot k^2 + L_{ui}^{-1} = 0, i = \overline{(1, 2)}, \quad (6)$$

а  $n_1, m_2, n_3, m_4$  – відповідно дорівнюють:

$$n_1 = \frac{k_{11}^2 - 1}{\rho_{n1}}, m_2 = \frac{\rho_{n1}}{k_{12}^2 - 1}, n_3 = \frac{k_{21}^2 - 1}{\rho_{n2}}, m_4 = \frac{\rho_{n2}}{k_{22}^2 - 1}. \quad (7)$$

Перетворимо граничні умови для комбінованих функцій. Легко зрозуміти, що  $Z_{11}(x_1, 0) = T_1(x_1, 0) + n_1 \cdot \theta_1(x_1, 0) = 0, Z_{12}(x_1, 0) = 0, Z_{21}(x_2, 0) = 0, Z_{22}(x_2, 0) = 0$ .

Перепишемо граничні умови на лівій поверхні плити наступним чином:

$$\begin{aligned} \nabla T_1 = -B_i \cdot T_1 + B_{im} + A \cdot \theta_1 + B_\ell - A \cdot B_{im}, \\ \nabla \theta_1 = -B_i \cdot \rho_{n1} \cdot T_1 + B_{im} \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1) \cdot \theta_1 + B_i \cdot \rho_{n1} - B_{im} \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1). \end{aligned}$$

Помножимо першу рівність на  $p$ , а другу на  $q$  й результати складемо, тоді матимемо:

$$\begin{aligned} \nabla(pT_1 + q \cdot \theta_1) = -B_i \cdot (p + q \cdot \rho_{n1}) \cdot T_1 + B_{im} \cdot [pA + q \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1)] \cdot \theta_1 + \\ + B_i \cdot (p + q \cdot \rho_{n1}) - B_{im} \cdot [pA + q \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1)]. \end{aligned}$$

Щоб і у правій частині рівності була також комбінована функція, необхідно виконати умову:

$$\frac{-B_i \cdot (p + q \cdot \rho_{n1})}{p} = \frac{B_{im} \cdot [pA + q \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1)]}{q} = \bar{K}^2,$$

Виключаючи з цих співвідношень  $p$  та  $q$ , отримаємо квадратне рівняння відносно  $\bar{K}^2$ :

$$\bar{K}^4 + [B_i - B_{im} \cdot (A \cdot \rho_{n1} - 1)] \cdot \bar{K}^2 + B_{im} \cdot B_i = 0, \quad (8)$$

а знаючи корені  $\bar{K}_{11}^2$  й  $\bar{K}_{12}^2$ , знайдемо [7] значення чисел  $p$  та  $q$ , а також  $p_1, p_2, q_1, q_2$ . Якщо корені рівняння (5) співпадають з коренями рівняння (7) тоді можливе [7] одночасне перетворення й системи рівнянь й граничних умов. Нехай ця ситуація існує, тобто  $\bar{K}_{11}^2 = \bar{K}_{11}^2, \bar{K}_{12}^2 = \bar{K}_{12}^2$ . Тоді  $p_1 = m_1 = 1, q_1 = n_1, p_2 = m_2, q_2 = n_2 = 1$ . Граничні умови на лівій поверхні плити приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla Z_{11}(0, F_0) &= \bar{K}_{11}^2 \cdot [Z_{11}(0, F_0) - (1 + n_1)], \\ \nabla Z_{12}(0, F_0) &= \bar{K}_{12}^2 \cdot [Z_{12}(0, F_0) - (1 + m_2)]. \end{aligned}$$

Граничні умови на правій поверхні плити із урахуванням рівностей (4) записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} \lambda m_2 \cdot \nabla Z_{21}(K_\xi^{-1}, F_0) - n_3 \cdot \lambda m_2 \cdot \nabla Z_{22}(K_\xi^{-1}, F_0) &= 0, \\ \lambda m_2 \cdot \nabla Z_{22}(K_\xi^{-1}, F_0) - m_4 \cdot \lambda m_2 \cdot \nabla Z_{21}(K_\xi^{-1}, F_0) &= 0. \end{aligned}$$

Оскільки визначник цієї системи відмінний від нуля, тоді система має нульовий розв'язок, тобто:

$$\nabla Z_{21}(K_\xi^{-1}, F_0) = 0, \quad \nabla Z_{22}(K_\xi^{-1}, F_0) = 0.$$

