

## НЕСТАЦІОНАРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ЩІЛЯСТИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ПОВІТРОПРОНИКНЕННЯ

*Статтю присвячено розробленню числового методу розрахунку нестационарних теплових режимів щілястих пластин з урахуванням повітропроникнення. Результати досліджень можуть застосовуватися для аналізу теплового режиму огорожувальних конструкцій будівель, для розроблення нових видів огорожувальних конструкцій та теплообмінників.*

*Статья посвящена разработке численного метода расчета нестационарных тепловых режимов пористых пластин с учетом воздухопроницания. Результаты исследований могут использоваться для анализа теплового режима ограждающих конструкций зданий, для разработки новых видов ограждающих конструкций и теплообменников.*

*The article is devoted to digital method calculation development of the full porous plates unstationary thermal modes taking into account airpenetrating. The results of researches can be used for the thermal mode of non-load-bearing buildings structure analysis, the new types of non-load-bearing development and heat exchanges.*

**Ключові слова:** щіляста пластина, нестационарний тепловий режим, повітропроникнення.

**Постановка проблеми.** При розгляді низки практичних завдань (температурний, вологісний режим, сушіння та ін.) необхідно знати розподіл температур усередині огорожувальних конструкцій у будь-який момент часу. Запропоновані різними авторами математичні моделі мають цілий ряд спрощуючих припущень, що звужує сферу їх застосування та знижує достовірність отриманих результатів. Для її розширення потрібна більш загальна постановка задачі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі окремі розробки для таких задач в умовах повітропроникнення [1, 2]. Наприклад, однотемпературна модель [1] дає достовірні результати лише у випадку малих витрат фільтраційного повітря. Стаціонарний процес повітропроникнення через щілясті будівельні конструкції розглянуто в роботі [2] теж для малих витрат повітря ( $Re < 1$ ). В умовах більших витрат повітря стаціонарний тепловий режим щілястих металів розглянуто в праці [3].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Аналіз літературних джерел указує на те, що визначення температурного режиму щілястого матеріалу під час перехідних процесів на даний час залишається недостатньо дослідженим.

**Мета роботи.** Статтю присвячено дослідженню нестационарних теплових режимів щільстих будівельних конструкцій в умовах повітропроникнення.

**Виклад основного матеріалу.** Для знаходження розподілу температур усередині щільстої стінки в умовах повітропроникнення розділимо її паралельними площинами на ряд шарів, застосувавши крок  $\Delta x$ , рис.1.

Для внутрішніх шарів конструкції (2, 3, ..., n-1) будемо вважати, що масу об'єму, обмеженого кроком  $\pm \Delta x$ , зосереджено в площині цього шару. Крайні площини (1 та n) розташовані на поверхнях огорожувальної конструкції, тому в них зосереджено лише половину маси внутрішніх шарів. Систему диференційних рівнянь, що описують тепловий режим стінки без режиму фільтрації повітря, розглянуто в роботі [4]. З урахуванням фільтрації повітря через щільсту стінку її тепловий режим можна описати системою диференційних рівнянь 1-го порядку.

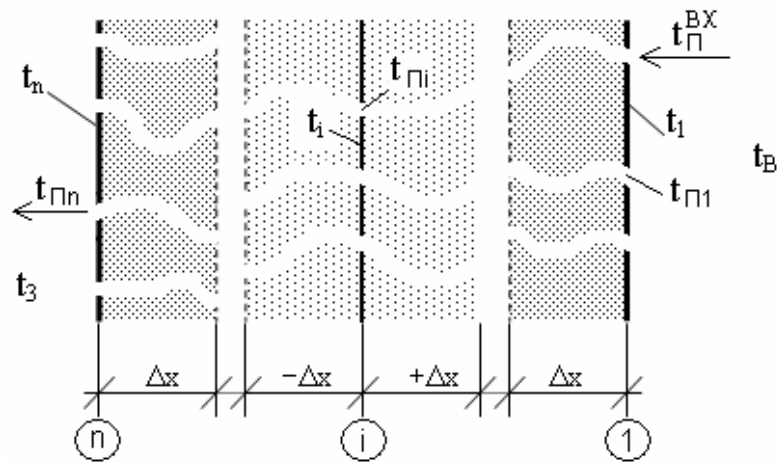


Рис.1. Розбиття огорожувальної конструкції на ряд шарів із кроком  $\Delta x$

При розгляді процесів теплообміну в умовах фільтрації зберігаємо розбиття на шари, застосоване для моделювання процесів теплопровідності. Ураховуючи, що на поверхні пластини вже задані граничні умови третього роду, для випадку ексфільтрації повітря через щільсту конструкцію можна скласти таку систему рівнянь теплового балансу в шарах щільстої конструкції:

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t_i}{\Delta \tau} &= \alpha_i^K (t_B - t_i) + \alpha_i^\Pi (t_R - t_i) - \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} (t_i - t_2) - \alpha_V \Delta x (t_i - t_{\Pi i}) + q_{V(i)} \cdot \Delta x \\ \Delta x \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t_i}{\Delta \tau} &= \frac{\lambda}{4 \cdot \Delta x} (t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1}) - \alpha_V \Delta x (t_i - t_{\Pi i}) + q_{V(i)} \cdot \Delta x, \\ \Delta x \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t_n}{\Delta \tau} &= \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} (t_{n-1} - t_n) - \alpha_n^K (t_n - t_3) - \alpha_n^\Pi (t_n - t_{3R}) - \alpha_V \Delta x (t_n - t_{\Pi n}) + q_{V(i)} \cdot \Delta x \end{aligned} \quad (1)$$

та теплового балансу повітря для кожного шару

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Pi \cdot c_\Pi \cdot \rho_\Pi \frac{\Delta t_{\Pi i}}{\Delta \tau} &= \alpha_V \cdot \Delta x (t_i - t_{\Pi i}) - c_\Pi \cdot g_\Phi (t_{\Pi i} - t_{\Pi}^{BX}) + q_{V(i)}^\Pi \cdot \Delta x \\ \Delta x \cdot \Pi \cdot c_\Pi \cdot \rho_\Pi \frac{\Delta t_{\Pi i}}{\Delta \tau} &= \alpha_V \cdot \Delta x (t_i - t_{\Pi i}) - 0.5 c_\Pi \cdot g_\Phi (t_{\Pi i} - t_{\Pi i-1}) + q_{V(i)}^\Pi \cdot \Delta x, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta x \cdot \Pi \cdot c_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \frac{\Delta t_{\Gamma n}}{\Delta \tau} = \alpha_V \cdot \Delta x (t_n - t_{\Gamma n}) - 0.5 c_{\Pi} \cdot g_{\phi} (t_{\Gamma n} - t_{\Gamma n-1}) + q_{V(n)}^{\Pi} \cdot \Delta x,$$

де  $c$  – теплоємність матеріалу огорожувальної конструкції, Дж/кг·°С;  $\rho$  – густина матеріалу теплоакумуючого шару, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $\alpha_i^k$  – коефіцієнт конвективного теплообміну біля внутрішньої поверхні стінки, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\alpha_i^{\Pi}$  – коефіцієнт променевого теплообміну біля внутрішньої поверхні стінки, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\alpha_n^k$  – коефіцієнт конвективного теплообміну біля зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $\alpha_n^{\Pi}$  – коефіцієнт променевого теплообміну біля зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $t_B$  – температура внутрішнього повітря, °С;  $t_R$  – середньорадіаційна температура поверхонь, що оточують дану поверхню, °С;  $t_1, t_i, \dots, t_n$  – температура відповідного шару огорожувальної конструкції, °С;  $t_{\Pi 1}, t_{\Pi 2}, \dots, t_{\Pi n}$  – температура повітря відповідного шару огорожувальної конструкції, °С;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу твердого щілястого каркаса в умовах відсутності фільтрації повітря, Вт/м°С;  $q_{V(i)}$  – питоме об'ємне джерело теплової енергії, Вт/м<sup>3</sup>;  $\Pi$  – щільність каркаса;  $\rho_{\Pi}$  – густина повітря, що знаходиться всередині теплоакумуючого шару, кг;  $c_{\Pi}$  – теплоємність цього повітря, Дж/кг·°С;  $t_{\Gamma i}$  – температура повітря  $i$ -го шару, °С;  $\alpha_V$  – коефіцієнт об'ємного теплообміну в елементарному масиві конструкції, Вт/м<sup>3</sup>°С;  $t_i$  – температура  $i$ -го шару огорожувальної конструкції, °С;  $g_{\phi}$  – питомі масові витрати фільтраційного повітря, кг/с·м<sup>2</sup>;  $q_{V(i)}^{\Pi}$  – питоме об'ємне джерело теплової енергії в повітрі  $i$ -го шару, Вт/м<sup>3</sup>.

Таким чином, ми отримали систему  $2n$  рівнянь із відповідною кількістю невідомих температур. Причому всі її коефіцієнти ( $\alpha_B, \alpha_3, \lambda, c, \rho, q_V$  та ін.) можуть також визначатися як функції часу, температури і координати  $X$ . Одержана нами система диференціальних рівнянь (1), (2) розв'язується за допомогою числових методів.

