

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ У ВЕНТИЛЬОВАНИХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЯХ В СТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ

Лимаренко О. М.

Одним із шляхів підвищення енергоефективності житлово-комунального підприємства та вирішення проблеми обігріву приміщень є будівництво «пасивних будинків», які містять елементи конструкцій ефективно сприймаючих енергію сонячної радіації. Об'єктом дослідження є «Пасивний Будинок», що представляє собою будівлю, в якій тепловий комфорт (ISO 7730) досягається виключно за рахунок додаткового попереднього підігріву (або охолодження) маси свіжого повітря. Це необхідно для підтримання в приміщеннях повітря високої якості, без його додаткової рециркуляції.

Проведено аналіз процесів теплообміну у вентильованих огороджуючих конструкціях та проаналізовано розрахункові методи їх проектування. Застосування технологій пасивного сонячного обігріву приміщень в кліматичних умовах України дозволить забезпечити до 50 % потреб у теплоті.

Визначено, що рух зовнішнього повітря у ВОК (відкриті огороджуючі конструкції) вздовж стіни будинку призводить до втрат тепла, однак повітря у вентильованому шарі буде запобігати утворенню та скупченню конденсату. Це дозволить в зимовий період зберегти термічні властивості зовнішнього шару ізоляції будинку, зменшити витрати тепла на опалення та запобігти утворенню та розвитку грибкової плісняви.

Досліджено особливості процесів теплообміну в будівельних конструкціях з вентильованими каналами. На основі проведеного аналізу розрахункових методів проектування ВОК можна стверджувати, що класична методика оцінки теплообмінних процесів базується на рівняннях теплового балансу повітря для нескінченно малого об'єму  $dx$ . Але при використанні цього рівняння неможливо врахувати розподіл променевого та конвективного потоків тепла, а також оцінити вплив втрат енергії.

У роботі запропоновано математичну модель, яка дозволить визначати зміни температури повітря вздовж вентильованого шару огороджуючих конструкцій та кількісно оцінювати надходження або втрати тепла у приміщення в холодну пору року.

**Ключові слова:** стаціонарний теплообмін, вентильовані огороджуючі конструкції, стіна Тромба, тепловий потік.

### 1. Вступ

Сьогодні в умовах фінансово-енергетичної кризи в світі все більше уваги приділяється питанням скорочення, ефективного споживання традиційних паливно-енергетичних ресурсів та зменшення шкідливих викидів у навколишнє

середовище. Найбільш енерговитратними є технологічні процеси, які пов'язані з виробництвом, транспортуванням та споживанням теплової енергії [1, 2]. Згідно звіту Держкомстату України, комунальна енергетика споживає 44 % енергетичних ресурсів, що становить близько 30 % загального споживання палива в державі. Основними причинами, які призводять до невиправдано великих втрат тепла у житлово-комунальному господарстві (ЖКГ), є недосконалість існуючих будівельних конструкцій, а також відсутність індивідуальних засобів обліку та систем регулювання енергоспоживання. Значна частина втрат тепла у будинках в опалювальний період відбувається через різницю температур внутрішнього і зовнішнього повітря (трансмісійні втрати тепла через зовнішні огорожуючі конструкції).

Саме тому дослідження сучасних напрямків та методів енергозбереження в будівлях є актуальним. Одним із шляхів підвищення енергоефективності ЖКГ та вирішення проблеми обігріву приміщень є будівництво «пасивних будинків». «Пасивні будинки» складаються з конструкцій, утилізуючих енергію сонячної радіації в результаті процесів повітрообміну (підігрів до температури внутрішнього повітря холодного зовнішнього повітря, що надходить через нещільності або відкриті вікна і двері).

Для створення коректної математичної моделі необхідно дослідити експериментально процеси теплообміну повітря у вентиляційних каналах, на основі отриманих даних створити відповідні рівняння, які б уточнювали математичну модель.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

Одним із шляхів підвищення енергоефективності житлово-комунального підприємства та вирішення проблеми обігріву приміщень є будівництво «пасивних будинків», які містять елементи конструкцій ефективно сприймаючих енергію сонячної радіації.