Простим перерахунком отримаємо умови спряження на стику прошарків:

$$\begin{aligned} Z_{11}(1, F_0) - n_1 \cdot Z_{12}(1, F_0) &= \bar{q} \cdot [Z_{21}(0, F_0) - n_3 \cdot Z_{22}(0, F_0)], \\ -m_2 \cdot Z_{11}(1, F_0) + Z_{12}(1, F_0) &= \bar{q} \cdot [-m_4 \cdot Z_{21}(0, F_0) + Z_{22}(0, F_0)], \\ K_\lambda \cdot [\nabla Z_{11}(1, F_0) - n_1 \cdot \nabla Z_{12}(1, F_0)] &= \bar{q} \cdot [Z_{21}(0, F_0) - n_3 \cdot \nabla Z_{22}(0, F_0)], \\ K_{\lambda m} \cdot [(m_2 + \rho_{n1}) \cdot \nabla Z_{11}(1, F_0) - (1 + n_1 \cdot \rho_{n1}) \nabla Z_{12}(1, F_0)] &= \\ = \bar{q} \cdot [(m_4 + \rho_{n2}) \cdot \nabla Z_{21}(0, F_0) - (1 + n_3 \cdot \rho_{n2}) \cdot \nabla Z_{22}(0, F_0)], \end{aligned}$$

де  $K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, K_{\lambda m} = \frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}}, K_\xi = \frac{\xi_2}{\xi_1}, \bar{q} = \frac{1 - n_3 m_2}{1 - n_3 m_4}$ .

Розв'яжемо незв'язні рівняння типу Фур'є. Для цього до кожного з рівнянь застосуємо перетворення Лапласа по безрозмірному часу  $F_0$ . У результаті матимемо чотири звичайних диференціальних рівняння з постійними коефіцієнтами відносно зображень комбінованих функцій, розв'язки котрих по  $S$  (параметр перетворення Лапласа) мають наступний вигляд:

$$Z_{ij}(x_i, S) = A_{ij} \cdot ch\{K_{ij} \cdot \sqrt{S} \cdot x_i\} + B_{ij} \cdot sh\{K_{ij} \cdot \sqrt{S} \cdot x_i\}, (i, j) = (1, 2).$$

Коефіцієнт  $A_{1i}, B_{1i}, A_{2i}, B_{2i}$  визначимо з граничних умов, переписаних для зображень комбінованих функцій. Виконавши всі необхідні перетворення, матимемо наступні вирази для зображень комбінованих функцій:

$$\begin{aligned} Z_{1i}(x_1, S) &= \frac{1}{SR} \cdot [A_i \cdot ch K_{1i} \sqrt{S}(1 - x_1) \cdot B_i \cdot sh K_{1i} \sqrt{S}(1 - x_1) + c_i(\sqrt{S} \cdot ch K_{1i} \sqrt{S} x_1 + \\ &+ K_{1i} \cdot sh K_{1i} \sqrt{S} x_1)]; Z_{2i}(x_2, S) = \frac{C_3}{SR} \cdot A_i \cdot ch K_{2i} \cdot K_\alpha^{\frac{1}{2}} \sqrt{S} \cdot (K_\xi^{-1} - x_2); i = (1, 2). \end{aligned}$$

Знайдені зображення представляють собою відношення узагальнених поліномів відносно  $S$ , причому ми знаходимося в умовах можливості застосування теореми розкладу [5]:

$$Z_{ij}(x_i, F_0) = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{\phi_{ij}(S)}{\psi'(S)} \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_{ij}(S_n)}{\psi'(S_n)} \cdot \exp(S_n \cdot F_0).$$

$\phi_{ij}(S)$  є узагальнений поліном, який стоїть у чисельнику відповідного зображення, а  $\psi'(S)$  – у знаменнику;  $S = 0$  й  $S = S_n$  є простими коренями рівняння  $\psi'(S) = SR = 0$ .

Виконавши операції, які вказані у теоремі розкладу, матимемо наступні вирази для оригіналів комбінованих функцій:

$$\begin{aligned} Z_{11}(x_1, F_0) &= 1 + n_1 + 2K_\ell \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [A_1(S_n) \cdot ch K_{11}\sqrt{S_n}(1-x_1) + B_1(S_n) \cdot sh K_{11}\sqrt{S_n}(1-x_1) + \\ &\quad + C_1(S_n)(\sqrt{S_n} \cdot ch K_{11}\sqrt{S_n} \cdot x_1 + K_{11} \cdot sh K_{11}\sqrt{S_n} \cdot x_1)] \cdot \frac{\exp(S_n \cdot F_0)}{\sqrt{S_n} \cdot R'(S_n)}; \\ Z_{12}(x_1, F_0) &= 1 + m_2 + 2K_\ell \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [A_2(S_n) \cdot ch K_{12}\sqrt{S_n}(1-x_1) + B_2(S_n) \cdot sh K_{12}\sqrt{S_n}(1-x_1) + \\ &\quad + C_2(S_n)(\sqrt{S_n} \cdot ch K_{12}\sqrt{S_n} \cdot x_1 + K_{12} \cdot sh K_{12}\sqrt{S_n} \cdot x_1)] \cdot \frac{\exp(S_n \cdot F_0)}{\sqrt{S_n} \cdot R'(S_n)}; \\ Z_{21}(x_2, F_0) &= 1 + n_3 + 2C_6 \cdot K_\ell \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A'_1(S_n) ch K_{21} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{S_n} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2)}{\sqrt{S_n} \cdot R'(S_n)} \cdot \exp(S_n \cdot F_0); \\ Z_{22}(x_2, F_0) &= 1 + m_4 + 2C_6 \cdot K_\ell \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A'_2(S_n) ch K_{22} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{S_n} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2)}{\sqrt{S_n} \cdot R'(S_n)} \cdot \exp(S_n \cdot F_0). \end{aligned}$$

