

ПОВІТРОПРОНИКЛИВІСТЬ, ЯК ФАКТОР ЗМІНИ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Вологісний режим зовнішніх огороджуючих конструкцій тісно пов'язаний з їх тепловим режимом. Так, з підвищенням вологості будівельних матеріалів збільшується їх теплопровідність, тобто вологі огородження будуть мати знижені теплозахисні властивості, порівняно з сухими огородженнями. З гігієнічної точки зору, використання волого будівельного матеріалу неприпустимо, так як в ньому утворюється середовище для розвитку грибків, плісені та інших біологічних процесів. При цьому стан огороджуючого приміщення стає антисанітарійним. Підвищена вологість огороджуючих конструкцій може впливати також і на підвищення вологості повітря в приміщенні. Окрім цього, вологісний стан огорожень досить суттєво впливає на довговічність будівлі.

В зимовий період року температура повітря в приміщенні значно вища ніж температура зовнішнього повітря. Якщо відносна вологість внутрішнього та зовнішнього повітря однакова, то парціальний тиск водяної пари на внутрішній поверхні огородження буде значно більший, ніж на зовнішній. Таким чином, у зимовий період року різниця парціального тиску буде визначати потік водяної пари. Водяна пара за рахунок дифузії переміщується через огородження із приміщення назовні. У літній період дифузія водяної пари може йти в зворотному напрямку.

Водяна пара може переміщуватися не лише за рахунок дифузії. На зміну вологісного режиму конструкції впливає повітропроникливість, зокрема інфільтрація або ексфільтрація. Методи розрахунку, які дають можливість визначити вплив повітропроникливості на зміну вологісного режиму огороджуючих конструкцій, в літературі відсутні. Проблеми розробці такого методу присвячена дана робота.

Найбільш розповсюджений графоаналітичний метод розрахунку вологісного режиму огороджуючих конструкцій, розроблений К. Ф. Фокініним та О. Е. Власовим [1] передбачає, що цей процес є стаціонарним

процесом. Таке припущення, на наш погляд, є основним недоліком графоаналітичного методу. Цей метод автори рекомендують використовувати для встановлення максимально-допустимого стану зволоження матеріалів в огорожуючій конструкції. Як зауваження до цього методу можна констатувати що, процес дифузії водяної пари через огорожуючі конструкції при її конденсації ніколи не буває стаціонарним. При використанні методу необґрунтовано приймають розрахункові параметри зовнішнього повітря.

З метою визначення інших недоліків цього методу проаналізуємо його більш детально. При розрахунках графоаналітичним методом загалом дотримуються такого порядку:

1. На схему огороження наносять лінію температур в залежності від координати x (лінія $t = f(x)$) (див. рис.1).

2. На основі температури визначають максимальний парціальний тиск в окремих точках і наносять лінію максимальних парціальних тисків (лінія $E = f(x)$).

3. Проводять лінію зміни парціальних тисків (лінія $e = f(x)$).

Якщо лінія $E = f(x)$ та $e = f(x)$ не перетинаються, то це вказує на те, що в огорожувальній конструкції буде відсутня конденсація водяної пари. Якщо ж ці лінії перетинаються, то в огорожуючій конструкції можлива конденсація водяної пари. Кількість вологи, яка буде конденсуватися в огорожуючій конструкції визначають за допомогою формули, кг/(м² · год):

$$W_k = W_1 - W_2, \quad (1)$$

де: W_1 – кількість водяної пари, яка буде проходити через огороження від внутрішньої поверхні до зони конденсації, кг/(м² · год); W_2 – кількість водяної пари, яка буде проходити через огороження від зони конденсації до зовнішньої поверхні огороження, кг/(м² · год).

$$W_1 = \frac{e_a - E_1}{\sum R_{n_{a-a}}}, \quad (2)$$

$$W_2 = \frac{E_2 - e_3}{\sum R_{n_{i-н}}}, \quad (3)$$

де: e_0, e_3 – парціальний тиск водяної пари на внутрішній та зовнішній поверхнях огорожувальної конструкції, Па; E_1, E_2 – максимальний парціальний тиск водяної пари в місцях перетину ліній $E = f(x)$ та $e = f(x)$, (див. рис. 1), Па; $\sum R_{n_{0-a}}, \sum R_{n_{0-3}}$ – загальний опір паропроникливості огорожувальної конструкції відповідно до та після зони конденсації, ($\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па}/\text{кг}$).

