

расчета распределения мощности излучения внутри рефлекторов параболического, составного параболического типа и фоклинов, а также для систем "рефлектор – приемник" [9].

1. Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 410 с.
2. S.A. Kalogirou. Solar Energy Engineering: Processes and Systems // London: Academic Press, 2009. – 760 p.
3. T.M. Elfouhaily, C.A. Guerin. Waves in Random Media, V.14, p. R1 (2004).

4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
5. P. Beckmann and A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Oxford – N.Y. – Paris: Pergamon Press, 1963. – 503 p.
6. Гаевский А.Ю., Молодкин В.Б., Носик В.Л. Металлофиз. новейшие технол. – 2010. – Т.32. – No.12. – С. 1613.
7. Gaevskii A., Molodkin V., Nosik V. Crystallography Reports. – 2010. – V.55. – No. 7. – P. 1135.
8. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1. – М.: Мир, 1981. – 280 с.
9. Гаевський О.Ю., Мельник О.В. Матеріали XIII міжнародної конференції "Відновлювана енергетика XXI століття". – АР Крим, 2012. – С. 173–181.

УДК 620.92

С.М.Хайрнасов, канд.техн.наук, **В.К.Заріпов**, канд.техн.наук, **Б.М.Рассамакін**, канд.техн.наук, **Д.В.Козак** (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Дослідження теплотехнічних характеристик сонячних теплових колекторів на основі алюмінієвих профілів

У статті розглядаються та наводяться результати досліджень двох типів конструкцій сонячних теплових колекторів – традиційного проточного та на основі теплових труб. Дослідження проводилися в температурному діапазоні теплоносія +10...+30°C і при щільності сонячного теплового потоку 400...1000 Вт/м². Отримані експериментальні теплотехнічні характеристики колектора на теплових трубах показали, що вони знаходяться на рівні традиційних проточних сонячних колекторів і мають значення 0,65-0,73. При цьому конструкція з тепловими трубами має менший гідравлічний опір у 2-2,4 рази.

В статье рассматриваются и приводятся результаты исследований двух типов конструкций солнечных тепловых коллекторов – традиционного проточного и на основе тепловых труб. Исследования проводились в температурном диапазоне теплоносителя +10...+30°C и при плотности солнечного теплового потока 400...1000 Вт/м². Полученные экспериментальные теплотехнические характеристики коллектора на тепловых трубах показали, что они находятся на уровне традиционных проточных солнечных коллекторов и имеют значение 0,65-0,73. При этом конструкция с тепловыми трубами имеет меньшее гидравлическое сопротивление в 2-2,4 раза.

Вступ. В останні десятиліття змінилася тенденція розвитку енергетики у світі внаслідок пошуку людством невичерпних, екологічно чистих енергетичних ресурсів. Головною проблемою стало високе енергоспоживання і забруднення навколишнього середовища різними видами промислової та побутової техніки. Але основним споживачем енергії, а також джерелом забруднення, є житлові будівлі. Країни Євросоюзу приймають посилені заходи щодо

підвищення енергоефективності та екологічного рівня свого житлового сектора. Сьогодні у Євросоюзі виконується програма і розробляється стандарт, який передбачає перехід до будівництва будинків з нульовою енерговитратністю – пасивний будинок з 2020 року [1]. Така програма спрямована на різке зниження витрати енергії на центральне опалення, гаряче водопостачання, додаткове опалення, системи вентиляції та кондиціонування, освітлення будівель. Основним

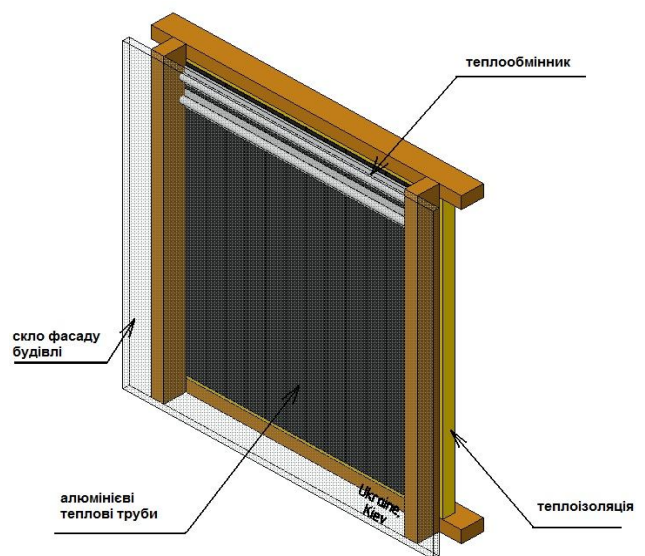
завданням є розробка технічних рішень, які дозволяють ефективно використовувати відновлювані джерела енергії, зокрема, сонячну. У цьому аспекті, враховуючи конструктивні особливості використання сонячних теплових та електричних систем, актуальним є спрощення їх інтеграції і використання зазначених систем як елементів дахів і фасадів будівель.