Для визначення температури повітря на вході в щілясту пластину й на виході з неї необхідно також задати вхідні та вихідні граничні умови. При порівняно великих витратах повітря можна вважати, що  $t_{\Gamma}^{BX} = t_B$ , а  $t_{\Gamma}^{BUX} = t_{\Gamma n}$ . У якості часових умов застосовуємо лінійний розподіл температур у товщі стіни за відсутності фільтрації повітря.

У разі фільтрації повітря через «важкий» матеріал каркаса масою повітря можна знехтувати. Це дозволяє суттєво збільшити часовий крок математичної моделі та зменшити кількість розрахунків. Якщо в товщі теплопровідного щілястого каркаса немає конденсації парів, випаровування рідин, хімічних реакцій, адсорбції та десорбції, питомі об'ємні тепловиділення можна прирівняти до нуля ( $q_{V(i)} = 0$  і  $q_{V(i)}^{\Pi} = 0$ ).

Позначимо співвідношення  $k = \frac{c_{\Pi} \cdot g_{\phi}}{2\alpha_V \cdot \Delta x}$ . З урахуванням зроблених припущень одержимо рівняння для визначення температури повітря в кожному шарі конструкції

$$\begin{aligned}
 t_{II} &= \frac{t_I + 2k \cdot t_{II}^{BX}}{1 + 2k} \\
 t_{III} &= \frac{t_I + k \cdot t_{III-1}}{1 + k} \\
 t_{Im} &= \frac{t_n + k \cdot t_{Im-1}}{1 + k}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Для перевірки працездатності отриманої математичної моделі проведено цифровий експеримент. Визначимо тепловий режим цегляної стінки товщиною  $\delta = 380$  мм в умовах повітропроникнення та без нього. Теплотехнічні характеристики цегли  $\lambda = 0,47$  Вт/м<sup>0</sup>С,  $c = 880$  Дж/кг<sup>0</sup>С,  $\rho_V = 1600$  кг/м<sup>3</sup>, істинна густина глини  $\rho_i = 2800$  кг/м<sup>3</sup>. Координатний крок прийнято  $\Delta x = 19$  мм, часовий крок  $\Delta \tau = 60$  с. Для порівняння з відомими однотемпературними математичними моделями [1, 2] задамо велике значення коефіцієнта об'ємного теплообміну.

Початкові умови:  $t_B = 18$ °С,  $t_3 = -10$ °С. Початковий стаціонарний стан – за відсутності ексфільтрації. Кінцевий стаціонарний стан – за заданих витрат фільтраційного повітря. Температури повітря в приміщенні та ззовні залишаються незмінними.

За відсутності фільтрації середній коефіцієнт тепловіддачі біля внутрішньої поверхні стінки прийемо на рівні 8,7 Вт/м<sup>2</sup>°С [5]. Ураховуючи, що середній коефіцієнт променевого теплообміну біля внутрішньої поверхні становить 4,9 Вт/м<sup>2</sup>°С [6], можна знайти коефіцієнт конвективного теплообміну  $8,7 - 4,9 = 3,8$  Вт/м<sup>2</sup>°С.

Середній коефіцієнт тепловіддачі біля зовнішньої поверхні стінки прийемо на рівні 23 Вт/м<sup>2</sup>°С [5]. Ураховуючи, що середній коефіцієнт променевого теплообміну біля зовнішньої поверхні становить 3,5 Вт/м<sup>2</sup>°С, можна знайти коефіцієнт конвективного теплообміну  $23 - 3,5 = 19,5$  Вт/м<sup>2</sup>°С.

Витрати фільтраційного повітря залежать від структури матеріалу та перепаду тиску і можуть змінюватися в досить широких межах. Згідно з нормами [5] опір повітропроникненню цегляної стінки товщиною більше 250 мм становить  $R = 18$  м<sup>2</sup>·год·Па/кг. Якщо задати перепад тиску на рівні 10 Па (нормативний), то питомі витрати повітря  $g_\phi = \frac{\Delta P}{R} = \frac{10}{18} = 0,56$  кг/(м<sup>2</sup>· год). У

цьому випадку швидкість фільтрації становить  $V_\phi = \frac{g_\phi}{3600 F \rho} = \frac{0,56}{3600 \cdot 1 \cdot 1,29} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  м/с.