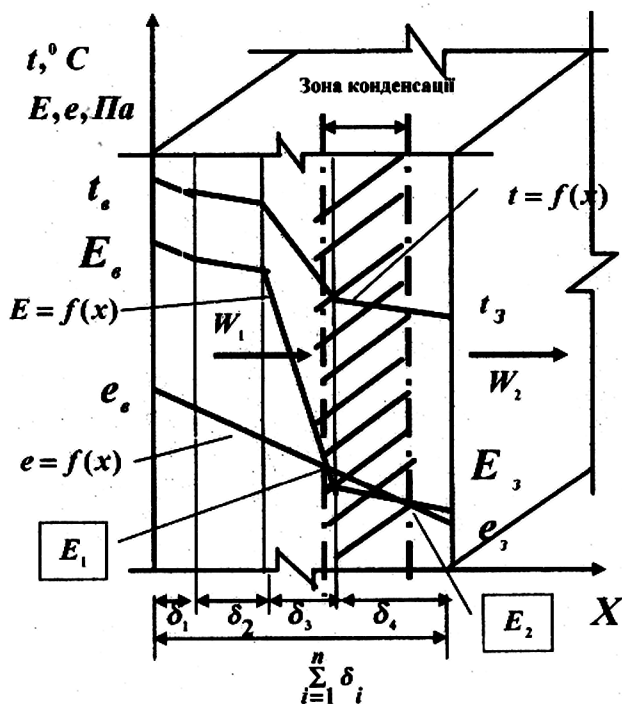


Рис. 1. Схема для розрахунку вологісного режиму огорожувальної конструкції в зимовий період року графоаналітичним методом t_3 – температура зовнішнього повітря, °C; t_0 – температура внутрішнього повітря, °C; E_0, E_3 – відповідно, максимальний парціальний тиск водяної пари внутрішнього та зовнішнього повітря, Па; e_0, e_3 – відповідно парціальний тиск водяної пари на внутрішній та зовнішній поверхнях огороження, Па; $\sum_{i=1}^n \delta_i$ – загальна товщина огороження, м.

Графоаналітичний метод розрахунку вологісного режиму огорожуючої конструкції базується на стаціонарних умовах і тому є досить орієнтовним.

Процес конденсації водяної пари в огороженні супроводжується виділенням теплоти. Математичні моделі, які описують стаціонарний процес теплопровідності та дифузії не враховують цього. Метод також не враховує зміну вологості матеріалів в огороженні при експлуатації будинку. Але основним недоліком цього методу є те, що він не враховує зміну вологісного стану огорожуючих конструкції за рахунок повітропроникливості.

Одночасно з дифузією водяної пари крізь огорожуючу конструкцію буде проникати повітря. Причиною переміщення повітря є різниця тисків на зовнішній та внутрішній поверхнях огорожуючої конструкції. Процес переміщення повітря буде супроводжуватися тепло- та масообміном між матеріалом і повітрям та зміною вологісного стану огорожуючої конструкції.

Розглянемо процес зміни тепловологісного стану огорожуючої конструкції за рахунок повітропроникливості. Для розробки алгоритму розрахунку розіб'ємо простір цієї конструкції об'ємною сіткою зі сторонами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (див. рис. 2). При цьому приймаємо що $\Delta z = 1$ м. Зосередимо теплоакумулюючу та вологоакумулюючу масу елементарного об'єму $\Delta V_i = \Delta x_i \cdot \Delta y_i \cdot 1$ у центрі. Розрахунок виконується у послідовному обчисленні змін температури та вологості матеріалу і повітря в елементарному об'ємі ΔV_i .

