



<https://doi.org/10.15407/scin16.02.062>

К.Б. ДІКАРЕВ¹, О.М. КУЗЬМЕНКО¹, В.О. ПЕТРЕНКО¹,
П.М. САНЬКОВ¹, Л.В. КИСЛИЦЯ¹, Н. ІБАДОВ²

¹ ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»,
вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, 49005, Україна,
+380 97 780 3178, lina_kalnysh@ukr.net, tsp@pgasa.dp.ua

² Варшавський технічний університет Варшавська Політехніка,
пл. Політехніки, 1, Варшава, 00-661, Польща,
+4 866 112 7875, n.ibadov@il.pw.edu.pl

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕРМОАКТИВНОЇ ПОКРІВЕЛЬНОЇ ПАНЕЛІ

Вступ. Використання сонячної енергії в будівництві набуває широкого розповсюдження, зважаючи на стрімке зростання тарифів на енергоресурси.

Проблематика. Покрівля будівлі відповідає за 10–25 % тепловитрат в опалювальний сезон. В літній період інтенсивне нагрівання великої площі покрівлі призводить до підвищення температури всередині приміщення та, відповідно, до активного використання систем кондиціонування.

Мета. Розробка експериментального зразка термоактивної покрівельної панелі, яка містить матеріал з фазовим перетворенням, та дослідження експлуатаційних показників зразка в літній період з подальшим експлуатуванням як додаткового джерела опалення або кондиціонування повітря для покращення температурного балансу мікроклімату всередині будівлі.

Матеріали й методи. Натурні дослідження виконано в липні 2018 року на експериментальному зразку термоактивної покрівельної панелі, яка містить матеріал з фазовим перетворенням в металевому корпусі, що захищений мідним покрівельним листом та ефективним утеплювачем.

Результати. При виконанні експериментальних досліджень термоактивної покрівельної панелі отримано різницю температур (на вході та виході), яка змінюється від 1,2 до 4 °C протягом 10 год. 45 хвилин. Наявність матеріалу з фазовим перетворенням дозволяє знизити температуру покрівельного листа приблизно вдвічі: датчик M01 зафіксував максимальну температуру 87,8 °C з матеріалом із фазовим перетворенням та 43,7 °C — без вказаного матеріалу.

Висновки. Використання матеріалу з фазовим перетворенням знижує температуру мідного листа внутрішньої поверхні покрівельної панелі вдвічі під час проведення дослідів в літній період. Застосування подібної технології доцільне для зменшення витрат енергії на кондиціонування повітря всередині приміщення, для енергозберігаючого, екологічного та автономного будівництва житлового чи промислового призначення.

Ключові слова: енергоефективність, матеріал з фазовим перетворенням, покрівельні панелі.

У зв'язку із зобов'язаннями, взятими Україною перед МВФ, невпинно зростають тарифи на всі види енергії (рис. 1). За останні п'ять років тарифи на електроенергію зросли в чотири рази, на теплову енергію — втричі, а на газ — в 2,5 рази [1]. Така не-

Цитування: Дікарев К.Б., Кузьменко О.М., Петренко В.О., Саньков П.М., Кислиця Л.В., Ібадов Н. Експериментальні дослідження експлуатаційних показників термоактивної покрівельної панелі. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 2. С. 62–71. <https://doi.org/10.15407/scin16.02.062>