Перейдемо далі до визначення потенціалів тепло- і масопереносу. У характеристичному рівнянні  $R = 0$  й у розв'язках для оригіналів комбінованих функцій, враховуючи рівності  $ch x = \cos(ix)$ ,  $sh x = -i \sin x$ ,  $i^2 = -1$ , гіперболічні функції замінюємо тригонометричними, позначаючи при цьому  $i\sqrt{s} = \mu$ ; комбіновані функції замінюємо згідно рівностей (4) й отримані системи розв'яжемо відносно шуканих потенціалів тепло- й масопереносу. Насамкінець, у отриманих розв'язках і у характеристичному рівнянні замінюємо скрізь  $n_1, m_2, n_3, m_4$  їх значеннями згідно формули (6). Тоді, виконавши всі необхідні перетворення й спрощення, матимемо розв'язки задачі у наступному кінцевому вигляді:

$$\begin{aligned} T_1(x_1, F_0) &= 1 - \frac{2 \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot K_\ell}{\rho_{n1} \cdot C_3} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(K_{11}^2 - 1) \cdot B_n \cdot \cos(K_{12}\mu_n x_1 - \alpha_{2n})}{a_{3n} \cdot \cos \alpha_{2n}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(K_{12}^2 - 1) \cdot A_n \cdot \cos(K_{11}\mu_n x_1 - \alpha_{1n})}{a_{1n} \cdot \cos \alpha_{1n}} \right] \cdot \frac{\exp(-\mu_n^2 \cdot F_0)}{R_n}; \\ \theta_1(x_1, F_0) &= 1 - \frac{2K_a^{\frac{1}{2}} \cdot K_\ell}{C_3} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{A_n \cdot \cos(K_{11}\mu_n x_1 - \alpha_{1n})}{a_{1n} \cdot \cos \alpha_{1n}} - \frac{B_n \cdot \cos(K_{12}\mu_n x_1 - \alpha_{2n})}{a_{3n} \cdot \cos \alpha_{2n}} \right] \cdot \\ &\quad \cdot \frac{\exp(-\mu_n^2 \cdot F_0)}{R_n}; \\ T_2(x_2, F_0) &= 1 - 2K_\ell \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[ C_n \cdot (K_{22}^2 - 1) \cos K_{21}\mu_n K_a^{\frac{1}{2}} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2) - \right. \\ &\quad \left. D_n \cdot (K_{21}^2 - 1) \cos K_{22}\mu_n K_a^{\frac{1}{2}} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2) \right] \cdot \frac{\exp(-\mu_n^2 \cdot F_0)}{R_n}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta_2(x_2, F_0) = 1 - 2K_\ell \cdot \rho_{n2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ D_n \cos K_{22} \mu_n K_a^{\frac{1}{2}} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2) - C_n \cdot \cos K_{21} \mu_n K_a^{\frac{1}{2}} \cdot (K_\ell^{-1} - x_2) \right] \cdot \frac{\exp(-\mu_n^2 \cdot F_0)}{R_n}$$

де

$$A_n = K_{11} K_{21} K_{22} \cdot C_1 C_3 C_4 a_{1n} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} \cdot \sin K_{22} v_n \cdot \sin K_{21} v_n + K_{12} \cdot (K_{21} b_3 c_{1n} \sin K_{21} v_n \cdot \cos K_{22} v_n - K_{22} b_3 c_{2n} \cos K_{21} v_n \cdot \sin K_{22} v_n);$$

$$B_n = K_{12} K_{21} K_{22} \cdot C_2 C_3 C_4 a_{2n} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} \cdot \sin K_{21} v_n \cdot \sin K_{22} v_n + K_{11} \cdot (K_{21} b_4 c_{1n} \sin K_{21} v_n \cdot \cos K_{22} v_n - K_{22} b_4 c_{2n} \cos K_{21} v_n \cdot \sin K_{22} v_n);$$

$$C_n = K_{11} \cdot K_{12} \cdot C_{1n} \cdot K_\lambda \cdot K_{\lambda m} \cdot \cos K_{22} v_n - K_{22} \cdot C_{3n} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \sin K_{22} v_n;$$

$$D_n = K_{11} \cdot K_{12} \cdot C_{2n} \cdot K_\lambda \cdot K_{\lambda m} \cdot \cos K_{21} v_n - K_{21} \cdot C_{4n} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \sin K_{21} v_n;$$