Сьогодні відомі традиційні конструкції плоских сонячних колекторів (СК) [2] широко використовуються по всьому світу. Однак, враховуючи їх стандартні конструкції, існують певні проблеми з їх інтеграцією в будівлі [3]. Хороші перспективи відкриває використання теплових труб (ТТ) [4] як автономних елементів сонячних колекторів. Але використання мідних ТТ в конструкціях високоєфективних вакуумних колекторів [5] також ускладнює їх інтеграцію за рахунок стандартизованої та обмеженої конструкції абсорбуючої вакуумної колби. Крім того, такі конструкції досить дорогі. У цьому напрямку було б цікаво вирішити задачу шляхом застосування більш гнучких і дешевих конструктивних рішень із використанням алюмінієвих ТТ.

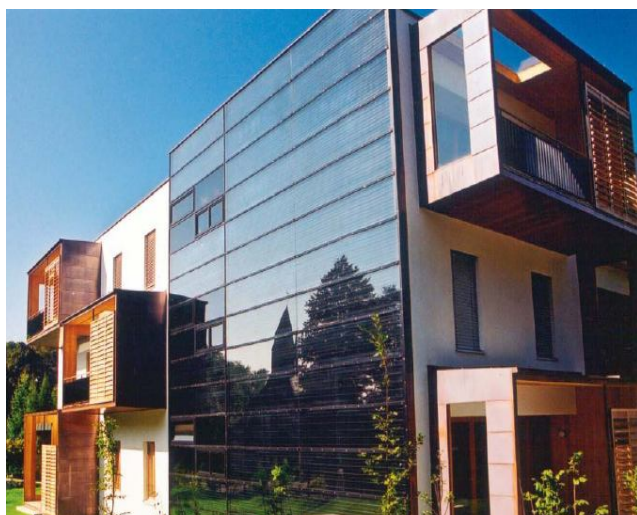
Авторами була запропонована конструкція алюмінієвої профільної теплової труби як теплопоглинального, так і теплопередавального елемента сонячної системи [4, 6]. Такі пристрої мають високі теплопередавальні характеристики (максимальний тепловий потік більше 250 Вт, термічний опір від 0,02 К/Вт до 0,05 К/Вт). Будівельні профілі з алюмінієвих сплавів поширені як конструктивний елемент будівлі, тому ТТ можуть виконувати роль елементів будівлі і одночасно ефективних елементів сонячної системи (рис. 1). У такому випадку відкривається можливість значно зменшити витрати на виготовлення сонячних теплових систем. Крім того,

це рішення забезпечує модульність, спрощує складання конструкції самого СК на фасаді будинку. Остання властивість досягається можливістю змінювати кількість ТТ у колекторі в залежності від габаритів будівлі.

На попередніх етапах авторами була розроблена конструкція сонячних теплових колекторів на основі плоских алюмінієвих ТТ [7]. Однак попередні випробування показали недолік такої конструкції СК – використання ТТ зменшує ефективність СК у порівнянні зі звичайним проточним. Для відповіді на питання про можливість використання таких систем, а також їх ефективності в порівнянні з традиційними конструкціями СК необхідно було провести додаткові випробування. У ході таких випробувань проведено експериментальні дослідження теплотехнічних і гідравлічних характеристик СК на теплових трубах і традиційної конструкції СК без ТТ. Причому остання характеристика дуже важлива при створенні сонячної теплової системи на основі великої кількості сонячних колекторів, що є важливим при використанні сонячних систем у фасадах будівель.