Припустимо, що в момент часу $\tau = 0$ огорожуюча конструкція має відому температуру та вологість, а її тепловий та вологістний режим знаходиться в стані рівноваги. Потім, внаслідок руху повітря крізь огорожуючу конструкцію теплова та вологісна рівновага порушилась. Припустимо що температура повітря вища за температуру конструкції. Розпочався процес передачі теплоти та вологи між повітрям та матеріалом конструкції. Розглянемо баланс теплоти та вологи для точок *a*, *b* и т.д. (див. рис. 2), які характеризують тепло- та вологоакумулюючу масу елементарного об'єму. Для точки *a* схема потоків теплоти та вологи показана на рис. 3. Розглянемо випадок коли повітря, при переміщенні його крізь конструкцію буде віддавати теплоту та забирати вологу. Рівняння теплового балансу для точки *a* має вигляд:

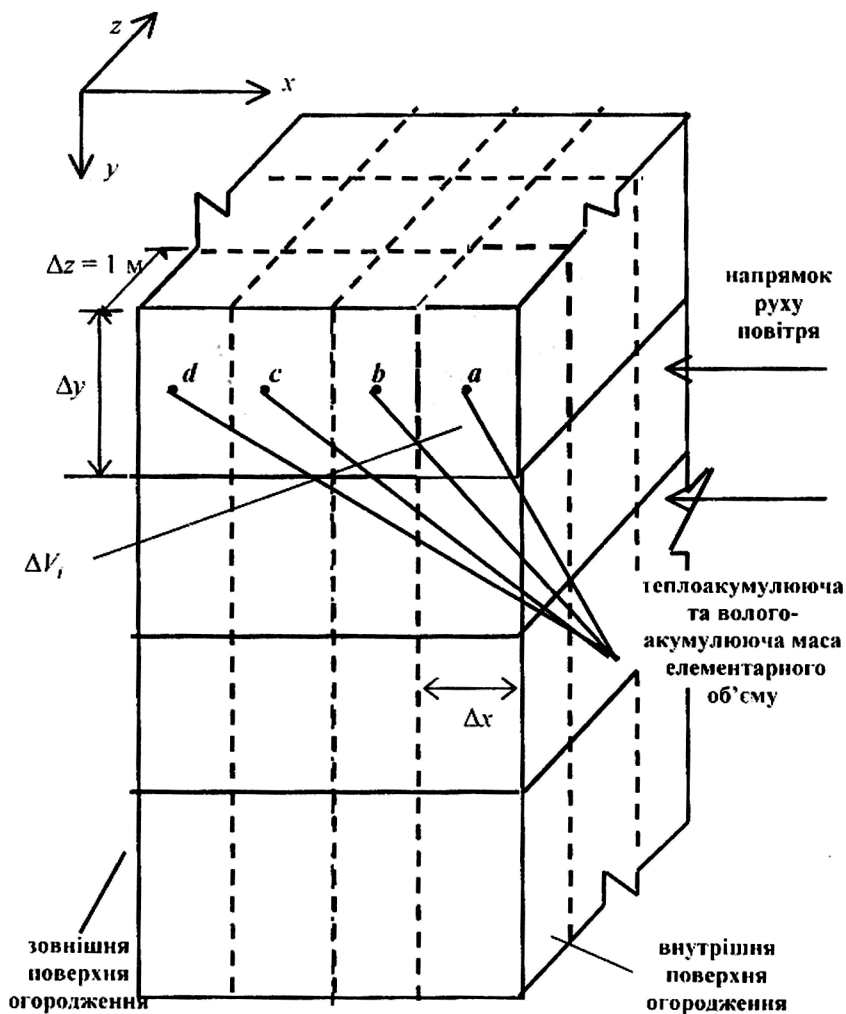


Рис. 2. Нанесення об'ємної сітки на огорожуючу конструкцію
 a, b, c, d - тепло- та вологоакуюлююча маса елементарного об'єму