$$R_n = (K_{11} K_{12} C_3 C_4 C_{5n} K_\lambda K_{\lambda m} K_\ell \rho_{n1} \rho_{n2} - K_{12} a_{2n} a_{3n} b_6 K_a + K_{11} a_{1n} a_{4n} b_6 K_a) \cdot \cos K_{21} v_n \cdot \cos K_{22} v_n - K_{21} K_{22} \cdot K_a \cdot (C_3 C_4 \cdot C_{6n} \cdot K_\ell \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} - K_{12} a_{2n} a_{3n} b_5 + K_{11} a_{1n} a_{4n} b_5) \cdot \sin K_{21} v_n \cdot \sin K_{22} v_n + K_{21} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} (C_3 C_4 \omega_{1n} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} - K_{12} C_{7n} b_2 b_3 K_\ell + K_{11} \cdot C_{8n} \cdot b_1 b_4 K_\ell) \cdot \sin K_{21} v_n \cdot \cos K_{22} v_n + K_{22} \cdot K_a^{\frac{1}{2}} (C_3 C_4 \rho_{n1} \omega_{2n} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} + K_{12} C_{7n} b_2 b_3 K_\ell - K_{11} \cdot C_{8n} \cdot b_1 b_4 K_\ell) \cos K_{21} v_n \cdot \sin K_{22} v_n;$$

$$a_{1n} = K_{11} \cdot \cos K_{11} \mu_n - \mu_n \cdot \sin K_{11} \mu_n; a_{2n} = \mu_n \cos K_{11} \mu_n + K_{11} \sin K_{11} \mu_n;$$

$$a_{3n} = K_{12} \cos K_{12} \mu_n - \mu_n \cdot \sin K_{12} \mu_n; a_{4n} = \mu_n \cos K_{12} \mu_n + K_{12} \sin K_{12} \mu_n;$$

$$a_{5n} = \sin K_{11} \mu_n + K_{11} \cdot a_{2n}; a_{6n} = \sin K_{12} \mu_n + K_{12} \cdot a_{4n}; a_{7n} = \cos K_{11} \mu_n + K_{11} a_{1n};$$

$$a_{8n} = \cos K_{12} \mu_n + K_{12} a_{3n}; b_1 = \rho_{n2} \cdot (K_{11}^2 - 1) - \rho_{n1} \cdot (K_{21}^2 - 1);$$

$$b'_1 = \rho_{n2} \cdot (K_{11}^2 - 1) - \rho_{n1} \cdot (K_{22}^2 - 1); b_2 = \rho_{n2} \cdot (K_{12}^2 - 1) - \rho_{n1} \cdot (K_{21}^2 - 1);$$

$$b'_2 = \rho_{n2} \cdot (K_{12}^2 - 1) - \rho_{n1} \cdot (K_{22}^2 - 1); b_3 = K_\lambda \cdot \rho_{n2} \cdot K_{21}^2 (K_{11}^2 - 1) - K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} K_{11}^2 \cdot (K_{22}^2 - 1);$$

$$b'_3 = K_\lambda \cdot \rho_{n2} \cdot K_{22}^2 (K_{11}^2 - 1) - K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} K_{11}^2 \cdot (K_{22}^2 - 1);$$

$$b_4 = K_\lambda \cdot \rho_{n2} \cdot K_{22}^2 (K_{12}^2 - 1) - K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} K_{12}^2 \cdot (K_{22}^2 - 1);$$

$$b'_4 = K_\lambda \cdot \rho_{n2} \cdot K_{21}^2 (K_{12}^2 - 1) - K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} K_{12}^2 \cdot (K_{12}^2 - 1);$$

$$b'_4 = K_\lambda \cdot \rho_{n2} \cdot K_{22}^2 (K_{12}^2 - 1) - K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} K_{12}^2 \cdot (K_{12}^2 - 1);$$

$$b_5 = b_1 b_4 - b_1 b'_4; b'_5 = b_2 b_3 - b_2 b'_3; b_6 = K_{21}^2 \cdot b_1 b_4 - K_{22}^2 \cdot b_1 b'_4;$$

$$b'_6 = K_{21}^2 \cdot b_2 b_3 - K_{22}^2 \cdot b_2 b'_3; C_1 = \rho_{n1} + K_{11}^2 - 1; C_2 = \rho_{n1} + K_{12}^2 - 1;$$

$$C_3 = K_{12}^2 - K_{11}^2; C_4 = K_{22}^2 - K_{21}^2; C_{1n} = K_{11} \cdot a_{3n} \cdot C_1 \cdot b_2 - K_{12} \cdot a_{1n} \cdot C_2 \cdot b_1;$$

$$C_{2n} = K_{11} \cdot a_{3n} \cdot C_1 \cdot b_2 - K_{12} \cdot a_{1n} \cdot C_2 \cdot b_1; C_{3n} = K_{11}^2 \cdot a_{4n} \cdot C_1 \cdot b_4 - K_{12}^2 \cdot a_{2n} \cdot C_2 \cdot b_3;$$

$$C_{4n} = K_{11}^2 \cdot a_{4n} \cdot C_1 \cdot b_4 - K_{12}^2 \cdot a_{2n} \cdot C_2 \cdot b_3; C_{5n} = a_{3n} \cdot a_{5n} + a_{1n} \cdot a_{6n};$$