а



б

Рис. 1. Інтеграція сонячних теплових колекторів у фасадах будівель: а – можливий варіант сонячної теплової системи на основі ТТ як фрагмент фасаду будівлі; б – приклад сучасного фасаду будівлі з інтегрованими сонячними колекторами проточного типу в Німеччині [3].

В НТУУ "КПІ" було створено два експериментальні зразки: на основі алюмінієвих ТТ і традиційного проточного СК. Зразки мали однакові габарити, покриття теплопоглинаючої поверхні, марку скла і теплоізоляцію. Випробування проводилися на спеціально створеному експериментальному стенді з імітатором сонячного випромінювання. Основним елементом теплопоглинаючої поверхні були плоскі профілі алюмінієвого сплаву АД-31. Використання методу екструзії дозволило виготовити циліндричну трубку

(з капілярною структурою) діаметром 12,5 мм і плавник шириною 100 мм як одне ціле.

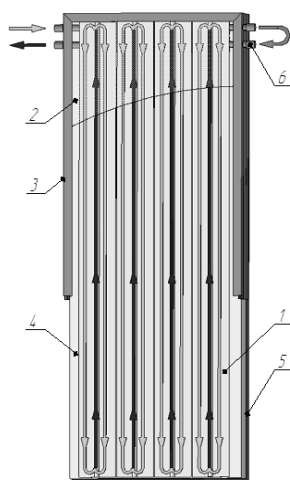
1. Експериментальні зразки сонячних колекторів. Об'єктами експериментальних досліджень теплотехнічних параметрів служили два сонячних колектори: СК-1 на основі плоских алюмінієвих профільних теплових труб і СК-2 проточного типу (рис. 2). Теплопоглинальна поверхня обох СК виготовлена шляхом нанесення чорного анодованого покриття.

Зразок СК-1 складається з теплопоглинальної поверхні 1 (рис. 2б), яка формується шляхом об'єднання в одній площині чотирьох плоских профільних ТТ. Зверху СК закритий прозорим склом 2 товщиною 4 мм, закріпленим кутником 3. На верхній частині поверхні ТТ, в їх зонах конденсації, встановлюється теплообмінник 6. Між ними знаходиться шар теплопровідної пасти КПТ-8 для зниження термічного опору контакту ТТ з теплообмінником. Нижній простір СК-1 заповнюється теплоізоляцією 4 і закривається днищем 5.

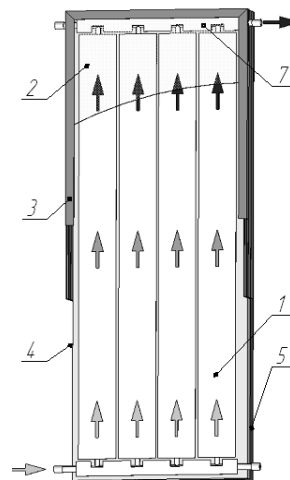
Проточний СК-2 має таку ж конструкцію як СК-1 і складається з теплопоглинальної поверхні 1 (рис. 2в), захисного скла 2, кутника 3, теплоізоляції 4 і днища 5. Але, на відміну від СК-1, теплопоглинальна поверхня СК-2 являє собою чотири паралельні алюмінієві плоскі оболонки з циліндричними трубками, привареними до двох колекторів 7 для проходу теплоносія.



а)



б)



в)

Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) і конструкція сонячних колекторів (б), (в):

1 – теплопоглинальна поверхня; 2 – скло; 3 – окантовка; 4 – теплоізоляція; 5 – днище; 6 – теплообмінник; 7 – колектор.

У сонячних колекторах з ТТ реалізується наступний теплообмінний цикл. Промені Сонця, падаючи на поверхню скла 2, проходять через нього і потрапляють на теплопоглинальну поверхню 1 зони випаровування ТТ. Отримана ТТ теплота передається до плоского теплообмінника, який встановлений на зонах конденсації ТТ. У разі проточного колектора теплота за рахунок процесу теплопередачі примусовою конвекцією рідини передається воді, яка протікає всередині трубок плоских профільних оболонок за Z-подібною схемою роздачі теплоносія.