*Об'єктом дослідження є «Пасивний Будинок», що представляє собою будівлю, в якій тепловий комфорт (ISO 7730) досягається виключно за рахунок додаткового попереднього підігріву (або охолодження) маси свіжого повітря. Це необхідно для підтримання в приміщеннях повітря високої якості, без його додаткової рециркуляції.*

Критеріями для Пасивного Будинку в Європі є:

- питома витрата теплової енергії на опалення, визначена розрахунками в програмі «Пакет планування Пасивного Будинку» (PHPP), не повинна перевищувати  $15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$  або навантаження на опалення  $\leq 10 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$ ;
- спеціальні вимоги попиту охолодження будівлі  $\leq 15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$ ;
- щорічний період перегріву (температура в приміщенні вище  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $\leq 10 \%$ ;
- результат тесту на герметичність (N50)  $\leq 0,6$  зміни повітря/год;
- загальне споживання первинної енергії для всіх побутових потреб (опалення, гаряча вода й електрична енергія), не повинно перевищувати  $\leq 120 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$ .

Проектування будинків за такими технологіями в країнах ЄС набуло найбільшого розповсюдження і дозволило забезпечити за рахунок сонця 97 % потреб в теплі для обігріву. В умовах України від застосування технології пасивного сонячного обігріву приміщень можна сподіватися на забезпечення до 50 % потреб у теплі.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою роботи є створення математичної моделі теплообміну при русі повітря у вентиляльованих огороджуючих конструкціях для визначення зміни температури повітря та кількісної оцінки надходження тепла у приміщення для холодної пори року.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Визначити головний елемент відкритих вентиляльованих каналів.
2. Встановити основні причини, які призводять до не виправдано великих втрат тепла у житлово-комунальній сфері.
3. Дослідити особливості процесів теплообміну в будівельних конструкціях з вентиляльованими каналами.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Основними умовами для реалізації ефективною пасивною сонячною технологією є [2–5]:

- високий рівень теплоізоляції приміщень;
- утилізація тепла вентиляційного повітря;
- орієнтації будівель таким чином, щоб влітку забезпечити відсутність перегріву, а взимку, навпаки, максимально впустити сонце в приміщення.

У будівництві досить широко використовують огороджуючі конструкції (ВОК) з відкритими та замкненими шарами повітря. Останнім часом особливо цікавими для архітекторів є відкриті (вентиляльовані) конструкції.

Проблемам комунальної теплоенергетики України і шляхами її модернізації займалися автори робіт [1, 2].

Робота по створенню експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії» належить автору [3].

Особливості теплопередачі через багатошарову конструкцію, що в нестационарному режимі були розглянуті в роботі [4].

Шляхами ефективного використання енергії в пасивному будинку та вентиляльованими стіновими панелями займалися автори робіт [5, 6].

Поліпшенням пасивного сонячного будинку зі стінкою Тромбея займалися вчені [7–9].

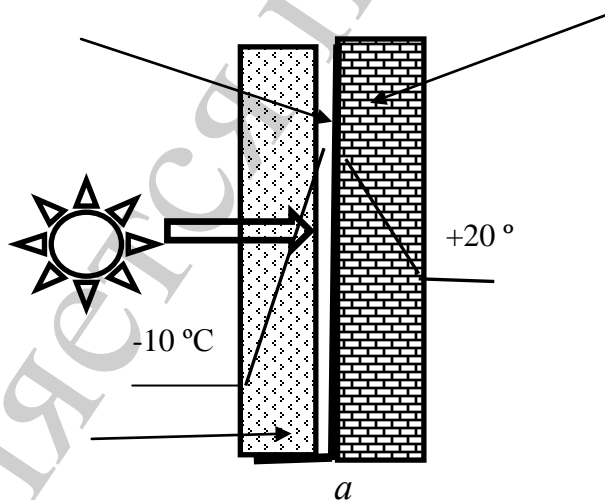
Загалом, в Україні вченими проведена значна аналітична робота в області розробки і впровадження інноваційних енергетичних продуктів в країні [1–5]. Досвід розвинених країн [8–12] може служити базою для України, якщо в основу покласти вітчизняний енергетичний потенціал.