$$C_{6n} = a_{4n} \cdot a_{7n} + a_{2n} \cdot a_{8n}; \omega_{1n} = K_{11} K_{12} a_{1n} a_{3n} \cdot K_\lambda \cdot K_{\lambda m} - K_{22}^2 \cdot a_{2n} \cdot a_{4n} \cdot K_a;$$

$$\omega_{2n} = K_{11} K_{12} a_{1n} a_{3n} \cdot K_{\lambda m} - K_{21}^2 \cdot a_{2n} \cdot a_{4n} \cdot K_a; d_n = \arctg \left( \frac{K_{ij}}{\mu_n} \right), i = (1,2);$$

$$v_n = K_a^{\frac{1}{2}} \cdot K_\ell \cdot K_\ell^{-1} \cdot \mu_n$$

а  $\mu_n$  є коренем рівняння:

$$\begin{aligned} & K_{11} K_{12} C_3 C_4 a_1 a_3 \cdot K_\lambda \cdot K_{\lambda m} \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} + K_{12} a_2 a_3 \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot \\ & \cdot (K_{21} b_2 b_3 \cdot \operatorname{tg} K_{21} v - K_{22} b_2 b_3 \cdot \operatorname{tg} K_{22} v) - \\ & - K_{11} a_1 a_4 \cdot K_a^{\frac{1}{2}} \cdot (K_{21} b_1 b_4 \cdot \operatorname{tg} K_{21} v - K_{22} b_1 b_4 \cdot \operatorname{tg} K_{22} v) + \\ & + K_{21} \cdot K_{22} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot a_4 \cdot K_a \cdot \rho_{n1} \cdot \rho_{n2} \cdot \\ & \cdot \operatorname{tg} K_{21} v \cdot \operatorname{tg} K_{22} v = 0, \end{aligned} \tag{10}$$

$$a_1 = K_{11} - \mu_n \cdot \operatorname{tg} K_{11} \mu; a_2 = \mu + K_{11} \cdot \operatorname{tg} K_{11} \mu; a_3 = K_{12} - \mu \cdot \operatorname{tg} K_{12} \mu;$$

$$a_4 = \mu + K_{12} \cdot \operatorname{tg} K_{12} \mu; v = K_a^{\frac{1}{2}} \cdot K_f^{-1} \cdot \mu.$$

Чисельний та графічний аналіз потенціалів тепло- й масопереносу.

Побудуємо за допомогою ПЕОМ поля потенціалів тепло- і масопереносу. Зокрема, поля потенціалів переносу тепла  $T$  й маси  $\theta$  побудуємо для критерію  $\varepsilon_1$ , який приймає значення 0,1; 0,2; 0,5, й значення параметрів  $K_{11}$  й  $K_{12}$  для вказаних значень критеріїв  $\varepsilon_1$  й  $L_{u1}$ . Характеристичне рівняння (9) розв'язане графоаналітичним методом. Оскільки ряди у розв'язках (8) швидко збігаються, тоді у кожному з них утримуємо тільки два перших члени. Тому знайдено тільки два перших кореня рівняння (9). На рис. 1 поданий графік лівої частини рівняння (9) (позначеної через  $f(\mu)$ ) на відрізку  $\mu \in [0; 0,12]$  для наступних значень тепло- й масообмінних критеріїв:

$K_a = 0,25; K_\lambda = 0,6; K_{am} = 0,4; \rho_{n2} = 0,05; L_{u2} = 0,45; \varepsilon_1 = 0,1; \rho_{n1} = 0,1; L_{u1} = 0,1$  й параметрів  $K_{11} = 3,1644; K_{12} = 0,99937; K_{21} = 1,5679; K_{22} = 0,9508$ . У таблицях 2 та 3 дані значення коренів характеристичного рівняння, коефіцієнтів  $a_{1i}, a_{3i}$  й коефіцієнтів розв'язку для різних значень критеріїв  $\varepsilon_1, L_{u1}$ , а на рис. 2 та рис. 3 – графіки потенціалів  $T$  й  $\theta$  для цих значень.

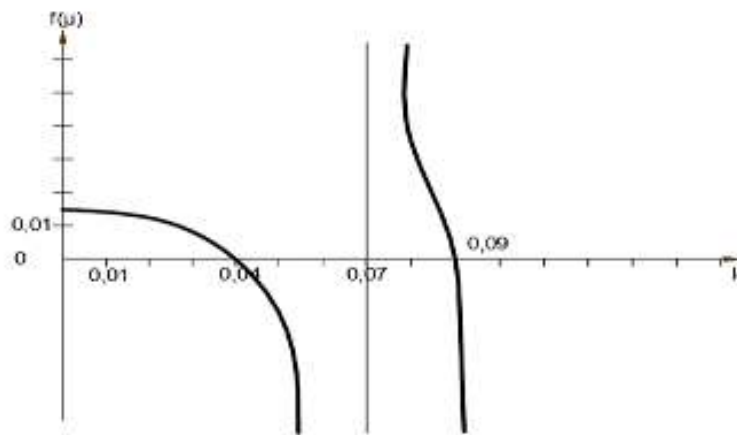


Рисунок 1 – Графік лівої частини рівняння (9)