2. Випробування сонячних колекторів. Для проведення теплотехнічних і гідравлічних випробувань створених діючих зразків СК була розроблена, виготовлена і від'юстирована експериментальна установка, зовнішній вигляд (а) і принципова схема (б) якої зображені на рис. 3.

Кожен із двох СК встановлювався на поворотний стіл дослідної установки під сонячний імітатор із галогенними лампами (Л). В даній установці використовувалися дванадцять ламп, кожна номінальною електричною потужністю 1000 Вт.

Щільність теплового потоку вимірюється від ламп піранометром П і регулюється зміною напруги за допомогою регуляторів електричної напруги (РЕН1, РЕН2) за показаннями вольтметрів (В1-В4). Лампи відрегульовані таким чином, що похибка зміни щільності теплового потоку по робочій поверхні не перевищує $\pm 8\%$. Витрата води через СК вимірювалась за допомогою витратоміра (Р) і регулювалась вентиляем (Вн). Для вимірювання температури встановлені вісім датчиків температур – в тому числі на вході (Т1), на виході (Т2) потоку води і на теплопоглинальній поверхні ТП (Т3-Т8) для оцінки теплових втрат із поверхні.

В якості датчиків температури були використані мідь-константанові термопари, які кріпилися до поверхні за допомогою алюмінієвої стрічки з одностороннім клейким шаром. В якості модулів аналогового вводу використовувалися прилади "Овен" МВА (МВА1 і МВА2).

Випробування проходили при витраті води через колектор 0,5 л/хв, 1,0 л/хв і 1,5 л/хв та імітованому сонячному тепловому потоці 400 Вт, 500 Вт, 600 Вт, 700 Вт і 800 Вт. Визначалися основні теп-

лотехнічні характеристики (корисний тепловий потік, тепла ефективність СК), значення яких порівнювалися з розрахунковими даними. Також визначалася постійна часу кожного колектора при витраті води 1 л/хв і щільності сонячного теплового потоку 800 Вт/м².

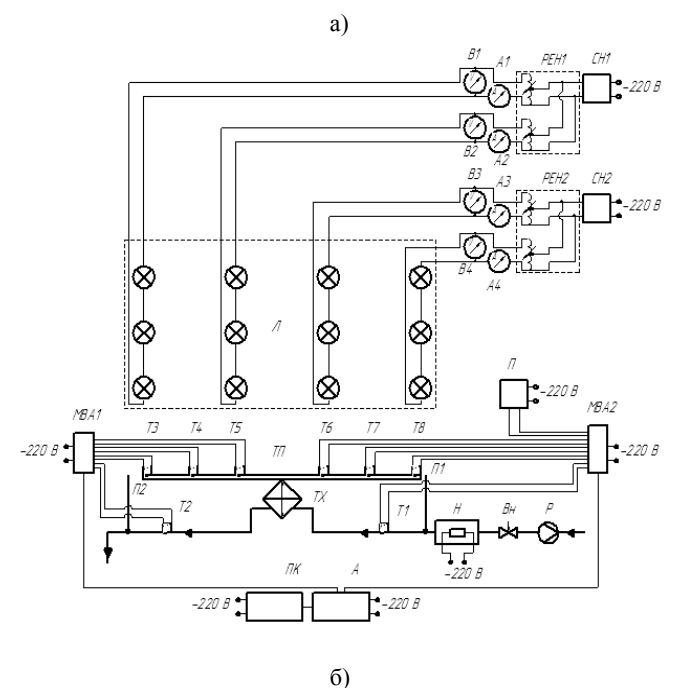
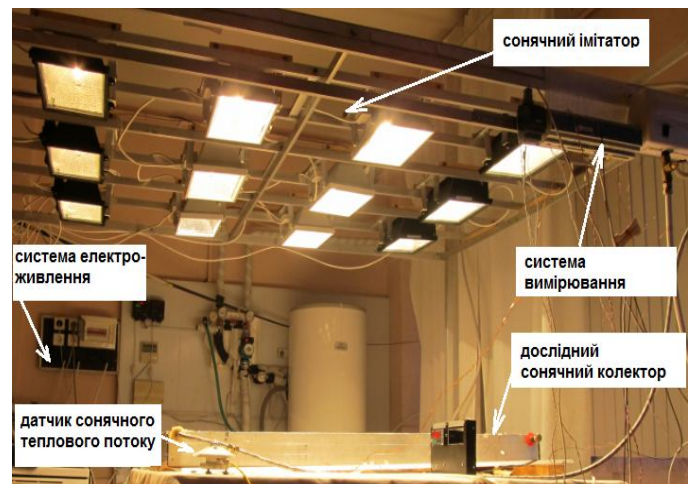