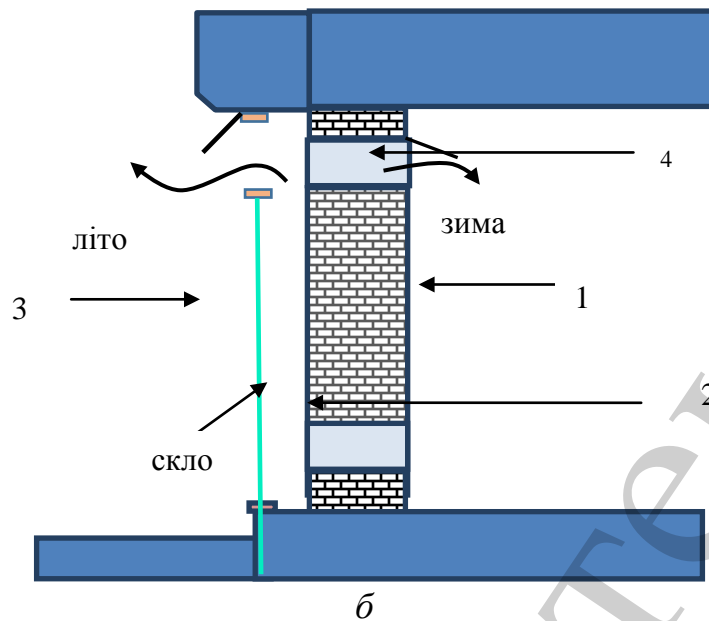
## 5. Методи досліджень

Відкриті огорожуючі конструкції широко використовуються при спорудженні стін, вентиляованих фасадів, горизонтальних перегородок (горищах, підлогах). ВОК також є ефективними в конструктивних елементах будинку для пасивного сонячного опалення (стіна Тромба). Прикладом такого застосування є елемент наскрізної ВОК, яка виконує роль каналу для подачі повітря у помешкання, а зовнішнє повітря нагрівається при русі вздовж прошарку і подається в приміщення. В стінах можливе застосування ВОК з метою однократного, двократного або багатократного руху повітря [6].

Головним елементом ВОК є зовнішня стіна будинку, в якій повітряний прошарок знаходиться між шаром ізоляції та фасадними плитами. Рух зовнішнього повітря у ВОК вздовж стіни будинку призводить до втрат тепла, однак повітря у вентиляованому шарі буде запобігати утворенню та скупченню конденсату. Це дозволить в зимовий період зберегти термічні властивості зовнішнього шару ізоляції будинку, зменшити витрати тепла на опалення та запобігти утворенню та розвитку грибкової плісняви. В літній період приміщення буде менше нагріватися, через охолодження стіни при надходженні повітря.

Пасивне опалення будинку здійснюється шляхом сонячного випромінювання – відновлювального джерела енергії. Одним з найбільш відомих конструктивних елементів системи пасивного сонячного опалення є стіна Тромба (рис. 1) [7].





**Рис. 1.** Схема: *a* – стіни Тромба; *б* – модифікованої стіни Тромба [8, 9]:  
1 – пасивна стіна; 2 – темна поверхня; 3 – скло; 4 – заслонка

Масивна стіна 1 з темною поверхнею 2 відокремлена від атмосферного повітря скляним перекриттям. В проміжку між скляним перекриттям і стіною рухається повітря. Якщо стіна Тромба має отвори у верхній і нижній частинах конструкції, то у випадку, коли вони зачинені конвекція відсутня:

$$t_x = \frac{(k_B t_B + k_H t_H) + [t_0 (k_B + k_H) - (k_B t_B + k_H t_H)] e^{\frac{k_B + k_H x}{Wc}}}{k_B + k_H}, \quad (1)$$

де  $t_0$  – температура повітря, що надходить до каналу;

$t_B, t_H$  – температури повітря відповідно внутрішнього і зовнішнього;

$k_B, k_H$  – коефіцієнти теплопередачі відповідно від внутрішнього повітря до повітря у ВОК і від повітря у ВОК до зовнішнього повітря;

$W$  – витрата повітря;

$x$  – координата.

Подібні дослідження були виконані в роботі [13]:

$$(k_B + k_H)(t_{B.P.} - t_x) dx = Wcd, \quad (2)$$

де  $t_{B.P.}$  – стала температура, яка досягається на певній відстані в залежності від умов теплообміну в конструкції (при сталому теплообміні):

$$t_{B.P.} = t_B - \frac{1}{k_B R_0} (t_B - t_H) = \frac{k_B t_B + k_H t_H}{k_B + k_H}. \quad (3)$$

Головною задачею досліджень було визначення відстані, на якій температура повітря в каналі мало би постійне значення.