$$\Delta Q^{ak} = Q_{nio} + Q_{\phi} - Q_{vio} - Q_{вин}, \quad (4)$$

де: ΔQ^{ak} – кількість закумульованої теплоти, Дж; Q_{nio} – кількість теплоти, яка підведена до елементарного об'єму від внутрішньої поверхні за рахунок теплопровідності, Дж; Q_{ϕ} – кількість теплоти, підведеної до елементарного об'єму за рахунок фільтрації повітря (теплообмін повітря з матеріалом), Дж; Q_{vio} – кількість теплоти, відведеної до сусідньої точки за рахунок теплопровідності, Дж; $Q_{вин}$ – кількість теплоти, втраченої на випаровування вологи, Дж.

Кількість теплоти, підведеної від внутрішньої поверхні до точки a за рахунок теплопровідності протягом проміжку часу Δt , можна визначити за формулою:

$$Q_{nio} = \frac{\lambda}{\frac{\Delta x}{2}} \cdot F_1 \cdot \Delta t \cdot (t_n - t_a), \quad (5)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м · °С); Δx – відстань від внутрішньої поверхні до точки a , м; F_1 – площа поверхні, м²; $F_1 = \Delta y \cdot 1$; t_n – температура внутрішньої поверхні огороження, °С; t_a – температура в точці a , °С; Δt – проміжок часу, сек.

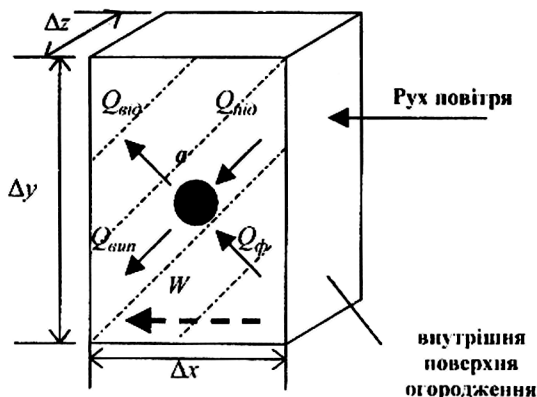


Рис. 3. Схема потоків теплоти та вологи для точки a , яка характеризує тепло- та вологоакуючу масу елементарного об'єму огорожувачої конструкції:

—→ рух теплоти; - - - -> рух вологи з повітрям

Кількість теплоти, підведеної до елементарного об'єму за рахунок фільтрації повітря:

$$Q_{\phi} = \alpha_0 \cdot F_{\phi} \cdot \Delta t \cdot (t_n - t_a), \quad (6)$$

де: α_0 – середнє значення коефіцієнта теплообміну при фільтрації повітря крізь конструкцію (для ламінарної течії), Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$); F_{ϕ} – площа поверхні теплообміну при фільтрації повітря, м^2 , t_n – температура повітря, °C .

Площа поверхні теплообміну при фільтрації визначається в залежності від кількості пор в огорожуючій конструкції, тобто від її пористості Π [2]. В той же час, кількість пор є фізичною характеристикою матеріалу [3]. На рис. 4 наведена схема капіляра для визначення площі поверхні теплообміну при фільтрації повітря. При визначенні площини поверхні F_{ϕ} введено припущення, що капіляр заповнений вологою наполовину.

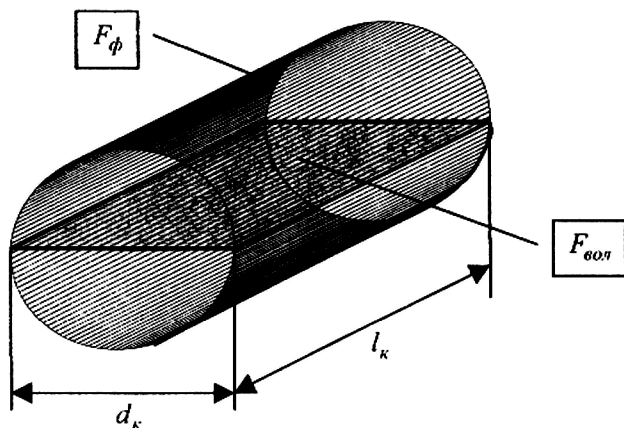


Рис. 4. Схема капіляра для визначення площі поверхні теплообміну при фільтрації та площі поверхні вологи