Рис. 3. Зовнішній вигляд (а) і електрична схема експериментальної установки: ТП – теплопоглинальна поверхня сонячного колектора; Л – лампи галогеннові; В1-В4 – вольтметр; А1-А4 – амперметр; РЕН1, РЕН2 – регулятор електричної напруги; СН1, СН2 – стабілізатор напруги; Т1-Т8 – датчики температури; Р – витратомір; Вн – вентилятор; Н – нагрівач (проточного типу); ТХ – теплообмінник-холодильник; П1, П2 – н'єзометр; П – піранометр; МВА1, МВА2 – модуль аналогового вводу; А – адаптер; ПК – персональний комп'ютер.

Розрахунок кривої теплової ефективності СК (коефіцієнт корисної дії η) проходив за наступною методикою [8]:

$$\eta = C_0 - C_1 \cdot X - C_2 \cdot E \cdot X^2, \quad (1)$$

де C_0 – ступінь ефективності колектора при нульових теплових втратах; C_1 і C_2 – коефіцієнти теплових втрат за рахунок конвекції та випромінювання; X – відношення перепаду температур між теплопоглинальною поверхнею колектора $t_{тп}$ і навколишнім середовищем $t_{нс}$ до щільності падаючого сонячного випромінювання E . Значення коефіцієнтів C_0 , C_1 і C_2 приймалося на основі європейських стандартів [8].

Теплова ефективність η СК розраховувалася як відношення корисного теплового потоку до загального.

Корисний тепловий потік дорівнює:

$$Q_{кор.} = G_v \cdot C_p (t_{вих} - t_{вх}), \quad (2)$$

де G_v , C_p – витрата і теплоємність теплоносія; $t_{вих}$, $t_{вх}$ – його температура на виході та на вході в теплообмінник СК.

Загальний тепловий потік, що падає на теплопоглинальну поверхню площею $F_{тп}$, дорівнює:

$$Q_{общ.} = E_{пад} \cdot F_{тп}. \quad (3)$$

3. Результати випробувань. Аналізуючи результати, можна відзначити, що ефективність роботи СК залежить в основному від параметра X колектора. Вона збільшується зі зменшенням X , а саме – при збільшенні щільності падаючого сонячного випромінювання E або зменшенні перепаду температур між теплопоглинальною поверхнею колектора $t_{тп}$ і навколишнім середовищем $t_{нс}$. Іншими словами, чим менша різниця температур поверхні теплообміну і навколишнього середовища, при одному і тому значенні E , тим краща конструкція СК і більша його ефективність.

Витрата теплоносія через теплообмінник СК мало впливає на його теплову ефективність, яка трохи підвищується при збільшенні витрати (рис. 4, точки – експеримент). Зі збільшенням витрат від 0,5 л/хв до 1,5 л/хв ефективніше охолоджується теплопоглинальна поверхня, в результаті чого зменшуються теплові втрати від СК, тобто ефективність роботи колектора трохи зростає.

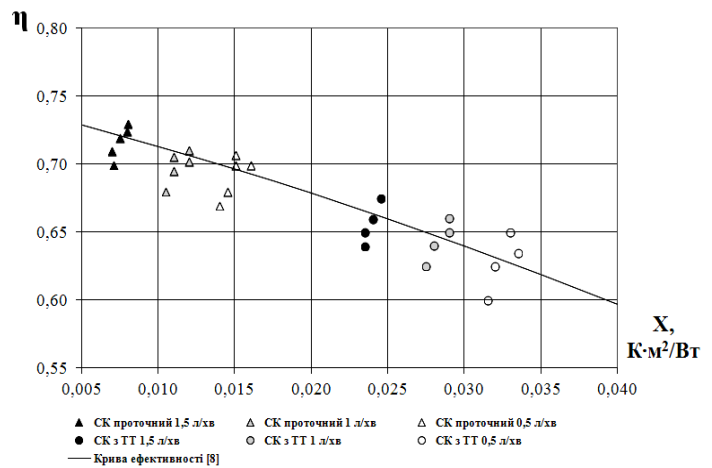


Рис. 4. Залежність роботи сонячного колектора від витрати теплоносія.