Після розділення змінних а також інтегрування різницевого рівняння (3) в заданому інтервалі отримуємо:

$$\frac{t_x - t_{B.P}}{t_0 - t_{B.P}} = e^{-\frac{k_b + k_H}{cW} x}, \quad (4)$$

$$t_x = \frac{k_B t_B + k_H t_H}{k_B + k_H} - \left[ \frac{k_B t_B + k_H t_H}{k_B + k_H} - t_0 \right] e^{-\frac{k_b + k_H}{cW} x}. \quad (5)$$

В результаті математичних перетворень рівняння (5) приймає вигляд рівняння (1):

$$t_x = \frac{(k_B t_B + k_H t_H) + [t_0 (k_B + k_H) - (k_B t_B + k_H t_H)] e^{-\frac{k_b + k_H}{cW} x}}{k_B + k_H}.$$

В роботах [14–16] є деякі неточності у формулюванні значень термічних опорів. В огорожуючих конструкціях визначаються опори як теплові опори частин конструкцій від внутрішньої поверхні до повітряного шару, і від повітряного шару до зовнішньої поверхні огороження:

$$t_y = \frac{(k_B t_B + k_H t_H) + [\tau_0 (k_B + k_H) - (k_B t_B + k_H t_H)] e^{-\frac{C_B (k_b + k_H)}{cW} h_y}}{k_B + k_H}. \quad (6)$$

де  $t_y$  – температура повітря у вентилязованому каналі (те саме, що і  $t_x$ );

$\tau_0$  – температура повітря на вході в канал (те ж саме, що і  $t_0$ );

$h_y$  – відстань від входу повітря до каналу (те ж саме, що і  $x$ );

$C_B$  – коефіцієнт конверсії, в [16] відсутній опис фізичного смислу і значень даного коефіцієнту.

Аналізуючи рівняння (1), можемо заробити наступні висновки:

– одним з головних недоліків цього рівняння є те, що процеси теплообміну представлені як один загальний фізичний процес;

– у випадку конвективного теплообміну потік тепла пропорційний до різниці температури у першому ступені, натомість при теплообміні шляхом випромінювання – у четвертому ступені, за законом Стефана-Больцмана;

– при спільному теплопереносі конвекцією та випромінюванням складно визначити кількісний внесок кожної складової в загальному процесі теплообміну. Тому дуже важко відповісти на питання, що було б ефективніше: збільшення віддачі тепла через елеваційні плити або інтенсифікація процесу нагріву повітря і ВОК (це неможливо підтвердити розрахунково);

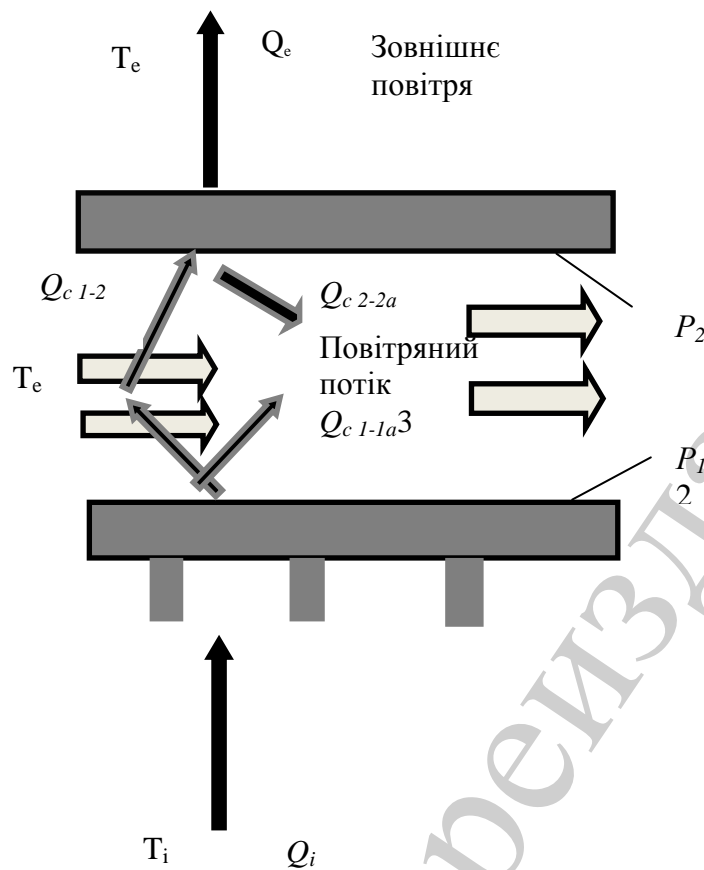
– рівняння (1) не визначає, як впливає на потік тепла вибір конструкційного рішення або матеріал, з якого складаються елементи ВОК, крім того, неможливо визначити коефіцієнт тепловіддачі;