В цьому випадку площу поверхні теплообміну можна визначити за формулою:

$$F_{\phi} = \pi \cdot \frac{d_k}{2} \cdot l_k \cdot n, \quad (7)$$

де: d_k – діаметр капіляра, м, l_k – довжина капіляра, м, $l_k = \Delta x \cdot \xi$; ξ – коефіцієнт, враховуючий нерівномірність капілярів в огороженні, [3]; n – кількість пор в огорожуючій конструкції, шт., [3].

Кількість теплоти, відданої сусідній точці b в результаті теплопровідності дорівнює:

$$Q_{\text{від}} = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot F_1 \cdot \Delta \tau \cdot (t_a - t_b), \quad (8)$$

де: t_b – температура в точці b , °С.

Тепловий потік, який буде витрачатися на випаровування вологи із матеріалу, визначити значно складніше, ніж інші теплові потоки, які входять в праву частину рівняння (4). Цей тепловий потік буде залежати не лише від кількості підведеної теплоти до точки a , а і від стану повітря, яке фільтрується через огорожуючу конструкцію, тобто від його температури та вологовмісту.

З метою визначення кількості теплоти, витраченої на випаровування, розглянемо процес зміни параметрів повітря біля точки a . Стан повітря, яке входить в елементарний об'єм, характеризується на $I-d$ діаграмі (див. рис. 5) – точкою A . Внаслідок тепло- та масообміну повітря з матеріалом, при повному зволоженні повітря, його стан буде характеризуватися точкою B .

Таким чином процес зміни стану повітря буде проходити по лінії $A-B$. Кінцеву температуру, до якої дійде процес охолодження повітря внаслідок його теплообміну з матеріалом можна визначити із рівняння теплового балансу повітря по явній теплоті. Це рівняння має вигляд:

$$c \cdot G_a \cdot t_{n/\tau=0} \cdot \Delta \tau - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ж}} = c \cdot G_b \cdot t_{n/\tau=\Delta \tau} \cdot \Delta \tau, \quad (9)$$

де: c – теплоємність повітря, Дж/(кг · °С); G_a – витрати повітря, кг/сек.; $t_{n/\tau=0}, t_{n/\tau=\Delta \tau}$ – температура повітря в початковий момент часу, тобто при $\tau = 0$ і після проходження проміжку часу $\Delta \tau$, °С; $Q_{\text{ф}}$ – кількість теплоти, яку втрачає повітря за рахунок теплообміну з матеріалом (можна визначити за допомогою рівняння (6)); $Q_{\text{ж}}$ – кількість теплоти, яку втрачає повітря за рахунок теплообміну з вологою:

$$Q_{\text{ж}} = \alpha_1 \cdot F_{\text{вол}} \cdot \Delta \tau \cdot (t_n - t_w), \quad (10)$$

де: α_1 – коефіцієнт теплообміну між повітрям та вологою, Вт/(м² · °С); $F_{\text{вол}}$ – площа поверхні вологи, м²; t_w – температура вологи (в першому наближенні можна прийняти що $t_w = t_a$), °С.