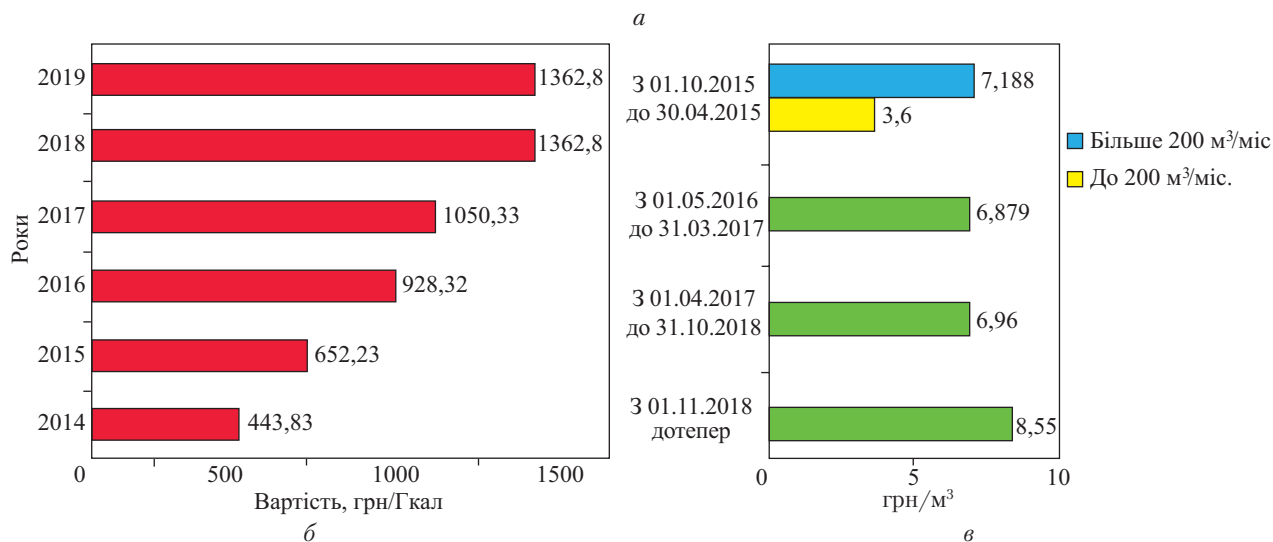


Рис. 1. Динаміка тарифів на енергоносії для населення України за 2014–2019 рр.: а – електроенергія; б – теплова енергія; в – природний газ

гативна тенденція спричиняє розвиток технологій, спрямованих на енергозбереження в усіх сферах економіки і в будівництві зокрема.

В Україні недостатньо уваги приділяється технологіям, що сприяють використанню огороджувальних конструкцій як активних компонентів будівлі з метою ресурсозбереження. Попередні дослідження стосуються здебіль-

шого покращення термічної однорідності огороджувальних конструкцій [2] або використання відновлювальних джерел енергії у будівництві [3]. Покрівля будівлі, за різними оцінками, відповідає за 10–25 % тепловитрат в опалювальний сезон. Водночас, в літній період інтенсивне нагрівання великої площі покрівлі спонукає до активного використання

систем кондиціювання, що, безумовно, призводить до підвищення енерговитрат. Таким чином, набуває актуальності розробка нових конструктивних технологічних рішень комбінованого типу, що виконують одночасно захисну та енергонакопичувальну функцію. З цією метою доцільно застосовувати матеріали з фазовим перетворенням (МФП), що дозволяє вдосконалювати наявні огорожувальні конструкції для перетворення сонячної енергії в корисну та забезпечувати комфортний мікроклімат в приміщенні.

Матеріали з фазовим перетворенням дають можливість накопичувати теплову енергію і поступово віддавати її на потреби споживача [4]. Під час нагрівання МФП плавиться і акумулює тепло. Під час охолодження будівлі МФП застигає, а збережена енергія використовується для покращення температурного балансу будівлі. Таким чином, цей матеріал дає можливість збільшити теплову інерцію та зменшити потребу в кондиціонуванні або опаленні.

Аналіз досліджень К. Круатору [5, 6] показав, що використання комбінованих систем огорожувальних конструкцій з МФП (покрівель, фасадів) дозволяє забезпечити додаткову теплову енергію для промислових чи побутових потреб.

Дисертаційна робота доктора С. Анго [7] спрямована на розробку, вимірювання та виготовлення системи активного матеріалу з фазовим перетворенням для охолодження та розігрівання пасивного будинку Нарévото. Використаний підхід полягає, насамперед, у створенні сучасних систем теплових накопичувачів на базі МФП та у встановленні специфікації розробленої системи.

Ж. Бурдерон у своїй роботі [8] припускав, що МФП може бути використано для забезпечення достатньої інерції, щоб використовувати нічну прохолоду в найспекотніші години дня. Завдання системи теплообмінника повітря/МФП полягає в тому, щоб забезпечити будівлю властивістю саморегуляції мікроклімату без збільшення ваги її структури. Це дозво-

лило б поліпшити літній тепловий комфорт за рахунок системи вентиляції, поєднаної з МФП, і уникнути використання активного кондиціювання повітря.

Я. Косні зі співавторами [9] описали нову технологію сонячної покрівлі, яка складається з фотогальванічних металевих дахових панелей з інтегрованим кремнієвим аморфним елементом (PV) з повітряним прошарком і щільною ізоляцією з мінеральної вати та резервуару для зберігання МФП. Досвід показав, що в зимовий період, без необхідності зміни фаз, мансарда PV-МФП зменшила на 30 % навантаження на опалення порівняно з звичайними покрівлями. Навпаки, протягом літнього сезону, навантаження на кондиціонування повітря за технологією PV-MSP, були на 55 % нижчими, ніж у звичайних покрівлях.

Метою роботи А. Кабел [10] було проведення експериментального дослідження плоского сонячного колектора із ребристою поверхнею для сонячного повітряного опалення, з вбудованим МФП як обладнання для зберігання теплової енергії. Доведено, що при використанні МФП температура на виході гофрованого сонячного колектора була вищою за температуру навколишнього середовища на 1,5–7,2 °C протягом 3,5 год після заходу сонця, порівняно з 1–5,5 °C протягом 2,5 год заходу сонця для плоского колектора.