– рівняння (1) не досить коректно віддзеркалює фізичний зміст процесів теплообміну. Тепловий баланс повітряного шару представлений рівнянням (2) в означає, що потік тепла від повітря в приміщення повністю передається повітрю в каналі. Насправді фізичний процес виглядає інакше: тепло переходить від повітря в приміщення, при цьому нагріваючи внутрішню поверхню каналу, яка в свою чергу підігріває рухоме повітря в каналі, а також зовнішню поверхню каналу.

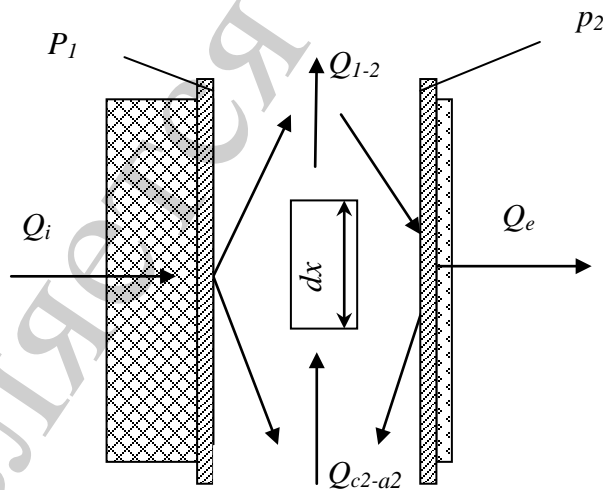
## 6. Результати дослідження

В холодний період року тепловий потік  $Q_i$  направлений з приміщення на зовні. Тепловий потік нагріває внутрішню поверхню  $p_1$  ВОК. Нагріта внутрішня поверхня в результаті конвективного теплообміну віддає тепло повітрю, яке рухається біля неї, а також випромінює тепло до поверхні  $p_2$  ( $Q_{1-2}$ ). Оскільки у ВОК рухається зовнішнє повітря, яке має нижчу температуру порівняно з температурами поверхонь, то воно буде нагріватися як біля внутрішньої, так і біля зовнішньої поверхні. Таким чином, теплове випромінювання, яке надходить до зовнішньої поверхні, частково використовується на нагрівання повітря у каналі, і частково виходить до зовнішнього середовища  $Q_e$ . Аналогічно виглядає фізична модель процесу теплообміну для горизонтальної конструкції. При формулюванні математичної моделі використовуємо рівняння теплового балансу повітря (6) і вважаємо, що температура поверхні  $p_1$  та  $p_2$  залежить від змінної  $x$ . Процеси, які розглядаються в моделі, вважаємо стаціонарними.

Рівняння теплового балансу для кожної поверхні на підставі фізичної моделі (рис. 2, 3).



**Рис. 2.** Схема розподілу потоку тепла у горизонтальній відкритій огорожувачій конструкції



**Рис. 3.** Схема розподілу теплового потоку у вертикальній відкритій огорожувачій конструкції

Оскільки тепловий потік конвекцією витрачається на нагрівання повітря запишемо рівняння балансу повітря:

— що рухається поблизу поверхні  $p_1$ :

$$hc_1 (T_1(x) - Ta_1(x)) dx = cG_1 dTa_1; \tag{7}$$



– поблизу поверхні  $p_2$  :

$$hc_2(T_2(x) - Ta_2(x))dx = cG_2dT_{a_2}, \quad (8)$$

де  $dTa_1, dTa_2$  – зміна температури повітря на елементарній відстані  $dx$  відповідно біля поверхні  $p_1$  і  $p_2$ ;

$G_1, G_2$  – витрата повітря поблизу кожної поверхні;