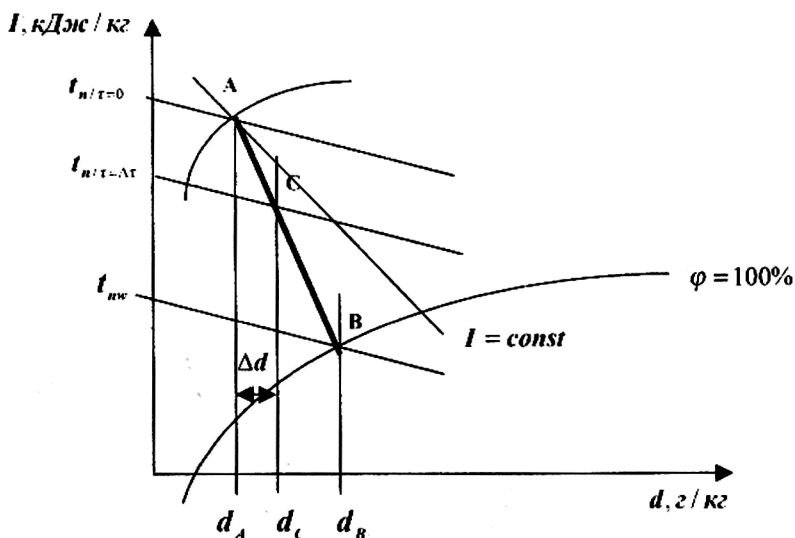


Рис. 5. Схема зміни стану повітря внаслідок тепло- та масообміну з точкою *a*

t_{nw} – температура повітря в порах матеріалу (можна прийняти, в першому наближенні, що ця температура дорівнює температурі самого матеріалу, тобто $t_{nw} = t_a$).

Площу поверхні вологи (див. рис. 4) можна визначити за допомогою рівняння:

$$F_{eol} = d_k \cdot l_k \cdot n. \quad (11)$$

Із рівняння (9) температура повітря після проходження його через елементарний об'єм ΔV_i дорівнює:

$$t_{n/\tau=\Delta\tau} = t_{n/\tau=0} - \frac{Q_\phi + Q_{ж}}{c \cdot G_w \cdot \Delta\tau}. \quad (12)$$

Розрахована температура дає можливість визначити кінцевий стан повітря після проходження його через елементарний об'єм ΔV_i . Цей стан характеризується точкою С на $I-d$ діаграмі (див. рис. 5). Точки А і С на $I-d$ діаграмі дають можливість визначити зміну вологовмісту повітря, тобто величину Δd . Кількість вологи, яка буде випаровуватися з матеріалу, кг:

$$W = G_g \cdot \Delta d \cdot \Delta \tau, \quad (13)$$

а витрати теплоти на випаровування вологи:

$$Q_{\text{вип}} = W \cdot r, \quad (14)$$

де: r – теплота випаровування, Дж/кг.

Якщо за допомогою рівнянь (5), (6), (8), (14) визначити теплові потоки і підставити в праву частину рівняння (4), то ми одержимо кількість закумульованої теплоти в точці a . З іншого боку, кількість закумульованої теплоти можна визначити також за допомогою формули:

$$Q = c_m \cdot m_m \cdot (t_{a/\tau=0} - t_{a/\tau=\Delta\tau}), \quad (15)$$

де: c_m – масова теплоємність матеріалу, Дж/(кг · °C); m_m – маса матеріалу, кг, для точки a : $m_m = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot l) \cdot \rho$; ρ – питома густина матеріалу, кг/м³; $t_{a/\tau=0}$ – температура в точці a в початковий момент часу, тобто при $\tau = 0$, °C; $t_{a/\tau=\Delta\tau}$ – температура в точці a після проходження проміжку часу $\Delta\tau$, °C.

Рівняння (15) дає можливість визначити температуру в точці a після проходження проміжку часу $\Delta\tau$. Після визначення цієї температури переходять до розрахунку температури іншої точки, тобто до точки b .

Проаналізований процес зміни тепловологісного стану огорожуючої конструкції дає можливість розробити алгоритм розрахунку з урахуванням повітропроникливості огороження. Розроблений алгоритм приведений на рисунку 6.

Однією із особливостей при використанні розробленого алгоритму розрахунку є визначення проміжку часу $\Delta\tau$. Ця особливість викликана тим, що повітря переміщується і проміжок часу залежить від його швидкості та величини $(\Delta x \cdot \xi)$. Для його визначення можна використати формулу:

$$\Delta\tau = \frac{(\Delta x \cdot \xi) \cdot \rho_n \cdot F_{\text{ж.пер.}}}{G_g}, \quad (16)$$

де: ρ_n – питома густина повітря, кг/м³; $F_{\text{ж.пер.}}$ – площа “живого” перерізу потоку повітря, м²:

$$F_{\text{ж.пер.}} = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot n \cdot \psi, \quad (17)$$

де: ψ – коефіцієнт, який враховує ступінь заповнення капіляра вологою.