Таблиця 1

Значення параметрів у залежності від  $L_{u1}$  і  $\varepsilon_1$

$K_{ij}$	$\varepsilon_1 = 0,1; \rho_{n1} = 0,1.$			$\rho_{n1} = 0,1; L_{u1} = 1.$	
	$L_{u1} = 0,1$	$L_{u1} = 0,3$	$L_{u1} = 0,5$	$\varepsilon_1 = 0,2$	$\varepsilon_1 = 0,5$
$K_{11}$	3,16440	1,83050	1,42260	3,16660	3,17280
$K_{12}$	0,99937	0,99739	0,99413	0,99870	0,99667

Таблиця 2

Значення коренів характеристичного рівняння й постійних коефіцієнтів у залежності від  $L_{u1}$

$L_{u1}$	$n$	$\rho_{n1} = 0,1; \varepsilon_1 = 0,1.$							
		$\mu_{n1}$	$a_{1n}$	$a_{3n}$	$A_n$	$B_n$	$C_n$	$D_n$	$R_n$
0,1	1	0,043887	3,1279	0,99645	-1,070500	-0,003166	-0,264020	0,011880	0,223070
	2	0,111510	2,9308	0,98071	-0,016620	0,002083	0,011129	0,008286	-0,014125
0,3	1	0,041307	1,82221	0,99479	-0,041228	0,000224	-0,023480	0,01130	0,002146
	2	0,111000	1,7703	0,96328	-0,000933	0,000402	0,001435	0,001139	-0,002252
0,5	1	0,039097	1,4181	0,99182	-0,005976	0,000020	-0,006297	0,000318	0,000616
	2	0,110960	1,3875	0,97579	-0,000080	0,000110	0,000542	0,000387	-0,000684

Значення коренів характеристичного рівняння й постійних коефіцієнтів у залежності від  $L_{u1}$

$\varepsilon_1$	n	$\rho_{n1} = 0,1; L_{u1} = 1.$							
		$\mu_n$	$\alpha_{1n}$	$\alpha_{2n}$	$A_n$	$B_n$	$C_n$	$D_n$	$R_n$
0,2	1	0,043892	3,1298	0,99578	-1,073300	-0,002674	-0,264360	0,011976	0,022342
	2	0,111480	2,9326	0,98006	-0,017240	0,002152	0,010852	0,008521	-0,022547
0,5	1	0,043882	3,1298	0,99578	-1,083200	-0,001109	-0,265910	0,012284	0,022423
	2	0,111390	2,9332	0,98008	-0,017000	0,002342	0,012000	0,009130	-0,022649

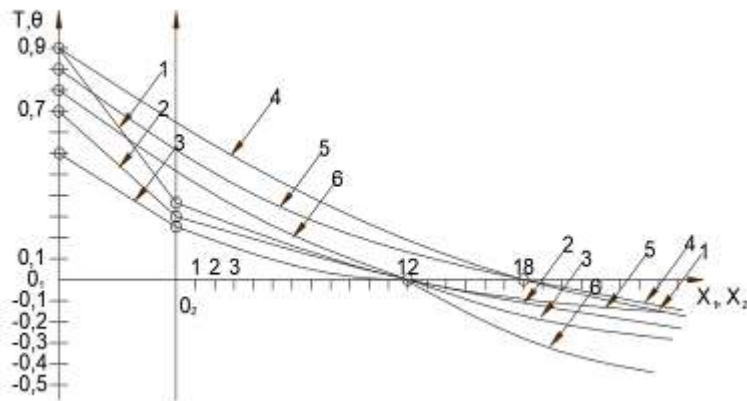


Рисунок 2 – Графіки потенціалів 1 –  $\theta (L_{u1} = 0,1)$ ; 2 –  $\theta (L_{u1} = 0,3)$ ; 3 –  $\theta (L_{u1} = 0,5)$ ; 4 –  $T (L_{u1} = 0,5)$ ; 5 –  $T (L_{u1} = 0,3)$ ; 6 –  $T (L_{u1} = 0,1)$ .

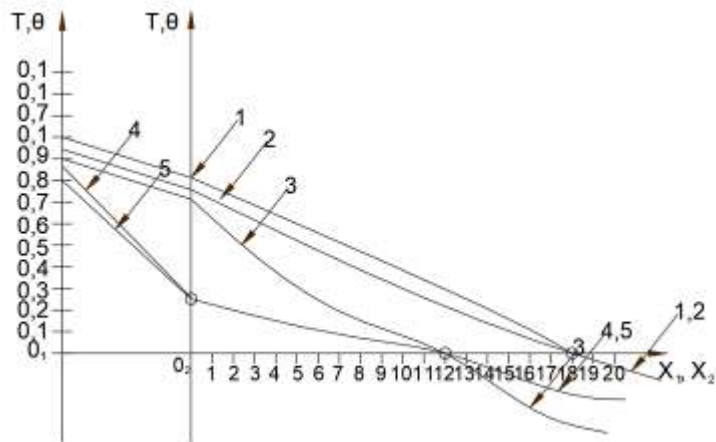


Рисунок 3 – Графіки потенціалів 1 –  $T (\varepsilon_1 = 0,5)$ ; 2 –  $T (\varepsilon_1 = 0,2)$ ; 3 –  $T (\varepsilon_1 = 0,1)$ ; 4 –  $\theta (\varepsilon_1 = 0,1)$ ; 5 –  $\theta (\varepsilon_1 = 0,2$  й  $\varepsilon_1 = 0,5)$