$c$  – теплоємність повітря;

– рівняння теплового балансу поверхні  $p_1$  :

$$Q_i = Q_{1-2} + Q_{c_1-a_1}; \quad (9)$$

– рівняння теплового балансу поверхні  $p_2$  :

$$Q_{1-2} = Q_{c_2-a_2} + Q_e. \quad (10)$$

Тепловий потік  $Q_i$  до внутрішньої поверхні:

$$Q_i = k_1(T_i - T_1(x))dx. \quad (11)$$

Тепловий потік  $Q_e$  від поверхні  $p_2$  до зовнішнього повітря:

$$Q_e = k_2(T_2(x) - T_e)dx. \quad (12)$$

В рівняннях (11), (12)  $k_1, k_2$  – коефіцієнти теплопередачі від внутрішнього повітря до поверхні  $p_1$  і від поверхні  $p_2$  до зовнішньої поверхні:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}; k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum_{e=1}^n \frac{\delta_e}{\lambda_e}}, \quad (13)$$

де  $\alpha_i, \alpha_e$  – коефіцієнти тепловіддачі;

$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \sum_{e=1}^n \frac{\delta_e}{\lambda_e}$  – сума теплових опорів для внутрішньої та зовнішньої частин

огороджуючих конструкцій.

Тепловий потік випромінюванням між поверхнями з урахуванням рівняння Стефана-Больцмана:

$$Q_{1-2} = \varphi_{1-2} \varepsilon_{1-2} c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx, \quad (14)$$

де  $c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;

$\varphi_{1-2}$  – коефіцієнт конфігурації;

$\varepsilon_{1-2}$  – коефіцієнт поглинання.

Для поверхонь  $p_1$  і  $p_2$ :

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Коефіцієнт  $\varphi_{1-2} = 1$  [13, 15], тобто тепловий потік випромінюванням від більш нагрітої поверхні до менш нагрітої поверхні, передається тільки в протилежні поверхні.

З урахуванням рівнянь (8) та (9), а також (6), (7) отримаємо:

– рівняння теплового балансу поверхні  $p_1$ :

$$k_1(T_i - T_1(x))dx = \varepsilon_{1-2} c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx + \quad (15)$$

$+ hc_1(T_1(x) - Ta_1(x))dx$ ;

– рівняння теплового балансу поверхні  $p_2$ :

$$\varepsilon_{1-2} c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] = \quad (16)$$

$= hc_2(T_2(x) - Ta_2(x))dx + k_2(T_2(x) - T_e)dx$ .

Третім рівнянням, що доповнює рівняння теплових балансів, є рівняння руху повітря у каналі ВОК, яке представляє собою баланс сумарних втрат тиску і загального тиску.

У випадку вертикальної огорожуючої конструкції загальний тиск дорівнює сумі гравітаційного тиску і тиску вітру

$$\left( \sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2 \rho_m} = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2 \rho_e} + Hg(\rho_e - \rho_m). \quad (17)$$

Для горизонтальної конструкції:

$$\left( \sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2 \rho_m} = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2 \rho_e}, \quad (18)$$

де  $\sum \zeta$  – сума місцевих опорів;

$\lambda_f$  – коефіцієнт опору ( $\lambda_f = f(Re)$ );

$h$  – товщина повітряного шару;

$H$  – відстань між отворами для входу та виходу повітря;

$D_h$  – середня ширина повітряного шару;

$v_w$  – швидкість вітру;

$\rho_m$  – середня густина повітря у ВОК;

$\rho_e$  – густина зовнішнього повітря;

$g$  – прискорення;

$n_1, n_2$  – аеродинамічні коефіцієнти на вході і на виході каналу;

$v_m$  – середня швидкість повітря.

Якщо вхідний і вихідний отвори для повітря за розмірами відрізняються від перетину повітряного каналу, то місцеві втрати тиску в отворах необхідно віднести до швидкості в отворі  $v_0$ . В такому разі до лівої частини рівнянь (19) та (20) необхідно додати місцеві втрати тиску в отворах:

$$P_{ov} = \sum \zeta_0 \frac{v_0^2}{2} \rho_0,$$

де  $\sum \zeta_0$  – сума втрат тиску в отворах;

$v_0$  – швидкість повітря в отворі.