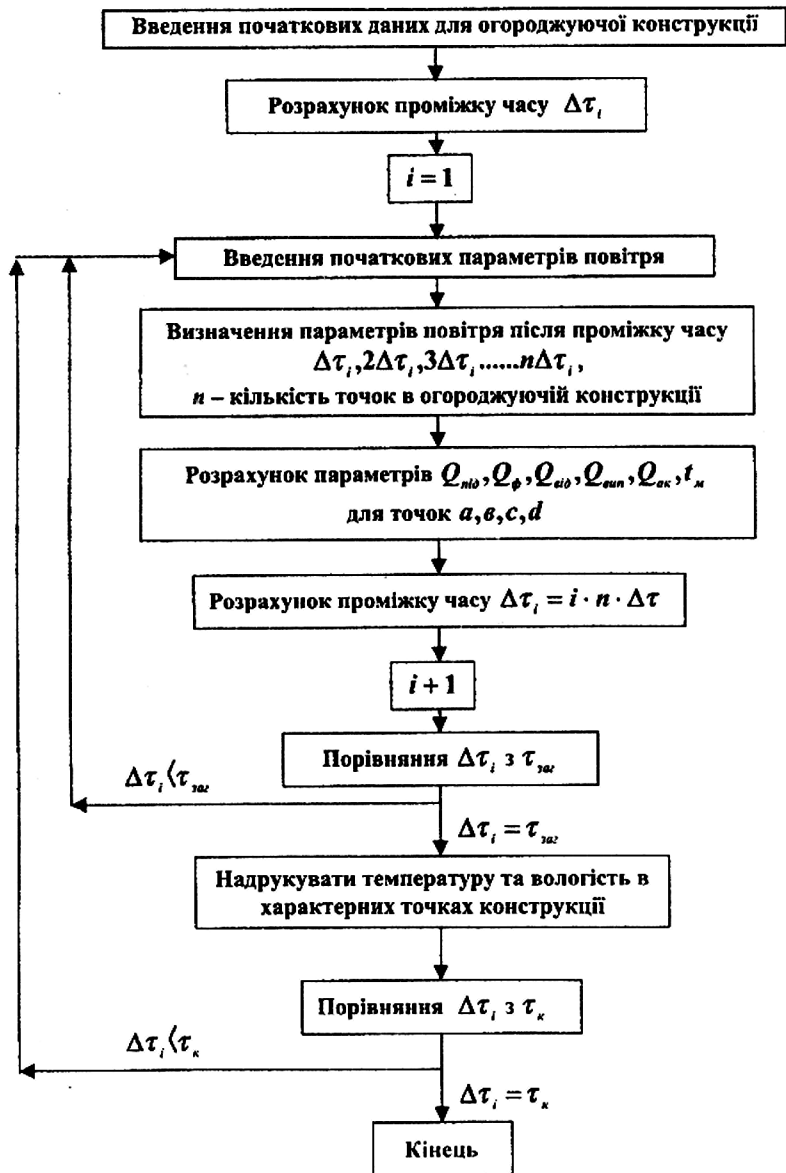


Рис. 6. Алгоритм розрахунку тепловологісного режиму огорожуючої конструкції з урахуванням повітропроникливості

Висновок. На основі проведеного аналізу змін тепловологісного стану огорожуючої конструкції розроблений метод розрахунку вологісного режиму огорожуючих конструкцій будинку в процесі його експлуатації з урахуванням процесу повітропроникливості.

Література

1. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей здания. М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
2. *Комар А. Г.* Строительные материалы и изделия: Учеб. для инж. – экон. спец. строит. вузов. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 527 с.
3. *Горчаков Г. И., Баженов Ю. М.* Строительные материалы: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.