### Висновки

- Обґрунтована фізико-механічна та математична модель для аналізу тепло- і масообміну у шаруватих капілярно-пористих тілах, що адекватно описують (аналітично) особливості нестационарних процесів тепло- і масопереносу (тепло- і масопровідності) кусково-однорідної необмеженої двошаруватої плити (модель художнього полотна, виставленого у приміщенні музею, до якого рухаються потоки відвідувачів). Вказане художнє полотно приймає участь у конвективному тепло- і масообміні з оточуючим середовищем (однією своєю поверхнею), а іншою поверхнею, яка тепло- та вологоізольована, контактує зі стінкою музейного приміщення. Для такої модельної задачі встановлений вплив окремих тепло- і масообмінних критеріїв на тепло- й масоперенос двошаруватої плити.
- Встановлено, що у першому прошарку плити, який утримує безпосередню участь у нестационарному процесі тепло- та масообміну з оточуючим середовищем, виникають великі градієнти температури, під дією котрих відбувається рух вологи всередину другого (тепло- і



вологоізолюваного) прошарку плити. Саме це викликає підвищення потенціалу переносу вологи  $\theta$ . Занурюючись в середину другого прошарку плити, волога несе тепло, під дією якого випаровується (тобто у плиті мають місце фазові перетворення) і поглинає при цьому частину тепла у глибині прошарку, тобто у глибині другого прошарку плити утворюється стік тепла, що викликає деяке зниження температури у порівнянні з її початковим значенням. Слід зазначити, що наявність у художньому полотні подібних процесів з часом призводить до псування та пошкоджень полотна.

- Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів нестационарного тепло- і масообміну у шаруватих капілярно-пористих тілах, а також для створення більш досконалих алгоритмів керування штучним мікрокліматом приміщень музею на основі сучасних інформаційних технологій та нечітких логічних регуляторів/контролерів, як на стадіях проектування (конструювання) систем штучного інтелекту управління мікрокліматом музейних приміщень, так і у режимах їх реальних експлуатацій.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Орехов Г. А. Нестационарная задача конвективного тепло- и массообмена двухслойной плиты / Г. А. Орехов – В кн.: Исследования по теплопроводности / под ред. А.В. Лыкова, Б.М. Смольского – Минск. 1967. – ИТМО. – с. 576 – С. 425-440.
2. Орехов Г. А. Нестационарная задача конвективного тепло- и массообмена двухслойной плиты с граничными условиями второго рода / Г. А. Орехов – В кн.: Тепло- и масоперенос в твердых телах, жидкостях и газах / Под ред. А. В. Лыкова. – Минск: ИТМО АН БССР, 1970. – с. 405 – с. 207-220.
3. Лыков А. В. Теория переноса энергии и вещества/ А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Минск: Изд-во АНБССР 1959. – 320 с.
4. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: Изд-во АНБССР, 1961. – 415 с.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности/ А. В. Лыков. – Москва: Гостехиздат, 1952. – 510 с.
7. Смирнов М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки / М.С. Смирнов // Инженерно- физический журнал. – 1962. – №3. – С. 40-44.
8. Смирнов М. С. О краевых условиях для преобразованной системы дифференциальных уравнений сушки / М. С. Смирнов // Инженерно- физический журнал. – 1962. – №3. – С. 88-94.

### References

1. Orekhov G.A. Nestacionarnaya zadacha konvektivnogo teplo- i masoobmena dvuhslojnoj plity/ G.A. Orekhov – V kn.: Issledovaniya po teploprovodnosti / pod red. A.V. Lykova, B.M. Smol'skogo – Minsk. 1967. – ИТМО. – s. 576 – S. 425-440.
2. Orekhov G.A. Nestacionarnaya zadacha konvektivnogo teplo- i masoobmena dvuhslojnoj plity s granichnymi usloviyami vtorogo roda / G.A. Orekhov – V kn.: Teplo- i masoperenos v tverdyh telah, zhidkostyah i gazah / Pod. red. A.V. Lykova. – Minsk: ITMO AN BSSR, 1970. – s. 405 – S. 207-220.
3. Lykov A.V. Teoriya perenosa ehnergii i veshchestva/ A.V. Lykov, YU.A. Mihajlov. – Minsk: Izd-vo ANBSSRb 1959. – 320 s.
4. Lykov A.V. Teoreticheskie osnovy stroitel'noj teplofiziki/ A.V. Lykov. – Minsk: Izd-vo ANBSSRb 1961. – 415 s.
5. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti/ A.V. Lykov. – Moskva: Gostekhizdat, 1952. – 510 s.
6. Smirnov M.S. O sisteme differencial'nyh uravnenij processa sushki/ M.S. Smirnov // Inzhenerno- fizicheskij zhurnal. – 1962. – №3. – S. 40-44.
7. Smirnov M.S. O kraevykh usloviyah dlya preobrazovannoj sistemy differencial'nyh uravnenij sushki / M.S. Smirnov // Inzhenerno- fizicheskij zhurnal. – 1962. – №3. – S. 88-94.