Р. Пул, Б. Марк та ін. [11] дослідили роботу системи зберігання з перфорованим сонячним колектором, яку можна використовувати в промислових і сільськогосподарських цілях. О. Фатах [12] з дослідниками додавали алюмінієвий порошок в МФП для поліпшення його теплопровідності та теплопередачі. З. Вандонг та ін. [13] порівнювали продуктивність перфорованого сонячного колектора та перфорованого плоского сонячного колектора з інтегрованим МФП. В. Бардара [14] перевіряли можливість використання незаскленних сонячних колекторів перфорованого типу для промислового сектора. Це дослідження було проведено з метою порівняння ефективності та про-



Рис. 2. Етапи виготовлення термоактивної покрівельної панелі: *а* – формування дерев'яного каркасу; *б* – МФП в опалубці; *в* – готовий зразок

дуктивності незасклених сонячних колекторів з традиційними заскленими сонячними колекторами в місцевих умовах. Ч. Хуан та ін. [15] провели аналітичний і експериментальний аналіз сонячного повітряного колектора з перфорованою гофрованою пластиною. Р. Халла та Д. Блоуер [16] розробили нове тверде покриття (з терміном експлуатації понад 50 років) з низькою випромінювальною здатністю.

Огляд наявних досліджень свідчить про активне використання сонячної енергії для перетворення її в джерело додаткового опалення, кондиціонування або підігріву води. В Україні дослідження комбінованого використання сонячного колектора та МФП не набули широкого розповсюдження. Тому виникає необхідність розробки технологічних рішень на основі світового досвіду з урахуванням місцевих умов України та галузі застосування – житлове будівництво.

Метою досліджень є розробка експериментального зразку термоактивної покрівельної панелі, яка містить матеріал з фазовим перетворенням, та визначення експериментальних показників зразку в літній період, для досягнення якої було сформульовано низку завдань:

- ◆ виготовити стенд, налаштувати обладнання, калібрувати датчики, фіксувати термопари для експерименту;
- ◆ проаналізувати робочі параметри (теплопровідність, тепловий опір, повітропроникність) термоактивної покрівельної панелі будівлі;
- ◆ виконати моніторинг та аналіз експериментальних досліджень в умовах лабораторії *SAMBI UTCB*;
- ◆ визначити експлуатаційні параметри термоактивної покрівельної панелі.

Гіпотезою експериментального дослідження є припущення, що в зимовий період енергозберігаюча покрівельна панель буде працювати як колектор, акумулюючи накопичену енергію для потреб додаткового опалення, а в літній період наявність МФП дозволить акумулювати надлишок тепла з покрівлі і виводити його за допомогою вентилятора для зменшення навантаження на систему кондиціонування. Для перевірки цього припущення розроблено два варіанти термоактивної покрівельної панелі: зразок 1 – панель з МФП; зразок 2 – панель без МФП.

Зразок 1 було побудовано в кілька етапів. Спочатку виготовлено дерев'яний каркас (рис. 2, *а*),

