

УДК 697.9

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.170902

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ У ВЕРТИКАЛЬНИХ ВЕНТИЛЬОВАНИХ КАНАЛАХ

Лимаренко О. М.

### 1. Вступ

Одним із ефективних шляхів вирішення проблеми оптимізації споживання енергетичних ресурсів, які зазначені в рамках уже діючих та запланованих державних і міжнародних програм з підвищення енергоефективності та енергозаощадження, є проектування пасивних будинків з використанням енергії сонячної радіації [1, 2]. Пасивне опалення будинку здійснюється при використанні відновлювальних джерел енергії, одним з яких є сонячне випромінювання. Конструкція будинку має бути запроектована і розміщена так, щоб найбільш ефективно сприймати сонячне випромінювання в холодний період року. Пасивне проектування будинку може значно зменшити експлуатаційні витрати, які йдуть на створення необхідних умов мікроклімату. Саме тому дослідження сучасних напрямків та методів енергозбереження в будівлях є актуальним [3–5]. Дослідженню енергоефективного будівництва присвячено значний ряд праць, серед яких можна виділити роботи [6–8]. Існуючі методики розрахунку температури повітря у вентилятованих каналах базуються на використанні традиційних рівнянь переносу тепла конвекцією та випромінюванням. Проте жодна з них не передбачає завдання функції розподілу температур поверхні каналу по його довжині. Тому в даній роботі виконані дослідження розподілу температур у вертикальній огорожуючій конструкції з відкритими шарами повітря (ВОК) на експериментальному стенді. Наскрізна ВОК може виконувати роль каналу для подачі повітря у помешканні. В цьому випадку зовнішнє повітря нагрівається при русі вздовж прошарку і подається в приміщення. Завдяки чому використовується частина тепла, що поступає через зовнішню поверхню ВОК будинку. В стінах може використовуватися ВОК з однократним, двократним або багатократним рухом повітря [9, 10].

Таким чином, *об'єктом дослідження* є процеси тепло- і масообміну у відкритих огорожуючих конструкціях, які моделювалися в кліматичній камері для зменшення втрат тепла. *А метою роботи* є аналіз цих процесів, який дозволить скоротити втрати тепла через конструктивні елементи будинку в холодний період року, а також зменшити надходження тепла в теплий період.

### 2. Методика проведення досліджень

Досить глибокий аналіз і розуміння процесів теплообміну, що відбуваються у ВОК дозволить скоротити втрати тепла через конструктивні елементи будинку в холодний період року, а також зменшити надходження тепла в теплий період.

У будівництві досить широко використовують огорожуючі конструкції з

відкритими та замкненими шарами повітря. Замкнені шари повітря не об'єднані ні з зовнішнім, ні з внутрішнім повітрям в приміщенні. Замкнений шар повітря використовують в будівельних огорожуючих конструкціях як ізолюючий елемент. Повітряні порожнини роблять невеликими та добре ізольованими одна від одної. Розміщення замкнутих порожнин шириною 5–7 см в стіні [11, 12] дозволяє значно зменшити кількість цегли та покращити теплові властивості огорожуючої конструкції. Окрім того, це дозволяє зменшити товщину стіни в порівнянні зі звичайною конструкцією. Теплоізоляційні властивості стін не погіршуються, а вартість конструкції буде меншою. Покращення теплових властивостей стіни з замкненими шарами повітря є результатом зменшених значень коефіцієнту теплопровідності конструкції з порожнинами.

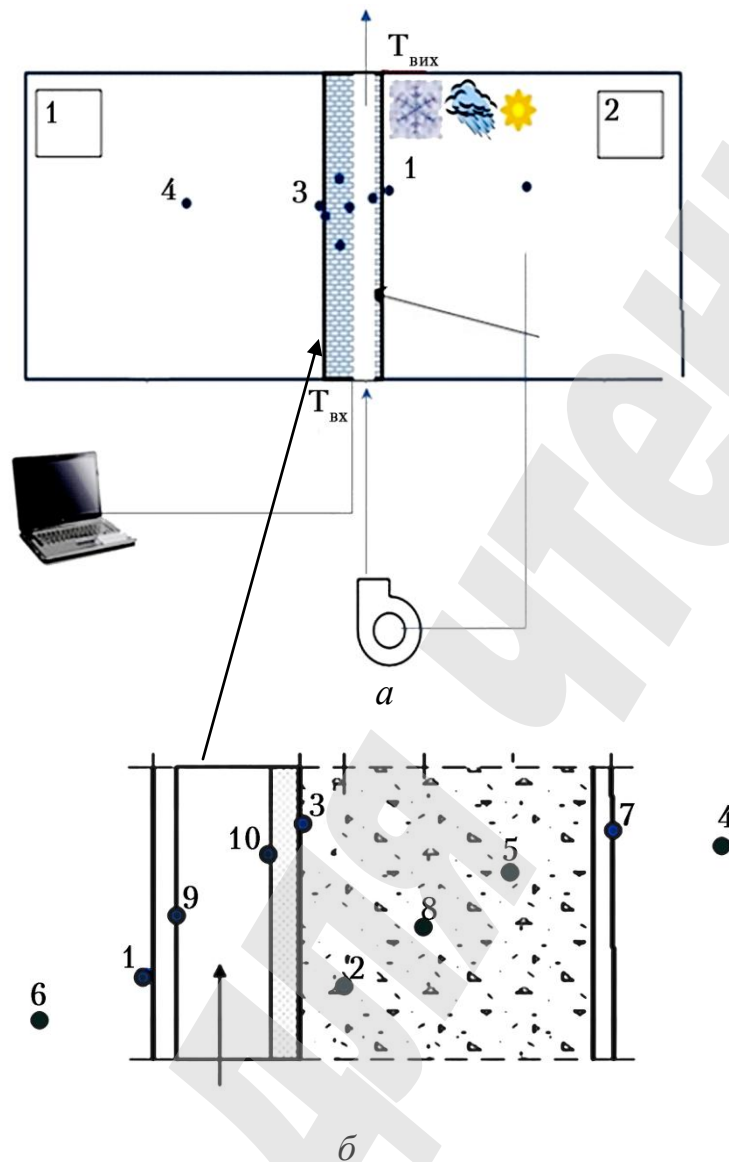
Зауважимо, що призначення ВОК функціонально відрізняється від конструкцій з закритими повітряними прошарками. Головним завданням конструкцій з закритими повітряними прошарками є збільшення термічного опору та зменшення втрат тепла через огорожуючу конструкцію. Натомість ВОК традиційно використовується з метою видалення вологи з конструкцій будинку. Рух повітря у ВОК інтенсифікує теплообмін між повітрям та поверхнею, вздовж якої воно циркулює. Окрім того, ВОК відіграє значну роль проектуванні та будівництві енергоощадних будинків. В залежності від пори року ВОК відіграє певну функцію [13].

Відкриті огорожуючі конструкції досить широко використовуються в будівництві в стінах, вентиляованих фасадах, в горизонтальних перегородках – горищах, підлогах. ВОК використовують також в конструктивних елементах будинку для пасивного сонячного опалення (стіна Тромба).

Тепломасообмін у вертикальних ВОК досліджувався у кліматичній камері (рис. 1).

В частині № 1 кліматичної камери відтворюються умови внутрішнього приміщення, фіксуються температура (датчик 4) та вологість повітря. У частині № 2 створюються умови навколишнього середовища (температура, вологість, швидкість повітря, опади). Між камерами 1 та 2 у спеціальному вікні встановлюється два досліджувані фрагменти ВОК висотою 3000 мм, шириною 500 мм, товщиною 400 мм. Один з них виконаний без вентиляованого каналу (суцільним). Схеми розміщення датчиків однакові. В ході експериментів задавалися температури у камерах і вологість, швидкість руху повітря у ВОК, контрольовані параметри – температури, що показували датчики № 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10 та вологість.

Основним елементом дослідного стенду був багатоточковий електронний реєструючий термометр AVT5330 (Польща) з відповідним програмним забезпеченням для роботи у середовищі Windows. Це дозволило автоматизувати вимірювання в інтервалі часу від 2 с до 24 год. До реєстратора може бути підключено до 8 датчиків температури DS18B20 (Польща) кожен з яких підключений до реєстратора кабелем довжиною близько 2 м і ізольований термоусадочною оболонкою. Перед розміщенням в точці вимірювань датчики пройшли калібрування в спеціалізованій лабораторії.



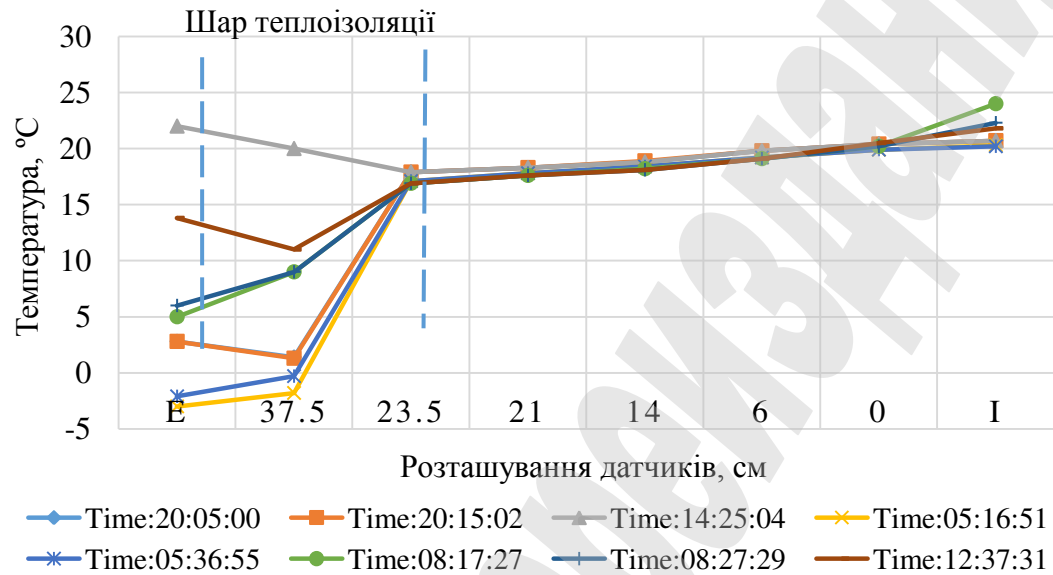
**Рис. 1.** Дослідження тепломасообміну у кліматичній камері:  
*a* – камера моделювання зовнішніх погодних умов; *б* – схема вимірювань;  
 1 – датчик температури DS18B20; 2 – датчик температури DS18B20; 3 – датчик температури DS18B20; 4 – датчик температури DS18B20; 5 – датчик температури DS18B20; 6 – датчик температури DS18B20; 7 – датчик температури DS18B20; 8 – датчик температури DS18B20; 9 – датчик температури DS18B20; 10 – датчик температури DS18B20

Датчики були розміщені всередині огороджуючої конструкції в каналах діаметром 8 мм на фіксованій глибині.

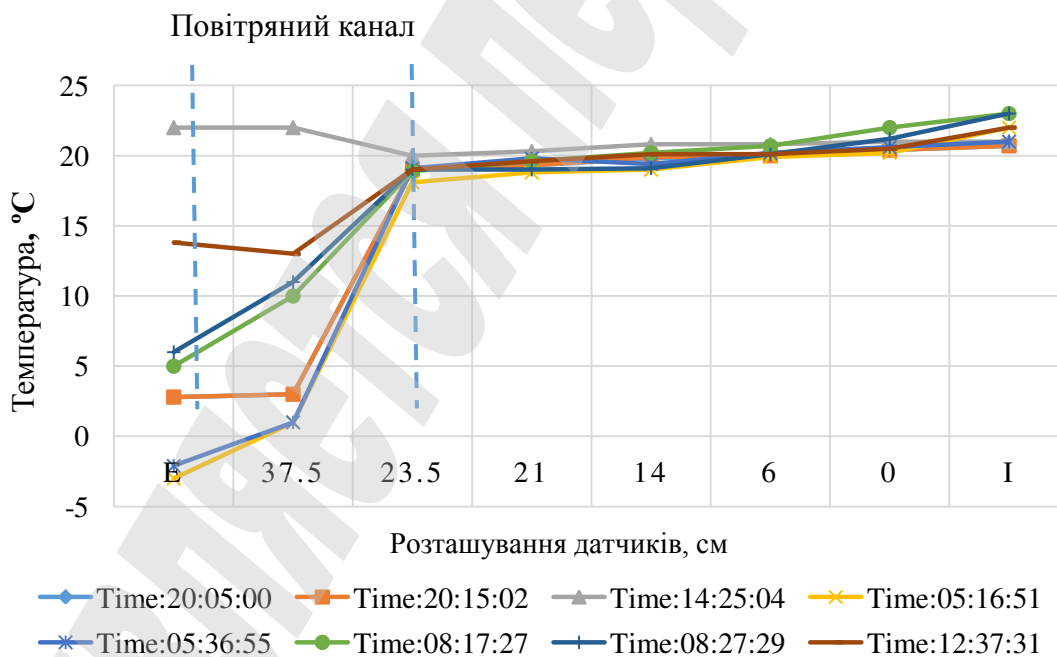
### 3. Результати досліджень та обговорення

Результати вимірів для доби, в яких падіння зовнішньої температури отримані у вигляді графіків (рис. 2). На рис. 2 наведено розподіл температур, що характеризують весь цикл вимірювань. Із отриманих даних випливає, що температура в огороджуючій конструкції ВОК на 1,5–2 °С вища, ніж у звичайній. Але вологість зменшується суттєво. З проведених досліджень на натурному об'єкті можна зробити висновок, що волога в зовнішніх

невентильованих огорожувальних конструкціях починає накопичуватись у середньому наприкінці року. Тобто з початком холодного періоду – в листопаді чи грудні, за 3–4 місяці набуває максимального значення і потім конструкція починає сохнути. Проте визначення річного розподілу вологи огорожувальної конструкції протягом року ще не дає відповіді на питання, як волога поводить себе у товщі шарів багатошарової конструкції.



*a*

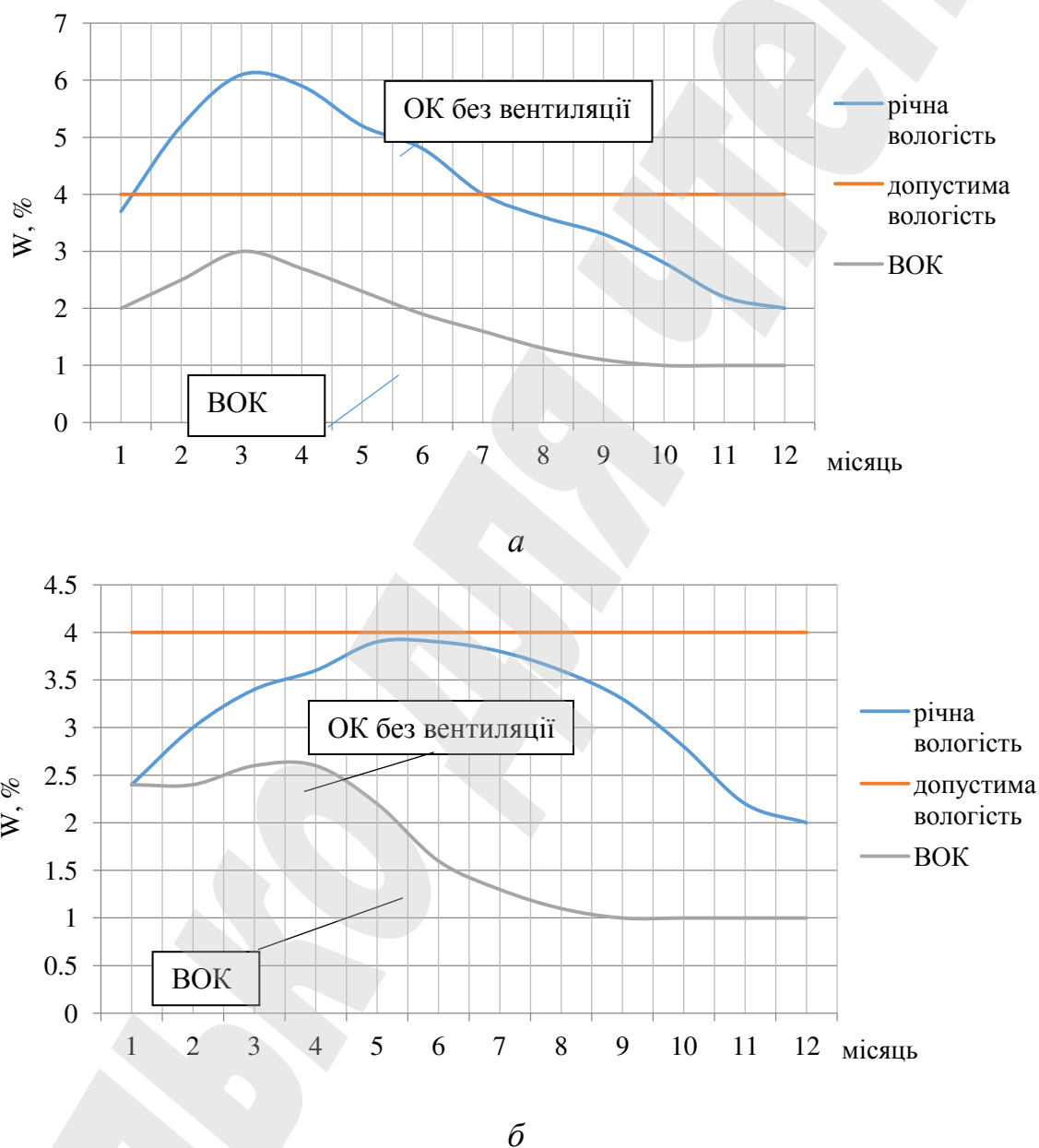


*б*

**Рис. 2.** Розподіл температури для обраних інтервалів вимірювань: *a* – в стіні без відкритої огорожувальної конструкції (ВОК); *б* – в стіні з ВОК

Вентильовані огорожувальні конструкції суттєво впливають на розподіл вологи всередині стіни. При контакті повітря з холодною поверхнею каналу при певних умовах може відбуватися конденсація. Поверхневі шари каналу

висушуються, проте волога може проникати в шари конструкції. Для порівняння на рис. 3 наведені графіки розподілу вологи всередині стіни, де можна побачити, що у ВОК кількість вологи значно менша. Вимірювання вологості виконувалися за допомогою приладу Testo 176 (Польща). Діапазон вимірювання  $-20$  до  $+70$  °С, точність  $\pm 0,2$  °С (від  $-20$  до  $+70$  °С)  $\pm 1$  цифра. Вологість – ємнісна, діапазон вимірювання від 0 до 100 % RH, точність – залежно від зонда Severis 2H2 (Польща), діаметр 12 мм, довжина 1,2 м, похибка вимірювання вологості 0,03 %).



**Рис. 3.** Розподіл вологи всередині відкритої огорожуючої конструкції (ВОК):  
*а* – стіна без утеплення; *б* – стіна з зовнішнім утепленням

Отримані дані свідчать про суттєве зменшення кількості вологи в огорожуючій конструкції при застосуванні ВОК. Температури стіни у цьому випадку будуть більшими, оскільки вологість стіни зменшується, зменшується також коефіцієнт теплопровідності.

Для розрахункового аналізу процесів теплообміну у вентиляційних повітряних каналах на представленому вище стенді виконувалися дослідження із застосуванням метода планованого математичного експерименту.

У якості керуючих факторів прийняті:  $X_1$  – Число Рейнольдса для повітря в каналі ВОК;  $X_2$  – температура повітря на вході в канал за показниками датчика № 6;  $X_3$  – температура внутрішнього повітря за показниками датчика № 4. Для дослідів вибрано ортогональний композиційний план другого порядку.

В табл. 1 показані межі варіювання обраних факторів.

**Таблиця 1**

Межі варіювання факторів

№	Фактор	Кодове значення	-1	0	+1	$\Delta$
1	Число Рейнольдса для повітря в каналі ВОК	$X_1$	200	1900	3600	1700
2	Температура повітря на вході в канал за показниками датчика № 6	$X_2$	-10	10	30	20
3	Температура внутрішнього повітря за показниками датчика № 4	$X_3$	16	20	24	4

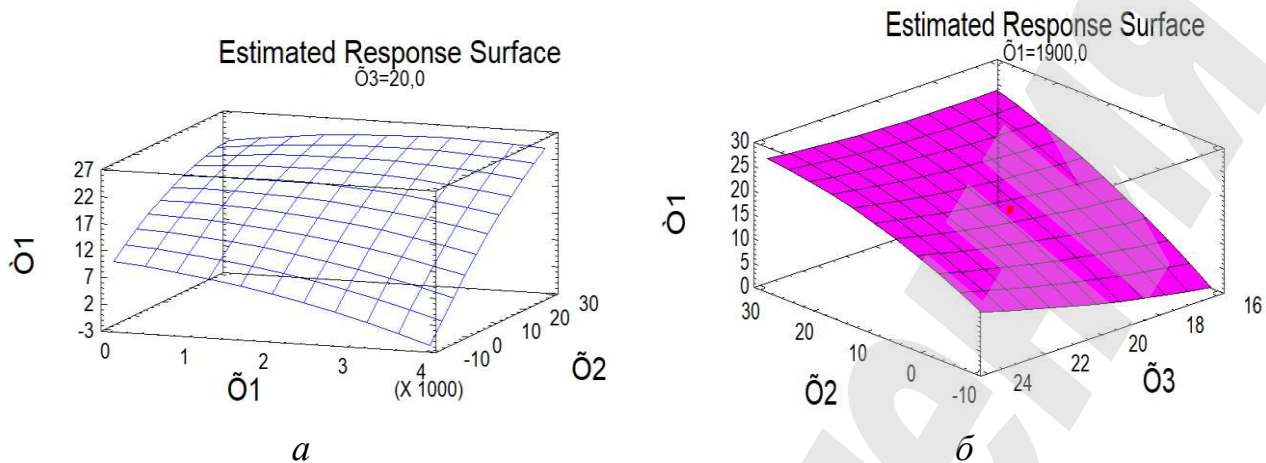
Розрахунки виконувалися за допомогою програми Statgraphics Plus 5.0. Модель побудована на основі ортогонального факторного експерименту  $2^3$  з зірковими точками для трьох факторів.

Датчики температури встановлювалися на вході в канал вкінці зони змішування, за якою температура поверхні практично не змінювалася.

Рівняння для визначення температури поверхні в залежності від температури зовнішнього повітря, температури внутрішнього повітря та числа Рейнольдса виглядає наступним чином:

$$T_1 = 17,74 - 3,82 \cdot X_1 + 18,97 \cdot X_2 + 6,52 \cdot X_3 + 6 \cdot X_1 X_2 - 3,5 \cdot X_1 X_3 - 4,9 \cdot X_2^2 - 4,5 \cdot X_2 X_3. \quad (1)$$

На рис. 4 показані парето-графік для досліджуємої залежності та графіки залежності температури поверхні від факторів.



**Рис. 4.** Розраховані графіки залежності температури по поверхні:  
 а – від температури внутрішнього повітря; б – від температури зовнішнього повітря та числа Рейнольдса

Всі фактори впливу виявилися значимими. Як і очікувалося, найбільший вплив має температура зовнішнього повітря, але при великих числах Рейнольдса. При малих значеннях  $Re$  всі фактори впливають на температуру майже однаково.

#### 4. Висновки

Проведені у роботі експериментальні дослідження дозволили встановити залежності температур від різних фізичних параметрів, які визначають теплове навантаження системи енергозабезпечення будинків. Із отриманих даних випливає, що температура в огороджуючій конструкції ВОК на  $1,5\text{--}2\text{ }^\circ\text{C}$  вища, ніж у звичайній, але вологість зменшується суттєво. З проведених досліджень на натурному об'єкті можна зробити висновок, що волога в зовнішніх невентильованих огороджуючих конструкціях починає накопичуватись у середньому наприкінці року. Тобто з початком холодного періоду – в листопаді чи грудні, за 3–4 місяці набуває максимального значення і потім конструкція починає сохнути. Проте визначення річного розподілу вологи огорожувальної конструкції протягом року ще не дає відповіді на питання, як волога поводить себе у товщі шарів багат шарової конструкції. При порівнянні результатів розрахунку, отриманих за допомогою регресійної моделі, з експериментальними даними можна стверджувати про їх адекватність. Максимальна похибка не перевищує 8 %, мінімальна – 3 %.

#### Література

1. Гагарин, В. Г. (2009). Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий. *Academia. Архитектура и строительство*, 5, 297–305.
2. Bozhko, I. K., Lysenko, O. N., Goncharuk, S. M., Kalinina, M. F. (2018). Passive houses in Ukraine and countries of UIC. *Industrial Heat Engineering*, 37 (1), 69–81. doi: <http://doi.org/10.31472/ihe.1.2015.09>



3. Басок, Б. И., Накорчевский, А. И. (2014). Моделирование теплопередачи через наружное ограждение зданий с учетом непрерывного действия климатических факторов. *Строительные конструкции*, 80, 113–120.
4. Долінський, А. А., Басок, Б. І. (2014). Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу. *Праці Восьмої науково-практичної конференції «Енергетична безпека на транспорті: підвищення енергоефективності, зниження залежності від природного газу», 9–10 жовтня 2014 року, м. Київ*, 26–30.
5. Piebiak, I. (2017). Principles for selection of the total solar energy transmittance factor of glazing in energy-efficient single-family houses. *Journal of civil engineering, environment and architecture*, 64 (1 (17)), 181–188. doi: <http://doi.org/10.7862/rb.2017.18>
6. Yusoff, W. F. M., Sapian, A. R., Salleh, E., Adam, N. M., Johar, S. (2013). Application of solar-induced ventilation prototype in small and medium enterprise building. *Indoor and Built Environment*, 24 (3), 384–400. doi: <http://doi.org/10.1177/1420326x13512143>
7. Bajc, T., Todorović, M. N., Svorcan, J. (2015). CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand. *Energy and Buildings*, 98, 39–44. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.018>
8. Bellos, E., Tzivanidis, C., Zisopoulou, E., Mitsopoulos, G., Antonopoulos, K. A. (2016). 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. *Energy and Buildings*, 133, 754–769. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035>
9. Басок, Б. І. (2014). Експериментальний будинок пасивного типу. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, 6, 3–8.
10. Ратушняк, Г. С., Анохіна, К. В. (2007). Аналіз методів математичного моделювання для визначення теплопередачі через багатошарові захисні конструкції. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 137–141.
11. Georges, L. (2014). Air heating of passive houses in cold climates: Investigation using detailed dynamic simulations. *Building and Environment*, 74, 1–12.
12. Протасевич, А. С., Калина, Л. М., Крутилин, А. Б. (2003). Вопросы теплотехнического расчета наружных теплоизолированных стен зданий с экраном и вентилируемой прослойкой. *Строительный рынок*, 20, 1–5.
13. Строй, А. Ф., Гирман, Л. В. (2007). Розрахунок замкнутих повітряних прошарків в огорожувальних конструкціях. *Теорія і практика будівництва*, 600, 297–301.