Порівняння експериментальних даних на рис. 4 дозволяє зробити висновок, що два макети СК мають високу ефективність роботи. Їх коефіцієнт теплової ефективності збігається з кривою (кривою ККД) [8] для даного типу (плоских) сонячних колекторів. Він знаходиться в діапазонах: 0,75-0,65 для витрат теплоносія 1,5 л/хв; 0,73-0,63 для 1,0 л/хв і 0,7-0,6 для витрати 0,5 л/хв. СК без ТТ показує більш високу ефективність, що пояснюється меншим термічним опором між теплопоглинальною поверхнею і теплоносієм в теплообміннику СК. Це знижує температуру теплопоглинальної колекторної поверхні в порівнянні з панеллю з ТТ і, відповідно, дещо зменшує теплові втрати. Проте ця різниця незначна і складає від 20 до 40 Вт.

Ще однією важливою характеристикою СК є гідравлічний опір його теплообмінника, який впливає на економічність функціонування колектора у складі водонагрівальної установки.

Отримані результати вказують на дуже низькі значення гідравлічного опору розроблених конструкцій СК. Так, при стандартних витратах води 2,2 л/хв гідравлічний опір проточного СК-2 460 Па. Тоді як гідравлічний опір плоского СК марки *Vitosol100-F* при тих же витратах – 2120 Па, а марки *Vitosol 30H20* – 2500 Па (дані DIN CERTCO) [9, 10]. Порівняння експериментальних даних, отриманих на проточному СК-2 і на СК-1 (рис. 5), показує, що перший із них має гідравлічний опір в 2-2,4 рази вищий, ніж другий.

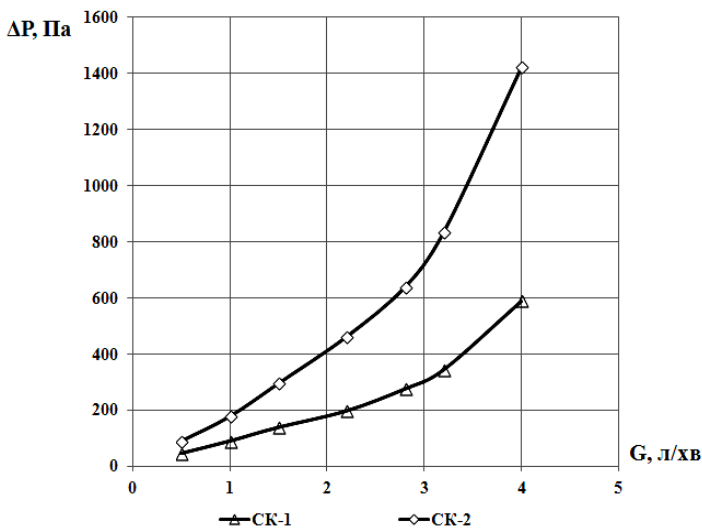


Рис. 5. Залежність гідравлічного опору сонячних колекторів від витрати теплоносія.

Різниця в даних щодо гідравлічного опору СК-1 і СК-2 пояснюється конструкцією їх теплообмінників. Проточний має колекторну побудову із Z-подібною роздачею води та декількома місцевими опорами, а СК на ТТ має більш компактний теплообмінник з меншою довжиною ходу теплоносія і одним місцевим опором.

Таким чином, СК на основі профільних алюмінієвих теплових труб мають приблизно таку ж теплову ефективність, як і проточний СК без ТТ, але менший гідравлічний опір. Це дуже важливо в разі використання у сонячних водонагрівальних установках декількох СК (п'ять і більше), що вимагає встановлення більш потужного насоса і підвищених енерговитрат при використанні СК традиційних конструкцій (колекторно-проточного або змієвикового типу). Крім того, використання ТТ забезпечує модульність, спрощує складання конструкції самого СК на фасаді будинку. При цьому попередня оцінка показує, що вартість готової сонячної теплової системи в даному випадку може бути знижена в 1,4 рази [11].