Математична модель процесу теплообміну у ВОК для холодного періоду в загальному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(T_i - T_1(x))dx = \varepsilon_{1-2}c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx + \\ + hc_1(T_1(x) - Ta_1(x))dx, \\ \varepsilon_{1-2}c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx = \\ = hc_2(T_2(x) - Ta_2(x))dx + k_2(T_2(x) - T_e)dx, \\ hc_1(T_1(x) - Ta_1(x))dx = cG_1dT_{a_1}, \\ hc_2(T_2(x) - Ta_2(x))dx = cG_2dT_{a_2}, \\ \left( \sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2} = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2} + Hg(\rho_e - \rho_m). \end{array} \right.$$

(19)

Модель має чотири невідомі функції  $T_1(x)$ ,  $T_2(x)$ ,  $T_{a_1}(x)$ ,  $T_{a_2}(x)$ . Окрім

того, невідомим параметром є швидкість руху повітря в каналі. Таким чином кількість рівнянь відповідає кількості невідомих. Для спрощення розв'язання рівнянь моделі приймаємо наступні припущення:

- температура поверхні не залежить від змінної  $x$ ;
- коефіцієнти теплообміну не змінюються по довжині повітряного каналу.

При формулюванні математичної моделі також приймаємо, що потік повітря  $G$ , що рухається в просторі даху, умовно поділений на два потоки:

- перший рухається поблизу внутрішньої поверхні  $G_1$ ;
- другий потік повітря рухається поблизу зовнішньої поверхні  $G_2$  ( $G_1 = G_2 = G/2$ ).

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(T_i - T_1(x))dx = \varepsilon_{1-2}c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx + \\ + hc_1(T_1(x) - Ta_1(x))dx, \\ \varepsilon_{1-2}c_0 \left[ \left( \frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx = \\ = hc_2(T_2(x) - Ta_2(x))dx + k_2(T_2(x) - T_e)dx, \\ Ta_1(x) = T_1 - \frac{T_1 - T_e}{e^{\frac{hc_1 x}{cG}}}, \\ Ta_2(x) = T_2 - \frac{T_2 - T_e}{e^{\frac{hc_2 x}{cG}}}, \\ \left( \sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2} = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2} + Hg(\rho_e - \rho_m). \end{array} \right. \quad (20)$$

На основі проведеного аналізу розрахункових методів проектування ВОК можна стверджувати, що класична методика оцінки теплообмінних процесів базується на рівняннях теплового балансу повітря для нескінченно малого об'єму  $dx$  (1). При використанні рівняння (1) неможливо врахувати розподіл променевого та конвективного потоків тепла, а також оцінити вплив втрат енергії.

Також можна стверджувати що, процес теплообміну, враховуючи недоліки існуючих методів розрахунку, краще представити у вигляді системи рівнянь (18), (19).

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Запропонована математична модель процесу теплообміну у ВОК для холодного періоду дозволить виключити неточності розрахунку теплообмінних процесів, а також створити відповідні методики проектування енергоефективних огорожуючих конструкцій.

*Weaknesses.* При використанні рівняння (1) неможливо врахувати розподіл променевого та конвективного потоків тепла, а також оцінити вплив втрат енергії.

*Opportunities.* Проведене дослідження може бути використане для розробки стимулів для зменшення теплових втрат через:

- огорожуючі конструкції;
- зменшення різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря;
- врахування розподілу променевого та конвективного потоків тепла.

В подальшому планується провести експериментальні дослідження процесів теплообміну повітря у вентилятованих каналах та на основі отриманих даних створити відповідні рівняння, які б уточнювали запропоновану математичну модель.

*Threats.* Значна частина втрат тепла у будинках в опалювальний період відбувається через різницю температур внутрішнього і зовнішнього повітря (трансмісійні втрати тепла через зовнішні огорожуючі конструкції).

## 8. Висновки

1. Визначено, що до головного елемента відкритих вентилятованих каналів відносяться зовнішня стіна будинку, в якій повітряний прошарок знаходиться між шаром ізоляції та фасадними плитами. Рух зовнішнього повітря у ВОК вздовж стіни будинку призводить до втрат тепла, однак повітря у вентилятованому шарі буде запобігати утворенню та скупченню конденсату. Це дозволить в зимовий період зберегти термічні властивості зовнішнього шару ізоляції будинку, зменшити витрати тепла на опалення та запобігти утворенню та розвитку грибкової плісняви. В літній період приміщення буде менше нагріватися, через охолодження стіни при надходженні повітря.