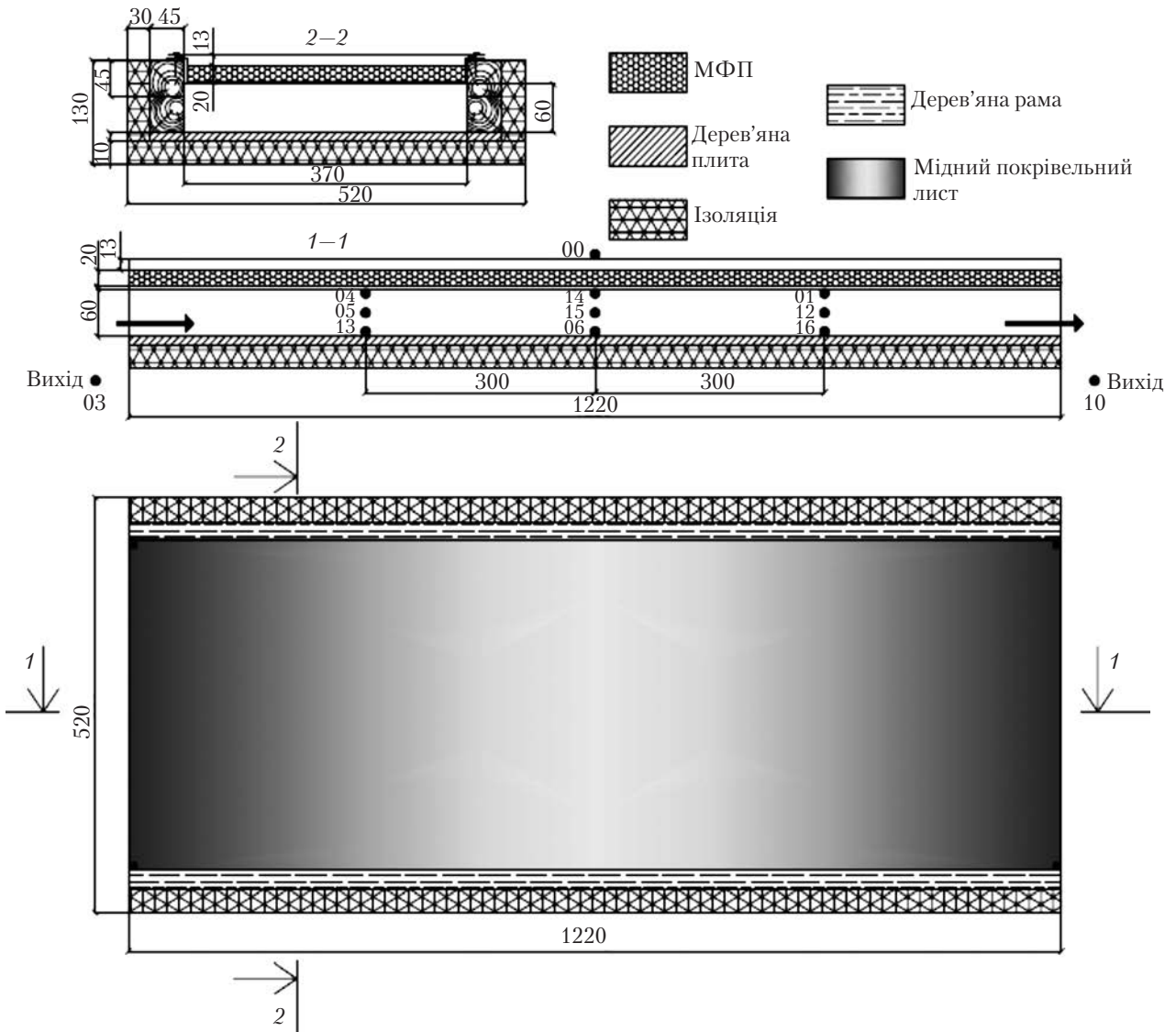


Рис. 3. Схема термоактивної покрівельної панелі з розмірами та точками розташування термопар

на якому закріплено металеву ємність, заповнену МФП в рідкому стані (рис. 2, б). Після цього зафіксували термопару й зібрали всі елементи термоактивної покрівельної панелі (рис. 2, в).

У зразку 2 ємність з МФП замінено на покрівельний мідний лист.

Енергозберігаюча покрівельна панель складається з низки елементів: дерев'яний каркас з розмірами, вказаними на рис. 3; теплоізоляцій-

ний шар – екструдований пінополістирол, що покриває раму для запобігання витрат тепла; металевий резервуар, в якому розміщено МФП; мідний лист, покритий матовою чорною фарбою для кращого поглинання поверхнею сонячної радіації; «вхідний» і «вихідний» отвори, виготовлені з екструдованого пінополістиролу, для циркуляції повітря; вентилятор на вході, продуктивністю 100 м³/год. Каркас зразка 1 покрито термоізоляційною стрічкою.

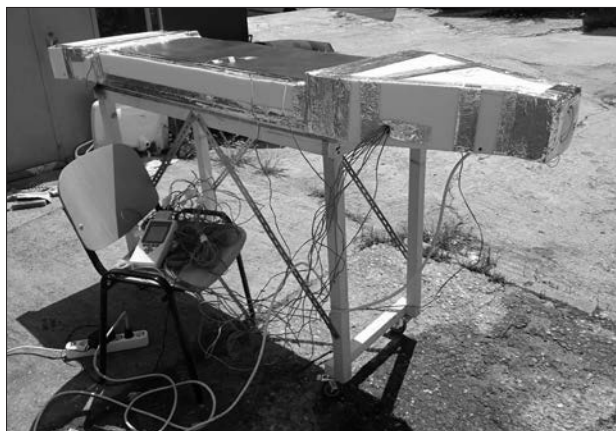


Рис. 4. Готова до дослідження термоактивна покрівельна панель

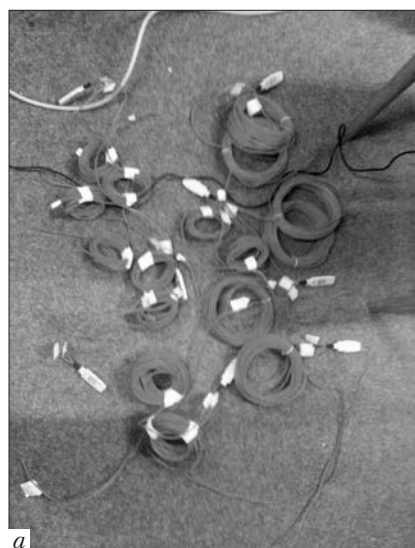
На рис. 4 представлено зображення готової до експериментального дослідження термоактивної покрівельної панелі. Фізичні характеристики МФП (*RUBITHERM RT35HC*), використаного для досліджень, наведено в таблиці 1.

Для проведення практичних дослідів використано обладнання дослідницького центру *SAMBI* (Advanced Research Center for Ambient Quality and Building Physics, Румунія), перелік якого наведено на рис. 5.

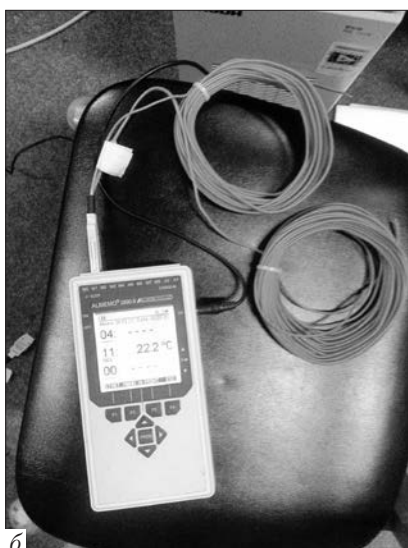
Таблиця 1. Робочі показники МФП

Характеристика	Значення
Діапазон плавлення, °С	34–36
Діапазон кристалізації, °С	36–34
Теплоємність, кДж/кг	240
Поєднання латентної теплоти та теплоти, що відчувається під впливом температури між 27 і 42 °С, Вт год/кг	67
Питома теплоємність, кДж/кг · °С	2
Щільність в твердому стані 25 °С, кг/л	0,88
Щільність в рідкому стані 40 °С, кг/л	0,77
Теплопровідність, Вт/(м · К)	0,2
Термічне розширення, %	12
Точка спалаху, °С	177
Максимальна робоча температура, °С	70

У ході дослідження кожен зразок піддавали впливу сонячного випромінювання упродовж 6 годин з 10 до 20 липня 2018 року на базі дослідницького центру в Румунії (м. Бухарест). Середньомісячний рівень сонячної радіації в регіоні проведення експерименту для липня — 7,56 кВт год/м² за день, що є близьким до умов півдня України. Було отримано широку матрицю результатів, приблизно характерних і для зазначеного регіону України. Результати



а



б



в

Рис. 5. Обладнання, використане в дослідженні: а — термомпари; б — вторинний вимірювальний прилад; в — резервуар для калібрування *LAUDA ECO Silver*

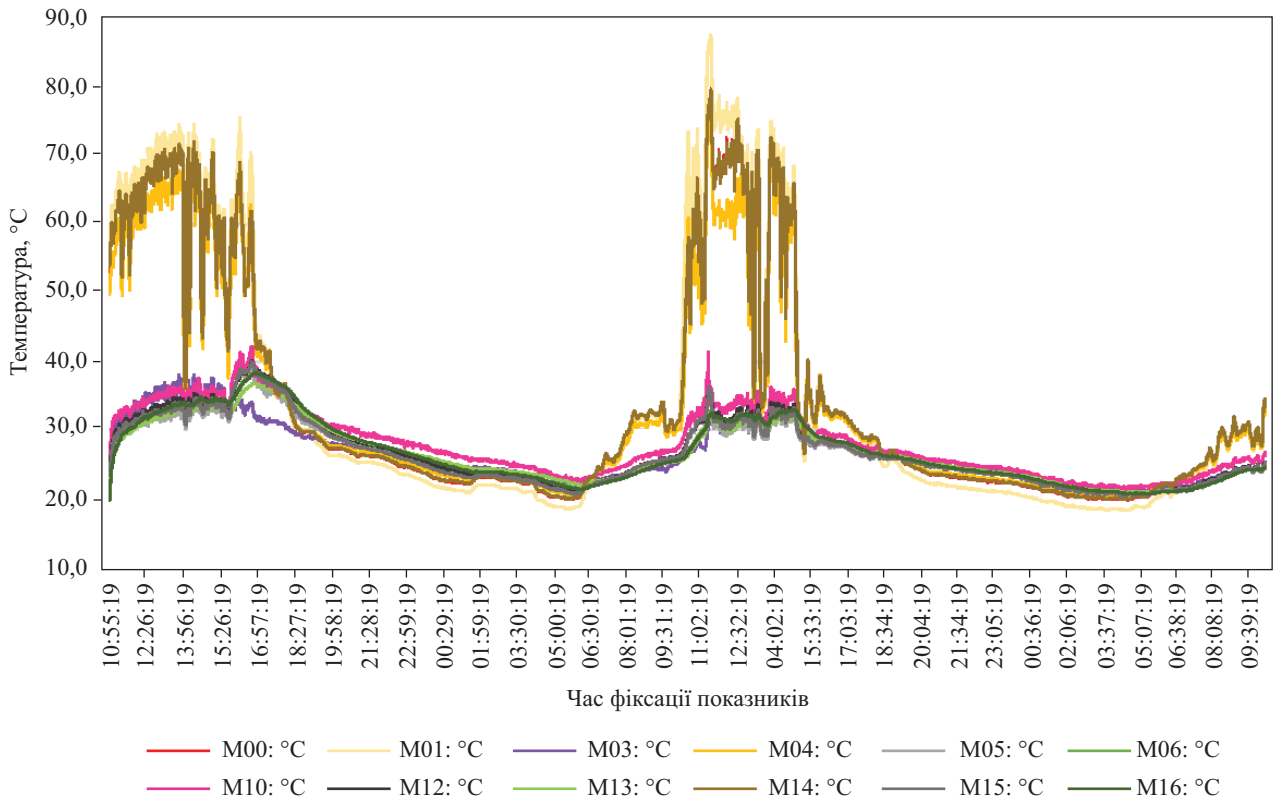


Рис. 6. Показники термопар зразка 1 (без МФП) станом на 12 та 13 липня 2018 року

найбільш типових денних вимірювань температури проілюстровано на рис. 6 для термоактивної покрівельної панелі без МФП та на рис. 7 для термоактивної покрівельної панелі з МФП.

Якщо проаналізувати показники за 12 і 13 липня, то отримуємо діапазон температур T (вихід M10) – T (вхід M03), який змінюється від 1,2 до 4,0 °C і від 1,3 до 4,0 °C (з 16:30 до 03:14 наступного дня), тобто протягом 10 годин 45 хвилин. Найбільш близький аналог [10] показує різницю від 1,5 до 10,0 °C протягом 7,5 годин.

Аналіз температур на поверхні мідного листа (під листом на внутрішній поверхні панелі) показує, що наявність МФП дозволяє знизити температуру приблизно в два рази. Наприклад, сенсор M01 фіксує максимальну температуру 87,8 °C для зразку звичайної покрівельної панелі без МФП, а для зразку з МФП значен-

ня датчика становить 43,7 °C. Узагальнені результати температур наведено в табл. 2 і 3.

Таким чином, очевидним є, що застосування матеріалу з фазовим перетворенням знижує температуру мідного листа внутрішньої поверхні покрівельної панелі в літній період вдвічі. Так, сенсор M01 фіксує максимальну температуру 87,8 °C для варіанту покрівельної панелі без МФП, а для випадку з МФП (термоактивна панель) значення датчика зменшується до 43,7 °C. Застосування дослідної технології доцільне для зменшення витрат енергії на кондиціонування повітря для екологічного та автономного будівництва, що є предметом подальших досліджень. Дослідження, наведені в роботі [17], дозволять більш ретельно підійти до вибору місця розташування такої панелі при реконструкції для будинків перших масових серій.

Крім того, попередній досвід показує, що тепло, яке зберігається в МФП, може бути спря-

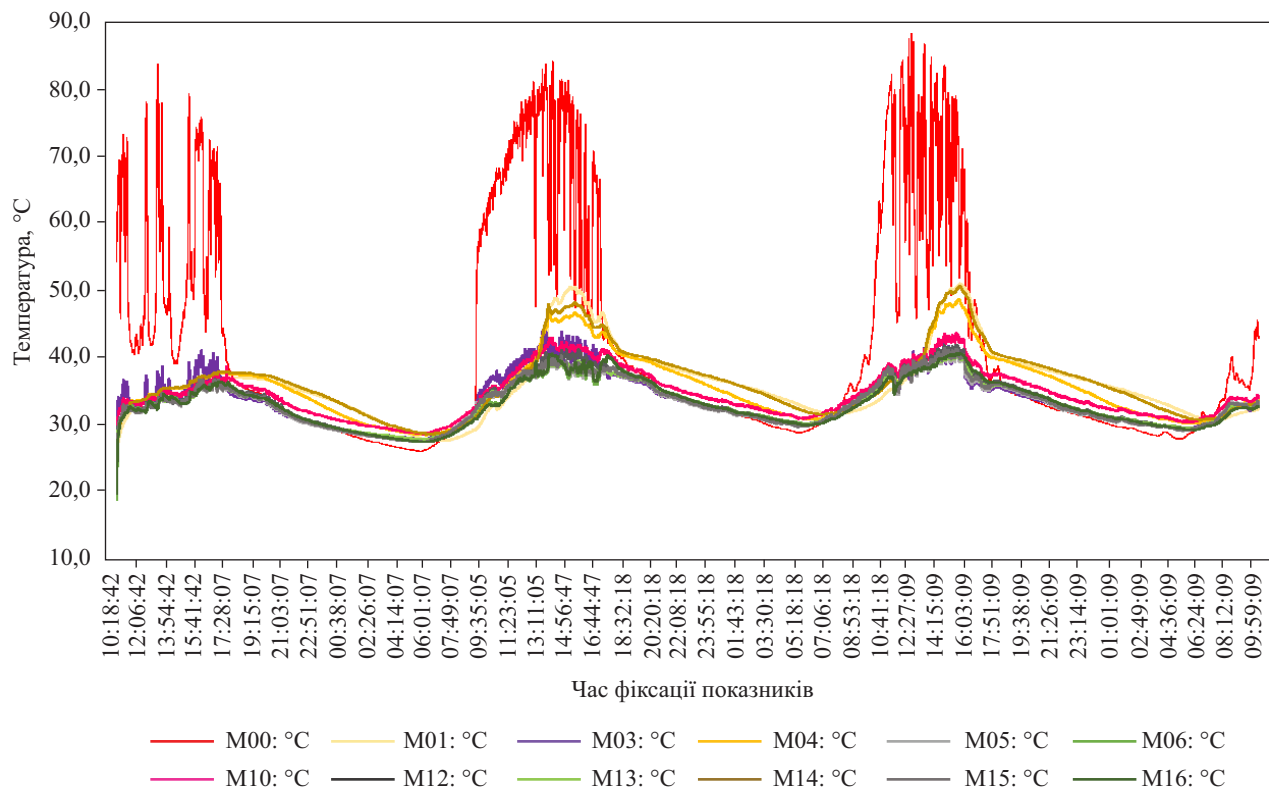


Рис. 7. Показники термопар зразка 2 (з МФП) станом на 17 та 18 липня 2018 року

Таблиця 2. Показники термопар на зразку з МФП, °C

Температура, °C	Дата					
	12.07.2018			13.07.2018		
	період з 10:00 до 17:00 години			період з 10:00 до 17:00 години		
	Термопарі			Термопарі		
M01	M04	M14	M01	M04	M14	
T_{\max}	43,2	39,3	40,8	43,7	41,3	43,3
T_{\min}	24,6	26,7	26,2	25,0	26,4	25,9

мовано в будинок для додаткового опалення або використано для сільськогосподарських цілей (у випадку промислового застосування). Різниця температур (вхід-вихід) є меншою, порівняно з аналогами, однак час надходження теплової енергії є довшим. Отже, надалі заплановано вдосконалити конструкцію та провести подібні дослідження в зимовий період для випадку, коли основною метою накопи-

Таблиця 3. Показники термопар на зразку без МФП

Температура, °C	Дата					
	17.07.2018			18.07.2018		
	період з 10:55 до 17:00 години			період з 10:00 до 17:00 години		
	Термопарі			Термопарі		
M01	M04	M14	M01	M04	M14	
T_{\max}	75,6	68,8	72,1	87,8	77,5	79,7
T_{\min}	35,7	35,1	36,1	25,5	27,1	26,5

чення тепла є отримання енергії для додаткового джерела опалення. Припускаємо, що збільшення товщини матеріалу з фазовим перетворенням дозволить отримати більшу різницю температур на вході та виході.

Також заплановано виконання подібних досліджень покрівельної панелі із застосуванням повітряного прошарку, захищеного скляною поверхнею. Оптимізація конструкції дозво-

литель використовувати зазначену панель з МФП для покращення мікроклімату всередині будівлі як в зимовий, так і в літній період.

Наведений у статті варіант конструкції термоактивної панелі з МФП рекомендовано до застосування в літній період.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Комуналка, проїзд та їжа: що буде дорожчати у 2019 році. URL: <https://minfin.com.ua/ua/2019/01/04/36143395/> (дата звернення: 14.04.2019).
2. Dikarev K., Berezyuk A., Kuzmenko O., Skokova A. Experimental and numerical thermal analysis of joint connection «floor slab – balcony slab» with integrated thermal break. *Energy Procedia*. 2016. V. 85, no. 1. P. 184–192. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215029902> (дата звернення: 14.04.2019).
3. Березюк А.М., Дікарев К. Б., Папірник Р.Б., Скокова А.О., Кузьменко О.М. Дослідження практичного застосування і ефективності використання відновлюваних джерел енергії у житловому будівництві. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. № 8. С. 28–32.
4. Pour une climatisation passive des bâtiments: les matériaux à changement de phase. URL: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/pour-une-climatisation-passive-des-batiments-les-materiaux-a-changement-de-phase-6881/> (дата звернення: 10.08.2018).
5. Croitoru C., Meslem, A., Atta R. Etude thermique d'un capteur solaire innovant à circulation d'air. Thermal study of a innovative solar collector with air circulation. *Revista Romana de Inginerie Civila*. 2015. V. 6, no.1. P. 26.
6. Croitoru C.V., Nastase I., Bode F.I., Meslem A. Thermodynamic investigation on an innovative unglazed transpired solar collector. *Solar Energy*. 2016. V. 131. P. 21–29.
7. Ango S.E. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase: doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech. Français, 2011. NNT : 2011ENAM0032ff. /pastel-00650275f.
8. Borderon J. Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique: doctoral dissertation, ENTPE. Français, 2012. 205 c.
9. Kośny J., Biswas K., Miller W., Kriner S. Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink. *Solar Energy*. 2012. V. 86, no. 9. P. 2504–2514.
10. Kabeel A.E., Khalil A., Shalaby S.M., Zayed M.E. Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM as thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*. 2016. V. 113. P. 264–272.
11. Mark R. Poole, Sanjay B. Shah, Michael D. Boyette, Larry F. Stikeleather, Tommy Cleveland. Performance of a Coupled Transpired Solar Collector–Phase Change Material-based Thermal Energy Storage System. *Energy and Buildings*. 2017. V. 161. P. 72–79.
12. Fatah O. Al Ghuol, K. Sopian, Shahrir Abdullah. Enhancement of Integrated Solar Collector with Spherical Capsules PCM Affected by Additive Aluminum Powder. *Journal of Thermodynamics*. 2016. P. 1–7.
13. Wandong Zheng, Huan Zhang, Shijun You, Yindan Fu. Experimental Investigation of the Transpired Solar Air Collectors and Metal Corrugated Packing Solar Air Collectors. *Energies*. 2017. V. 10, no. 3. P. 302.
14. Bandara W., Amarasekara B.K., Rupasinghe C.P. Assessment of the possibility of unglazed transpired type solar collector to be used for drying purposes: a comparative assessment of efficiency of unglazed transpired type solar collector with glazed type solar collector. *Procedia engineering*. 2018. V. 212. P. 1295–1302.
15. Huan Zhanga, Xintong Maa, Shijun Youa, Yaran Wang, Xuejing Zhenga, Tianzhen Yea, Wandong Zhenga, Shen Wei. Mathematical modeling and performance analysis of a solar air collector with slit-perforated corrugated plate. *Solar Energy*. 2018. V. 167. P. 147–157.
16. Hall R., Blower J. Low-emissivity transpired solar collectors. *Energy Procedia*. 2016. V. 91. P. 56–63.
17. Захаров Ю.І., Саньков П.М., Трифонов І.В., Ткач Н.О., Тьошина Л.О. Суть та особливості реконструкції житлових будинків різних конструктивних систем. *Nauka innov*. 2019. Т. 15, № 3. С. 81–93.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.06.19

Статтю прорецензовано / Revised 23.12.19

Статтю підписано до друку / Accepted 26.12.19

Dikarev, K.¹, Kuzmenko, O.¹, Petrenko, V.¹, Sankov, P.¹, Kyslytsia, L.¹, and Ibadov, N.²

¹ Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,
24a, Chernyshevskogo St., Dnipro, 49005, Ukraine,
+380 97 780 3178, lina_kalnysh@ukr.net, tsp@pgasa.dp.ua

² Warsaw University of Technology Warsaw Polytechnika,
1, plac Politechniki, Warsaw, 00-661, Poland,
+4 866 112 7875, n.ibadov@il.pw.edu.pl

EXPERIMENTAL STUDY OF OPERATING INDICATORS OF A THERMALACTIC COVERING PANEL

Introduction. The use of solar energy in construction is widespread due to a rapid growth in energy tariffs.

Problem Statement. The share of building roof in the heat consumption during a heating season accounts for 10–25%. In summertime, intensive heating of a large roof area leads to a high room temperature and, therefore, active use of air conditioning systems.

Purpose. The purpose is to develop an experimental sample of thermosetting roof panel containing a material with phase transformation and to study the operational parameters of the sample in summertime. Further, the roof panel is planned to be used as additional source of heating or air conditioning to improve the temperature balance of microclimate inside the building.

Materials and Methods. The field study was conducted in July 2018 on a pilot sample of thermosetting roof panel containing a material with phase transformation in a metal casing protected by a copper roofing sheet and an effective heater.

Results. When performing experimental study of the thermosetting roof panel, a temperature difference (between the inlet and the outlet) that varies from 1.2 to 4 °C for 10 h 45 min has been observed. The presence of material with phase transformation can reduce the roof sheet temperature about two times: the M01 detector has recorded a maximum temperature of 87.8 °C, in the case of material with phase transformation, and 43.7 °C, in the case without the use of the mentioned material.

Conclusions. The experiment has shown that in summertime the use of the material with phase transformation reduces twice the temperature of the copper sheet of the roof panel inner surface. The use of such technology is advisable to reduce the cost of energy for air conditioning indoor, enables construction of energy-saving environment friendly residential and industrial buildings.

Keywords: energy efficiency, material with phase transformation, and roofing panels.