Щільність матеріалу цегли визначаємо через співвідношення істинної та об'ємної густини  $\Pi = 1 - \frac{\rho_V}{\rho_i} = 1 - \frac{1600}{2800} = 0,43$ . Аналіз втрат тиску при

фільтрації повітря показує, що «відкриті» щілини становлять приблизно 38% усіх щілин. Тому розрахункова щільність цегли з урахуванням «відкритих» щілин становить  $\Pi_B = 0,43 \cdot 0,38 = 0,163$ . Розмір гранул, що спостерігаються в сухопресованій цеглі, становить 1÷2 мм. Середній розмір гранул прийемо на рівні  $d = 1,5$  мм.

Ураховуючи прийнятий середній розмір гранул, коефіцієнти опору для порошкових матеріалів зі сферичних частинок визначаються за формулами роботи [3]

$$\alpha = 171 \frac{(1 - \Pi_B)^2}{\Pi_B^3 d^2} = 171 \cdot 10^6 \frac{(1 - 0,1634)^2}{0,1634^3 \cdot 1,5^2} = 1,219 \cdot 10^{10},$$

$$\beta = 0,635 \frac{(1 - \Pi_B)}{\Pi_B^{4,72} d} = 635 \frac{1 - 0,1634}{0,1634^{4,72} \cdot 1,5} = 1,831 \cdot 10^6.$$

Згідно з даними праці [7] динамічна в'язкість повітря  $\mu = 1,745 \cdot 10^{-5} + 5,03 \cdot 10^{-8} \cdot t_{cp}$ . При середній температурі повітря на рівні  $0^\circ\text{C}$  одержимо  $\mu = 1,745 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

Визначаємо об'ємний критерій Рейнольдса [3]

$$Re = \frac{g(\beta/\alpha)}{\mu} = \frac{0,56 / 3600 \cdot (1,831 / 1,219) 10^{-4}}{1,745 \cdot 10^{-5}} = 1,34 \cdot 10^{-3}.$$

Фільтрація повітря через щілясту конструкцію є наслідком різниці тисків на її протилежних поверхнях. Для ламінарного режиму ( $Re < 0,01$ ) втрати тиску визначаємо за формулою, Па,

$$\Delta P = \frac{2}{Re} \times \frac{\beta \delta g^2}{2\rho} = \frac{2}{1,34 \cdot 10^{-3}} \times \frac{1,831 \cdot 10^6 \cdot 0,38 \cdot (0,56 / 3600)^2}{2 \cdot 1,293} = 9,72.$$

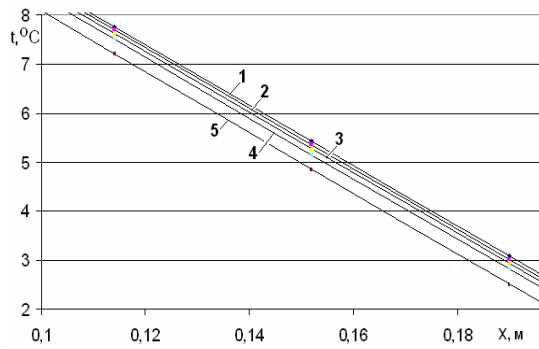
Розрахунок математичної моделі виконано методом Рунге – Кутта 4-го порядку [8]. Аналогічні розрахунки виконані для витрат повітря, збільшених в 10 та 100 разів. Результати розрахунку наведені на рис. 2.

### Висновки

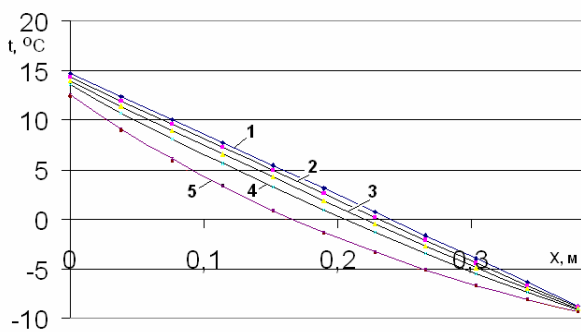
1. Порівняння розподілу температур у щілястій стінці показує, що отримані результати добре збігаються з відомим дослідженнями.