*Довгалюк В. Б.* – Київський національний університет будівництва і архітектури.

*Човнюк Ю. В.* – Національний університет біоресурсів і природокористування України.

**V. Dovgalyuk<sup>1</sup>**

**Y. Chovnyuk<sup>2</sup>**

## CONCEPTUAL BASIS OF THE ANALYSIS OF HEAT-AND MASS-TRANSFER IN LAYERED CAPILLARY-PORRATED TISSES

<sup>1</sup>Kiev National University of Civil Engineering and Architecture  
<sup>2</sup>National University of Life Sciences and Natural Resources of Ukraine

The phenomena of contact heat and mass transfer between materials of different physical and chemical structures are quite widespread in the technological processes of various industries, which leads to the need for further studies of their kinetics, for example, when drying capillary-porous bodies. It has been established that many researchers studied non-stationary problems of heat and mass exchange of a piecewise-homogeneous unbounded two-layered plate with the surrounding medium, but some details of these processes have not yet been established. The authors of the paper give an analytical solution of the non-stationary problem of heat and mass conductivity of a piecewise homogeneous unbounded double-layered plate, which, with one surface, takes part in convective heat and mass transfer with the surrounding medium with constant potentials of heat and mass transfer, while the other surface is heat and moisture-insulated. This model adequately describes the processes of heat and mass exchange in a canvas, exhibited in the museum's premises, to which the flow of visitors moves. The first layer simulates the paints that are applied of the picture, and the second one – directly the basis of the painting (the art painting itself). As a result of the solution of the problem by mathematical physics, the influence of individual heat and mass transfer criteria on heat and mass transfer in this plate is established. The results obtained by the authors can be used to specify and improve the existing engineering methods for calculating the parameters of nonstationary heat and mass transfer in layered capillary-porous bodies, as well as to develop more advanced algorithms for controlling the artificial microclimate of museum premises on the basis of modern information technologies and fuzzy logic controllers / controllers, as in the stages of designing (constructing) artificial intelligence systems for the management of the climate of museum premises, and in their real modes their operation.

Key words: concept, analysis, heat and mass transfer, layering, capillary-porous body, model, plate, artistic canvas, museum exhibits.

**Dovgalyuk V.** – Kiev National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID 0000-0002-4836-5354.

**Chovnyuk Y.** – National University of Life Sciences and Natural Resources of Ukraine.

**В. Б. Довгалоук<sup>1</sup>**

**Ю. В. Човнюк<sup>2</sup>**

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СЛОИСТЫХ КАПИЛЯРНО- ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

<sup>1</sup>Киевский национальный университет строительства и архитектуры

<sup>2</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Явления контактного тепло- и массообмена между материалами различной физико-химической структуры достаточно широко распространены в технологических процессах различных отраслей промышленности, что побуждает к необходимости дальнейших исследований их кинетики, например, при сушке капиллярно-пористых тел. Установлено, что многими исследователями изучались нестационарные задачи тепло- и массообмена кусочно-однородной неограниченной двослойной плиты с окружающей средой, однако отдельные детали этих процессов до сих пор не установлены. Авторами статьи приведено аналитическое решение нестационарной задачи тепло- и массопроводности кусочно-однородной неограниченной двослойной плиты, которая одной поверхностью принимает участие в конвективном тепло- и массообмене с окружающей средой с постоянными потенциалами тепло- и массопереноса, а другая её поверхность является тепло- и теплоизолированной. Данная модель адекватно описывает процессы тепло- и массообмена в художественном холсте, выставленном в помещении музея, к которому движется поток посетителей. Первый слой моделирует краски, которые нанесены на холст художественной картины, а второй – непосредственно основу картины (именно художественный холст). В результате решения поставленной задачи методами математической физики установлено влияние отдельных тепло- и массообменных критериев на тепло- и массоперенос в данной плите. Полученные авторами результаты могут быть использованы для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета параметров нестационарного тепло- и массообмена в слоистых капиллярно-пористых телах, а также для разработки более совершенных алгоритмов управления искусственным микроклиматом помещений музея на основе современных информационных технологий и нечетких логических регуляторов / контроллеров, как на стадиях проектирования (конструирования) систем искусственного интеллекта управления микроклиматом музейных помещений, так и в режимах их реальной эксплуатации.

Ключевые слова: концепция, анализ, тепло- и массообмен, слоистость, капиллярно-пористые тела, модель, плита, художественное полотно, музейные экспонаты.

**Довгалоук В. Б.** – Киевский национальный университет строительства и архитектуры.

**Човнюк Ю. В.** – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины.