

УДК 621.315.592

Джелайлі Абдель Бакі, Корті Абдель Іллах Набіль

Енергетична й прикладна теплова лабораторія (ЕТАР), Факультет  
машинобудування, Університет Тлемсена, Алжир

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ СТІНИ,  
ІНТЕГРОВАНОЇ В ПІВДЕННИЙ ФАСАД ДЛЯ ПАСИВНОГО  
ОПАЛЕННЯ БУДИНКІВ**

---

*Насправді будівельники повинні думати про нові стратегії для досягнення найкращих проектів екологічно безпечних і енергоефективних будівель. Добре сплановані стратегії пасивного опалення при проектуванні будівлі можуть значно знизити його енергоспоживання. У даній статті вивчена запропонована конструкція південного фасаду приміщення, що об'єднує гібридну сонячну стіну й вікно для пасивного опалення приміщення. Моделювання для тривимірної моделі вбудованої фотоелектричної стіни Тромба було виконано 10 грудня 2015 року. Розподіл температури й швидкості повітря в приміщенні впливає із результатів моделювання. Отримані результати показують, що різниця температур між входом і виходом із сонячної стіни може досягти 9 °С. Тривимірний аналіз запропонованої моделі чітко показує, що тепловим ефектом вікна на пасивне нагрівання зневажати не можна. Між тим, моделювання щоденного електричного ККД перетворення й середньої температури повітря в приміщенні з даною системою може досягати 18 % і 28 °С, відповідно, при максимальному сонячному випромінюванні 470 Вт/м<sup>2</sup>.*

**Ключові слова:** природна вентиляція, стіна Тромба, фотоелектричні елементи, гібридна сонячна стіна

*Actually building designers have to think about new strategies to achieve the best sustainable building designs. Well-planned passive heating strategies in building design may reduce significantly building's energy consumption. In this, paper a proposed design of south façade of a room by integrating a hybrid solar wall and a window in case to heat passively a room is studied. The simulations for three-dimensional model of BIPV Trombe wall system have been carried out for December 10th, 2015. The temperature and velocity distribution of indoor air in different position inside the room are obtained from the simulation results. The obtained results show that the temperature difference between the inlet and the outlet of the solar wall can reach 9 °C. The 3D analysis of the proposed model show clearly that the window's thermal effect on the passive heating can't be neglected. Meanwhile, the simulation daily electrical efficiency conversion and average indoor air temperature of this system can reach 18 % and 28 °C respectively for maximum solar radiation of 470 W/m<sup>2</sup>.*

**Key words:** natural ventilation, trombe wall, photovoltaic cells, hybrid solar wall

**Вступ**

Контроль природної вентиляції дозволяє вирішити численні питання. По-перше, він

дозволяє забезпечити достатню якість повітря в приміщенні для здоров'я мешканців, замінюючи повітря, зіпсоване різними джерелами забруднення (кухні, ванні кімнати, майстерні, і т.д.) на свіже повітря. По-друге, він сприяє цілісності будівель за рахунок видалення вологи, яка може викликати пошкодження.

Будь-яке рішення з вентиляції повинно бути адаптоване до місцевого контексту: кліматичного, міського, технічного й економічного. Наш прототип забезпечує пасивне опалення приміщення на основі явища природної конвекції. Використання сонячної енергії в середовищі проживання для зменшення споживаної енергії було предметом декількох досліджень. Метод опалення, заснований на сонячній системі збору, акумулювання й рекуперації тепла, був розроблений у Французькому національному центрі наукових досліджень професором Тромбом [1].

Ramadan Bassiouny зі співавторами [2] також досліджував (2008) вплив певних параметрів на термічні характеристики сонячної витяжної труби з метою оптимізації її конструкції. З отриманих результатів випливає, що ширина витяжної труби має дуже важливий вплив на кратність обміну повітря у порівнянні із шириною впускної секції. Результати показують, що існує оптимальна секція всмоктування, за межами якої кратність обміну повітря починає знижуватися. Був зроблений висновок, що збільшення розмірів впускного отвору всього в три рази, збільшує кратність обміну повітря майже на 11%. Однак збільшення ширини впускної труби в три рази покращує кратність обміну повітря майже на 25%, при збереженні постійної секції всмоктування. Ті ж учені дослідили в 2009 році [3] сонячну витяжну трубу, встановлену на похилому даху, щоб побачити вплив нахилу на термічні характеристики витяжної труби. Результати показують, що нахил суттєво впливає на інтенсивність вентиляції й повітряного потоку, що проходить через витяжну трубу. У даному дослідженні показано, що оптимальний кут нахилу витяжної труби становить від  $45 - 75^\circ$  до  $28.4$  широти.

Guohua Gan зі співавторами [4] займався чисельними дослідженнями природної вентиляції через вертикальну сонячну витяжну трубу, використовуючи CFD-модель. Моделювання виконується із застосуванням двох полів: перше ( $s$ ) ідентично розмірам порожнини витяжної труби, а друге ( $L$ ) розширено. Показано, що використання двох зон ефективно для моделювання при різноманітній вентиляції, однак використання одного поля, ідентичного розмірам порожнини витяжної труби, сприятливе для довгих витяжних труб, де домінуючою є міцність стіни. Фотоелектричні елементи адаптовані для приймання електричного посилення з використанням гібридної сонячної стіни. Basak Kundakci і Zerrin Yilmaz [5] вивчають розрахункові параметри, що впливають на теплову ефективність сонячної стіни, такої як південний фасад.

Чисельне моделювання, що проведене Bourdeau і Jaffrin [6], а також Bourdeau зі співавторами [7] показало, що застосування стіни товщиною 3.5 см може замінити бетонну стіну 15 см. Застосування матеріалу, що міняє агрегатний стан (PCM) знижує на 90 % масу стіни, що акумулює, і підвищує її ефективність на 20 % [8].

Zlaweski зі співавторами [9] дійшов висновку, що сонячна енергія, яка проходить через скління, складає приблизно  $78 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ; стіна з PCM абсорбує  $37.7 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , на частку якої припадає 49 % додаткової енергії. Стіна з PCM генерує  $23.5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$  у відкритій порожнині, і на цю величину припадає 68 % енергії поглинання. Таким чином, ефективність цієї стіни не перевищує 30 %. Мета даної роботи – створити тривимірну чисельну модель пасивного опалення приміщення з гібридною сонячною стіною. Даний прототип розроблений для охолодження фотоелектричного елемента й забезпечення пасивного опалення нашого будинку в холодний період року.

## Фізична модель

На рис. 1 показана схема фізичної області з приєднаною до неї гібридною сонячною стіною довжиною  $L$  і шириною  $d$ . Розглянута область має вікно (1м X 1м), і знаходиться на висоті 1 м від підлоги. Розміри приміщення 3.5м x 3м x 3м (рис. 1), гібридна сонячна стіна має довжину 1.8 м і ширину 1.2 м, а повітряний зазор складає 0.5 м.

Система стіни Тромба - фотоелектричного елемента, як показано на рис.1, складається з напівпрозорої панелі фотоелектричного елемента, теплоакумулюючої стіни, що виконує роль абсорбера тепла й повітропроводу між ними. Є також два повітропроводи для зимового опалення. Система фотоелектричного елемента-стіни Тромба працює як оригінальна стіна Тромба і її докладний опис можна знайти в роботі [10].

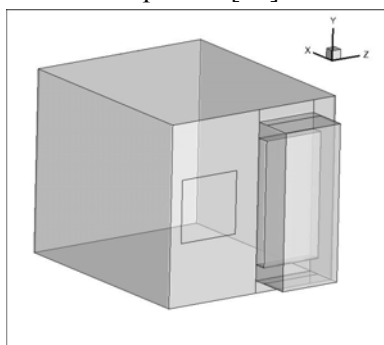


Рис. 1. Загальна схема фізичної області.

## Граничні умови

Розглянута нами область являє собою тривимірне приміщення (рис. 2), у якому є гібридна сонячна стіна й вікно на південному фасаді. Усі стіни досліджуваних приміщень адіабатичні, за винятком південної стіни. На південній стіні й в залізобетонному покритті створюється додатковий ефект конвекційного й радіаційного теплового потоку.

Значення сонячного випромінювання взяті з реальних кліматичних даних типового дня в Тлемсені. Конвективний коефіцієнт теплопередачі за рахунок вітру визначається рівнянням (1), рекомендованим McAdams [11]:

$$h = 5.67 + 3.86V_{\text{вітру}} \quad (1)$$

де  $V_g$  – швидкість вітру.

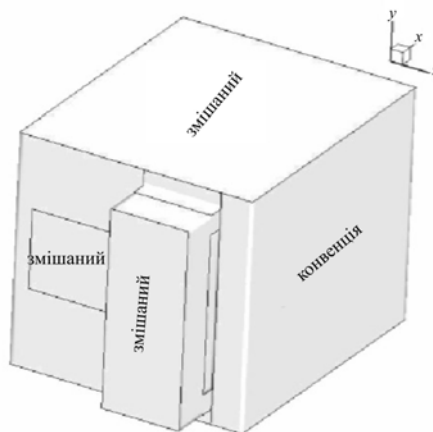


Рис. 2. Граничні умови, адаптовані в моделі CFD.

Повітря всередині гібридної сонячної стіни нагрівається за рахунок парникового ефекту. Тепле повітря, яке легше, тому що менш густе, піднімається, у результаті чого відбувається всмоктування свіжого повітря. Циркуляція повітря відбувається природнім шляхом без механіки; ця циркуляція забезпечує також охолодження нашого фотоелектричного елемента. Випуск у верхній частині сонячної стіни відбувається в напрямку, протилежному впуску ( у нижній частині сонячної стіни). Розміри вхідної секції сонячної стіни аналогічні розмірам вихідної секції. Моделювання здійснюється в ламінарному режимі, і потік повітря від самого початку вважається стабільним.

### Обговорення результатів

У наступних розділах представлені чисельні результати, отримані при тривимірному нестационарному турбулентному моделюванні з використанням стандартної моделі  $k-\varepsilon$  з посиленою функцією стіни для приєднаної моделі сонячної витяжної труби.

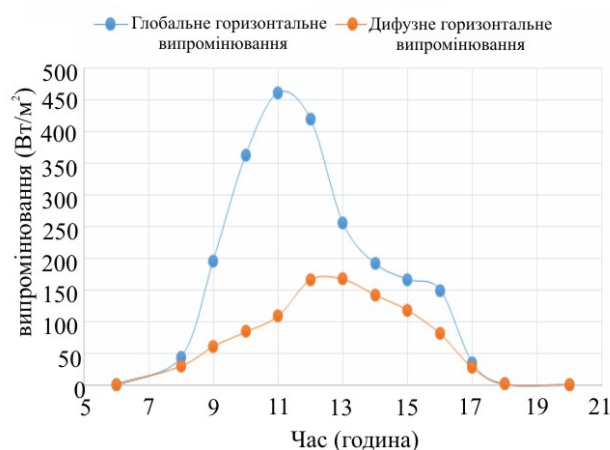


Рис. 3. Погодинне сонячне випромінювання в Тлемсені впродовж 10 грудня.

Моделювання виконувалося на основі даних одного зимового дня (10 грудня) у Тлемсені (висота 750 м, широта  $35^{\circ} 28'N$  і довгота  $17^{\circ} 1'$ ). Погодинна зміна глобального й дифузійного горизонтального сонячного випромінювання впродовж 24 годин обраного дня показане на рис. 3.

Після проектування моделей за допомогою програм Gambit, їх мережеву конфігурацію утворюють організовані мережі. Граничні умови моделей визначаються моделлю на основі рис. 2, хоча ці умови можуть змінюватися програмою FLUENT на наступних етапах аналізу.

Комерційний CFD-пакет, FLUENT, заснований на методі кінцевого об'єму, був використаний для тривимірного моделювання за допомогою сегрегованого розв'язувача.

На другому етапі моделі використовуються в програмному забезпеченні FLUENT (FLUENT 6.3.26), умова розв'язку описана таким чином:

- Розв'язувач: на основі тиску.
- Простір: 3D.
- Формулювання: неявне.
- Час: нестационарний.
- Робочий тиск: 101325Па.
- Критерій збіжності був установлений на рівні  $10^{-6}$  для всіх параметрів.

Для перевірки точності розробленої чисельної моделі ми пропонуємо порівняти отримані результати з експериментальними, отриманими Basak Kundakci і Zerrin Yilmaz [4], які вивчали систему стіни Тромба з одношаровою скляною, двошаровою скляною й фотоелектричною панелями. На рис. 4 представлена погодинна зміна температури поверхні фотоелектричного елемента, зареєстрована протягом двох днів підряд. Порівняння показує, що наші результати, представлені пунктирною чорною кривою, добре узгоджуються з наведеними в літературі [4]. Це підтверджує гарну точність методу, запропонованого в даній роботі.

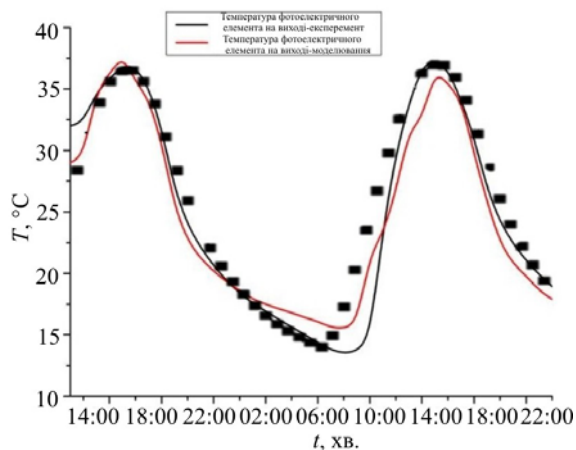


Рис. 4. Підтвердження результатів.

На рис. 5 і рис. 6 показано температурний контур, що реєструвався через кожні дві години, починаючи з 07:00. Більш високі значення сонячного випромінювання підвищують температуру повітря у витяжній трубі, і різниця температур повітря на вході й виході з гібридної сонячної стіни також зростає (рис. 5).

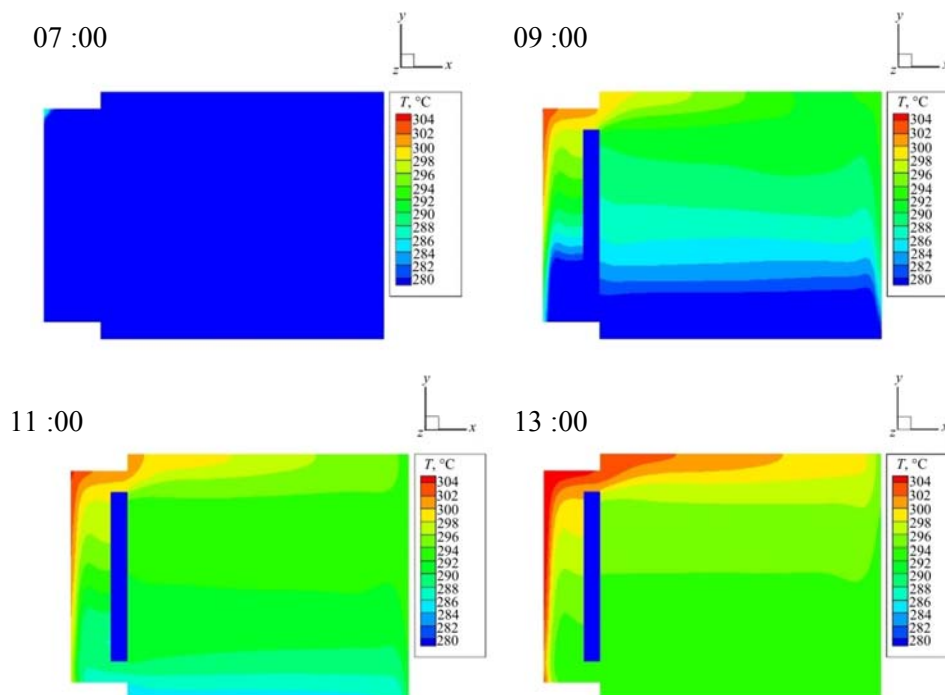


Рис. 5. Температурний контур, що реєструвався через кожні дві години ( $z = 2.4\text{ м}$ ).

Підвищення температури повітря в пропонуваній моделі пропорційно інтенсивності сонячного випромінювання. Збільшення сонячної інтенсивності підвищує температуру фотоелектричного елемента й, отже, підвищує температуру повітря усередині гібридної сонячної стіни. Чітко видно, що важливі значення температури реєструються поблизу фотоелектричного елемента й вікна. Повітря в приміщенні нагрівається природним шляхом за рахунок ефекту сонячної витяжної труби, який пояснюється нижче.

На рис. 4 показано, що вікно більш суттєво впливає на пасивне нагрівання повітря в приміщенні. Тепловим ефектом використання вікна в південній стіні зневажати не можна, що підтверджується тривимірним аналізом цієї проблеми.

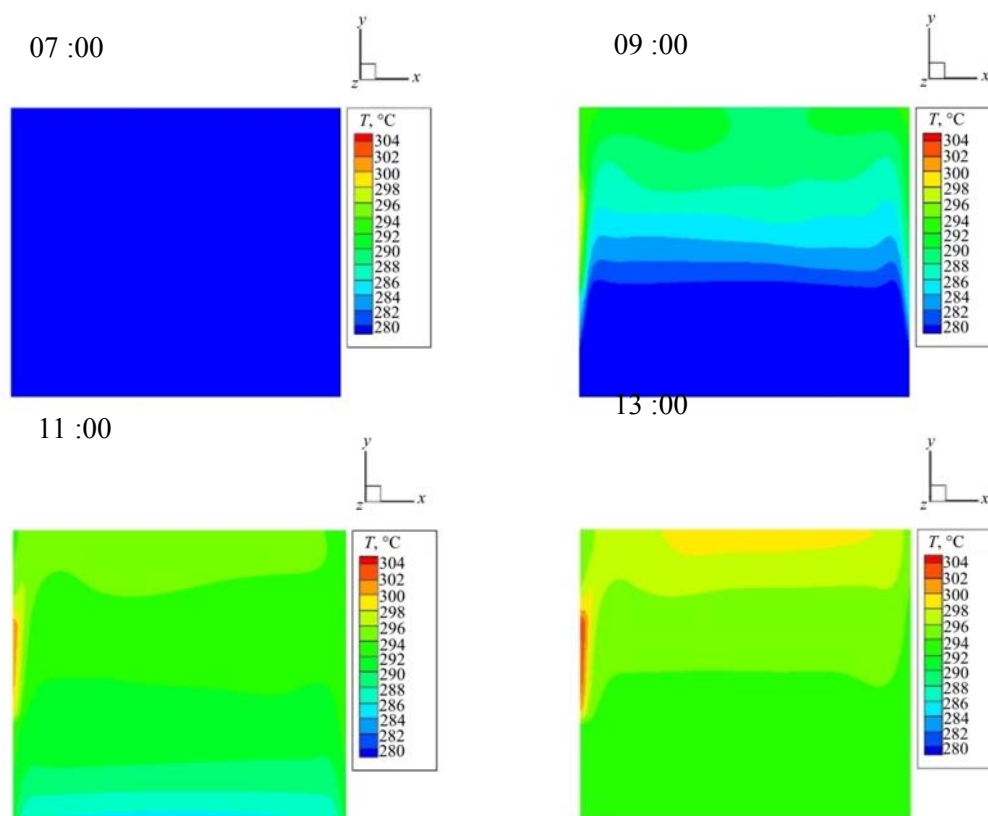


Рис. 6. Температурний контур, що реєструвався через кожні дві години ( $z = 1\text{м}$ ).

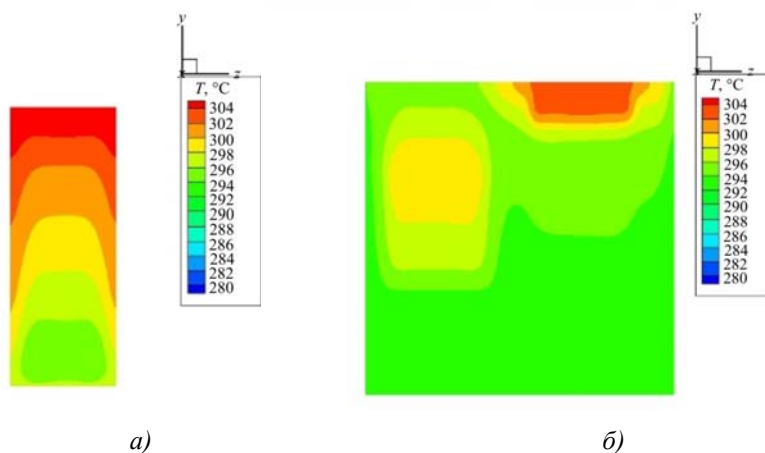


Рис. 7. Температурний контур поблизу фотоелектричного елемента (а) і вікна (б).

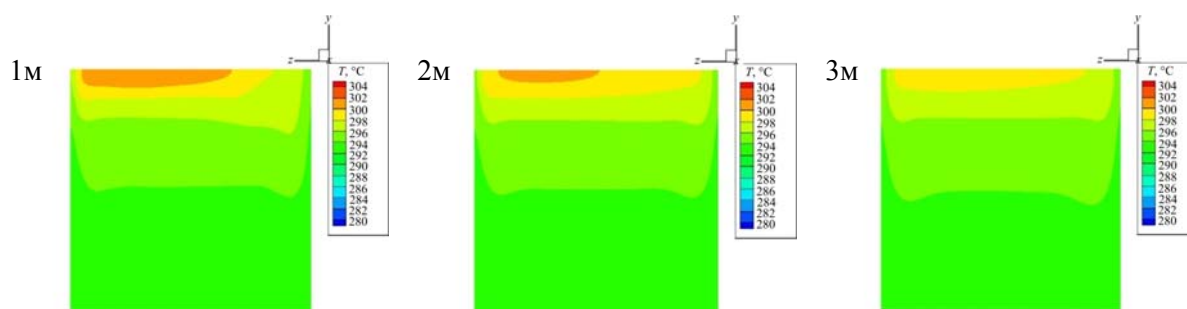


Рис. 8: Температурний контур через 1, 2 і 3 м уздовж осі X від південного фасаду, відповідно.

На рис. 7 показано розподіл температури повітря усередині гібридної сонячної стіни поблизу фотоелектричного елемента (а) і розподіл температури повітря в приміщенні поблизу вікна (б). На рисунку показані значні зміни температури відповідно до коливань сонячної інтенсивності. З ростом інтенсивності відбувається збільшення всіх температур. Протягом усього дня ми відзначаємо, що фотоелектричний елемент реєструє найбільш важливу температуру. Як видно з рис. 7, температура досягає 304 К поблизу фотоелектричного елемента й 300 К поблизу вікна.

На рис. 8 показана еволюція температурних полів усередині контрольного приміщення. Тепло, що генерується на рівні фотоелектричного елемента й вікна, значно впливає на розподіл температур у приміщенні, як видно на рис. 8. Усередині приміщення зафіксовані високі температури біля стелі ( $\leq 302$  К).

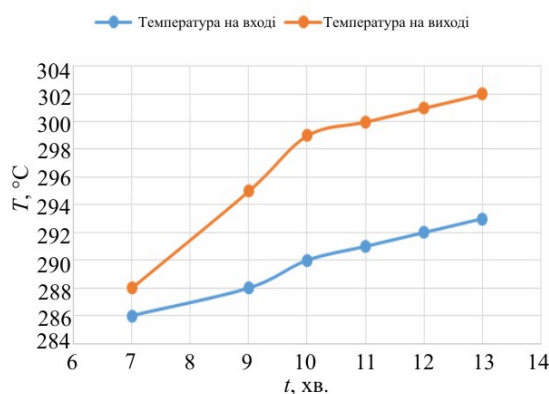


Рис. 9. Зміна температури на вході й виході з гібридної сонячної стіни.

Як видно на рис. 9, порівнюються температури на вході й виході з гібридної сонячної стіни. Свіже повітря в приміщенні замінюється повітрям, нагрітим природнім шляхом за рахунок парникового ефекту в гібридній сонячній стіні протягом дня. Температура повітря на вході й виході з гібридної сонячної стіни досягає максимального значення в 13<sup>00</sup> і становить, відповідно, 302 К і 293 К.

На рис. 10 показана погодинна зміна електричного ККД з температурою поверхні фотоелектричного елемента протягом обраного дня 10 грудня. Тут ККД перетворення фотоелектричного елемента пов'язаний з температурою елемента як:

$$\eta_{\phi} = \eta_0 (1 - 0.0045(T - 298.15)) \quad (2)$$

$\eta_0$  – електричний ККД у стандартних умовах ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ , 25 °C) [12].

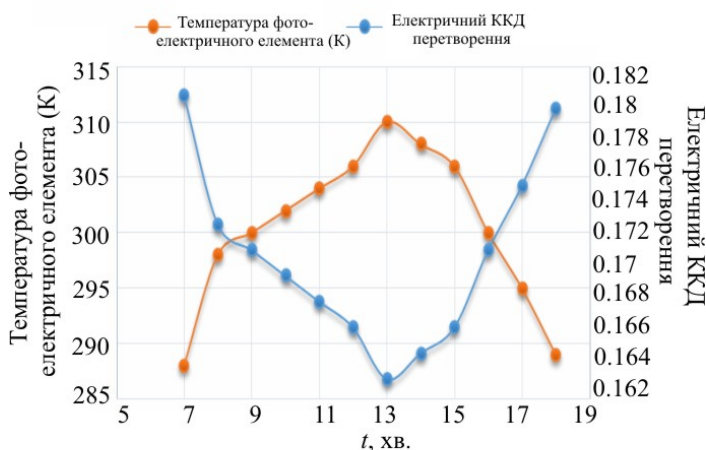


Рис. 10. Щоденна зміна ККД і температури фотоелектричного елемента в обох моделях.

Фотоелектричний елемент може виробляти електрику протягом дня під впливом сонячного випромінювання. Як видно на рис. 14, максимальне значення електричного ККД перетворення зафіксовано в 06<sup>00</sup> і становить 18.02 %, тоді як мінімальне значення температури поверхні фотоелектричних елементів становить 14 °С. Електричний ККД падає до свого мінімального значення протягом дня в 13<sup>00</sup>, що складає 16.3 %, коли температура поверхні фотоелектричних елементів підвищується до свого максимального значення 37 °С. Потім електричний ККД перетворення зростає до 17.94 % в 18<sup>00</sup>, коли температура поверхні фотоелектричних елементів знижується до 16 °С.

## Висновок

Мета даної роботи – представити теплові характеристики гібридної сонячної стіни, інтегрованої в будівлю з пасивною системою сонячного опалення в Тлемсені. Для чисельного моделювання застосовується ізольований вирішувач з даними про реальні кліматичні умови міста Тлемсен.

По-перше, у даному дослідженні показано, що сонячна стіна є ефективним рішенням для пасивного опалення будівель. При використанні сонячної стіни температура повітря в приміщенні може досягати 28 °С, коли температура навколишнього середовища нижче 21 °С.

По-друге, отримані результати показують, що наша гібридна сонячна стіна забезпечує гарне охолодження фотоелектричного елемента, що дозволило нам досягти більш високої електричної потужності.

Цікаво відзначити, що надлишкове тепло, виділене фотоелектричним елементом, використовується для пасивного опалення нашого приміщення, незважаючи на те, що фотоелектричний елемент проохолоджується свіжим повітрям, що надходить із приміщення.

Існує декілька способів підвищити ефективність нашої сонячної стіни, наприклад, покращити ізоляцію навколишньої стіни, щоб обмежити втрати тепла назовні, або інтегрувати рст матеріал (що міняє агрегатний стан), щоб продовжити термін служби нашої стіни.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Utzinger D. M., Analysis of Building Components Related to Direct Solar Heating of Building, M.S. Thesis, University of Winconsin, Madison (1979).



2. Bassiouny Ramadan, Koura Nader S.A.. An Analytical and Numerical Study of Solar Chimney Use for Room Natural Ventilation. *Energy and Buildings* (2008) 40, p. 865 – 873.
3. Bassiouny Ramadan, Korah Nader S.A.. Effect of Solar Chimney Inclination Angle on Space Flow Pattern and Ventilation Rate, *Energy and Buildings* (2009) 41, p. 190–196.
4. Gan Guohui. Simulation of Buoyancy-Driven Natural Ventilation of Buildings-Impact of Computational Domain. *Energy and Buildings*. (2010) 42, p. 1290–1300.
5. Koyunbaba Basak Kundakci, Yilmaz Zerrin. The Comparison of Trombe Wall Systems with Single Glass, Double Glass and PV Panels, *Renewable Energy* (2012) 45, p. 111–118.
6. Bourdeau L., Jaffrin A.. Actual Performance of a Latent Heat Diode Wall. In: *Proceedings of Izmir International Symposium II on Solar Energy Fundamentals and Applications*, (Izmir, Turkey, 1979).
7. Bourdeau L.. Study of Two Passive Solar Systems Containing Phase Change Materials for Thermal Storage. In: Hayes, J., Snyder, R. (Eds.), *Proceedings of the Fifth National Passive Solar Conference* (19 – 26 October, Amherst, Newark, DE, American Solar Energy Society, p. 297, 1980).
8. Knowles T.. Proportioning Composites for Efficient Thermal Storage Walls, *Solar Energy* (1983) **31** (3), p. 319–326.
9. Zalewski Laurent, Joulin Annabelle, el Lassue Steten, Dutil Yvan, Rouse Daniel. Experimental Study of Small-Scale Solar Wall Integrating Phase Change Material. *Solar Energy* (2012) 86, p. 208–219.
10. Jie Ji, Hua Yi, Wei He, Gang Pei, Jianping Lu, Bin Jiang. Modeling of a Novel Trombe Wall with PV Cells. *Building and Environment*, in press.
11. McAdams W. H.. *Heat Transmission, third edition* (Mcgraw-hill, New York, 1954).
12. Zondag H. A., Vries D.W. de. Helden W. G. J.van, Zolingen R. J. C. van, Steenhoven A. A.. The Thermal and Electrical Yield of a PV-thermal Collector, *Sol Energy* (2002) **72**(2), 113–28.

Надійшла до редакції 10.01.2017