2. В проведеному дослідженні вдалося встановити основні причини, які призводять до невиправдано великих втрат тепла у житлово-комунальній сфері, до яких відносяться:

- недосконалість існуючих будівельних конструкцій;
- відсутність індивідуальних засобів обліку та систем регулювання енергоспоживання.

3. Досліджено особливості процесів теплообміну в будівельних конструкціях з вентилятованими каналами. На основі проведеного аналізу розрахункових методів проектування ВОК можна стверджувати, що класична методика оцінки теплообмінних процесів базується на рівняннях теплового балансу повітря для нескінченно малого об'єму  $dx$  (1). При використанні рівняння (1) неможливо врахувати розподіл променевого та конвективного потоків тепла, а також оцінити вплив втрат енергії. Також можна стверджувати що, процес теплообміну, враховуючи недоліки існуючих методів розрахунку, краще представити у вигляді системи рівнянь (18), (19).

## References

1. Dolinskyi A. A. Komunalna teploenerhetyka Ukrainy: stan, problemy, shliakhy modernizatsii. Kyiv, 2007. 827 p.

2. Dolinskyi A. A., Basok B. I. Stvorennia eksperymentalnoho enerhoefektyvnoho budynku pasyvnoho typu: proceedings // Enerhetychna bezpeka na transporti: pidvyshchennia enerhoefektyvnosti, znyzhennia zalezhnosti vid pryrodnoho hazu. Kyiv, 2014. P. 26–30.
3. Stvorennia eksperymentalnoho enerhoefektyvnoho budynku pasyvnoho typu «nul enerhii» / Honcharuk S. M. et al. // Promyslova teplotekhnika. 2014. Vol. 36, No. 3. P. 88–95.
4. Nedbaylo A. N. Osobennosti teploperedachi cherez mnogoslounuyu ograzhdayushhuyu konstruktsiyu v nestatsionarnom rezhime // Keramika: nauka i zhizn. 2014. No. 1 (22). P. 4–9.
5. Stepanenko O. I., Dubrovska V. V. Pasyvnyi budynok – shliakh do efektyvnoho vykorystannia enerhii // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2014. No. 3. P. 56–58.
6. Ventiliruemye stenovye paneli / Belyaev V. S. et al. // Sel'skoe stroitel'stvo. 1984. No. 1. P. 12–14.
7. Bajc T., Todorovic M. N., Svorcan J. CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand // Energy and Buildings. 2015. Vol. 98. P. 39–44. doi:[10.1016/j.enbuild.2014.11.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.018)
8. Dynamic thermal performance simulation of an improved passive solar house with Trombe wall / Jinling Z. et al. // Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V). 2007. Vol. 1. P. 2234–2237. doi:[10.1007/978-3-540-75997-3\\_451](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_451)
9. Heat transfer in buildings: application to air solar heating and Trombe wall design / Boyer H. et al. // Evaporation, condensation and heat transfer. 2011. P. 227–244. doi:[10.5772/23025](https://doi.org/10.5772/23025)
10. Lobna M., Dehmani L. A numerical study of heating and cooling by a Trombe wall in Tunisia // The fifth International Renewable energy congress. Tunisia: Hammamet, 2014. doi:[10.1109/irec.2014.6826940](https://doi.org/10.1109/irec.2014.6826940)
11. An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens–A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall / Bellos E. et al. // Energy and Buildings. 2016. Vol. 133. P. 754–769. doi:[10.1016/j.enbuild.2016.10.035](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035)
12. Yin Z. Simulation and Modification of a Composite Trombe Wall to Adapt to the Climate in Victoria, Canada. University of Victoria, 2016. 65 p.
13. Bogoslovskiy V. N. Stroitel'naya teplofizika. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p.
14. Fokin K. F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushhikh chastey zdaniy / ed. by Tabunshnikov Yu. A., Gagarin V. G. Moscow: AVOK-Press, 2006. 256 p.
15. Klemm P. Zahalne budivnytstvo. Budivselna fizyka. Vol. 2. Warsaw: Arkadii, 2006.
16. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Osnovy teploperedachi. Moscow: Energiya, 1977. 344 p.