## Інфільтрація

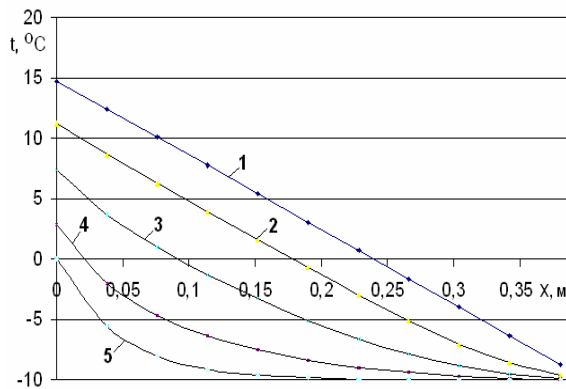
а) витрати повітря  $0,56 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$



б) витрати повітря  $5,6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$



в) витрати повітря  $56 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$



## Ексільтрація

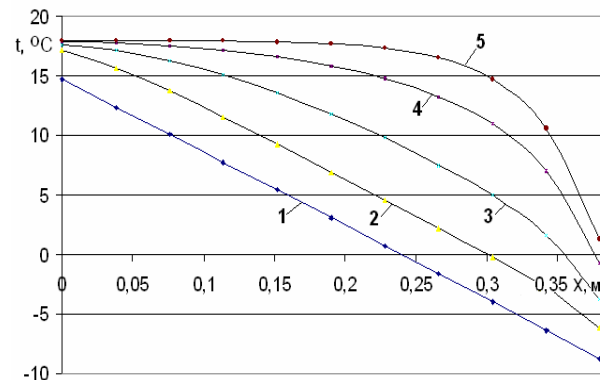
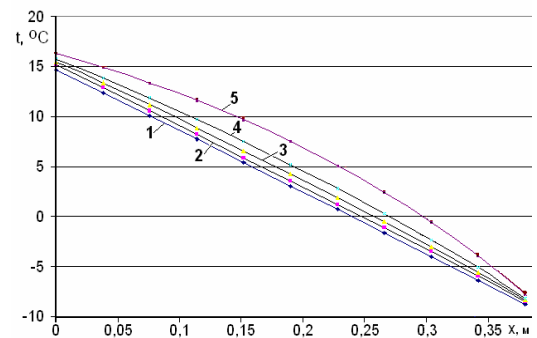
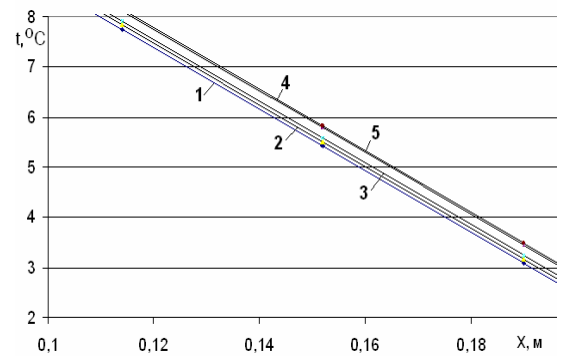


Рис. 2. Нестационарний тепловий режим цегляної стінки в умовах фільтрації повітря через різні проміжки часу, год: 1–  $\tau = 0$ ; 2–  $\tau = 2$ ; 3–  $\tau = 5$ ; 4–  $\tau = 10$ ; 5–  $\tau = 42$

2. При зменшенні витрат повітря процес теплообміну суттєво сповільнюється.

3. Результати розрахунку показують, що зміни температурного поля всередині пластини відбуваються одночасно (без транспортного запізнення). Характер змін однаковий. Відрізняються вони лише амплітудою, котра залежить від координати  $X$ .

Запропонована математична модель для розрахунку нестационарних теплових режимів огорожувальних конструкцій в умовах повітропроникнення. Вона може бути використана для розрахунку більш

складних перехідних процесів тепломасообміну в одно- та багатошарових огорожувальних конструкціях, для врахування зміни фізичних властивостей матеріалів огорожувальних конструкцій під впливом температури тощо.

#### *Література*

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности/А.В.Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
2. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха/Ф.В.Ушков. – М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1970. –141с.
3. Поляев В.М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов/В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. –168 с.
4. Кутний Б.А. Аналіз особливостей розрахунку нестационарних теплових режимів огорожувальних конструкцій/Б.А.Кутний//Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, буд-во)/Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка.– Полтава: ПолтНТУ, 2008. – Вип.21.– С.106 – 111.
5. ДБН В.2.6-31:2006. Теплова ізоляція будівель. – К.: Мінбуд України, 2006. – 65 с.
6. Богословский В.Н. Строительная теплофизика: учеб. для вузов. –2-е изд., перераб. и доп./ В.Н. Богословский– М.: Высш. шк., 1982.– 415 с.
7. Альтиуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика/А.Д.Альтиуль, П.Г. Киселёв. – М.: Стройиздат, 1975. –323 с.
8. Демидович Б.П. Численные методы анализа/Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Физматгиз, 1963. – 400 с.

Надійшла до редакції 2.06.2009

© Б.А. Кутний