Висновки. Виконане дослідження показало можливість успішного використання створених алюмінієвих профільних теплових труб у сучасних конструкціях сонячних колекторів водонагрівальних установок. Зазначені ТТ можуть бути використані в якості ефективних і дешевих теплопоглинальних поверхонь сонячних колекторів і служити пасивними елементами для високоефективної пе-

редачі абсорбованого теплового потоку сонячних променів до теплоносія контуру геліосистеми.

На основі експериментальних та аналітичних досліджень ТТ і теплотехнічних випробувань діючих зразків СК, отриманих результатів та їх аналізу можна зробити наступні **висновки**:

1. Для вдосконалення конструкцій сонячних колекторів доцільно використовувати алюмінієві плоскі профільні теплові труби і селективні покриття. Технологія виготовлення алюмінієвих профілів зі сплаву 6060\6063 дає можливість отримати оптимальну конструкцію прокату і виготовляти дешеві, легкі, міцні та високотеплопровідні корпуси теплових труб для сонячних колекторів, які одночасно можуть виконувати функцію елемента будівлі.

2. Із зазначених профілів можна виготовляти як проточні СК із Z-подібною роздачею теплоносія, так і СК на теплових трубах із компактным теплообмінником. Теплові труби також можуть виконувати функцію елементів будівель, як у складі СК, так і без них. Вони мають низький термічний опір (від 0,02 К/Вт до 0,05 К/Вт) і високу теплопередавальну здатність (понад 250 Вт кожна).

3. Експериментальні дослідження теплотехнічних та гідравлічних характеристик сонячного колектора на основі плоских алюмінієвих профілів показали їх високу теплову ефективність (0,65-0,73) і низький гідравлічний опір (200 Па СК з ТТ і 460 Па СК без ТТ при витраті води 2,2 л/хв).

1. *Concerted Action / Energy Performance of Buildings Directive* <http://www.epbd-ca.eu/>
2. *S.B. Riffat, P.S. Doherty, E.I. Abdel Aziz.* Performance testing of different types of liquid flat plate collectors. *International Journal of Energy Research*. Volume 24, Issue 13, pages 1203–1215, 25 October 2000.
3. *Irene Stadler.* Facade integrated solar thermal collector. *AEE Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE*. P. – 10.
4. *D.A. Reay, P.A. Kew.* Heat Pipes. Fifth edition 2006. – 374 p.
5. *Dr. F. Mahjouri.* "Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors". www.thermotechs.com. 2005. Thermo Technologies, Web. 16 Sep 2009.
6. *Rassamakin B., S Khairnasov., Zaripov V., Rassamakin A., Alforova O.* Aluminium Heat Pipes Applied in Solar

Collectors // Solar Energy. – Serial No. 94. – August 2013. – pp. 145–154.

7. *Rassamakin B., Khairnasov S., Musiy R., Alforova O., Rassamakin A.* Solar Collector Based on Heat Pipes for Building Facades. Proceedings of the 4th International Conference in Sustainability in Energy and Buildings. Hakansson, A.; Höjer, M.; Howlett, R.J.; Jain, L.C. (Eds.). Series: Smart Innovation, Systems and Technologies, Berlin: Springer; Vol. 22, 2013, XXVI, pp. 119–126.

8. *QAiST D2 3 Guide to EN 12975 / A guide to the standard EN 12975 – ESTIF*

http://www.estif.org/projects/completed_projects/qaist/project_summary/wp2_solar_thermal_collectors/

9. *DIN CERTCO.* Summary of Collector Testing for Vitosol 100-F Typ SV1. Registration No 011-7S329-F, October 2007.

10. *Engineering VITOSOL 100, 200, 300,* Viessmann #5829 135-8 GUS 4/2006.

11. *Khairnasov S., Rassamakin B., Musiy R., Rassamakin A.* Solar Collectors of Buildings Facade Based on Aluminum Heat Pipes with Colored Coating. Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume 7, No. 5 (Serial No. 66), May. 2013. – P. 403–409.

УДК 621.383:621.472

А.В.Макаров, канд.фіз.-мат.наук, **В.О.Ганус**, **В.М.Дикуща** (Інститут фізики напівпровідників ім. В.С.Лашкарьова НАН України, Київ), **В.І.Горбулик**, канд.техн.наук (Чернівецький факультет НТУ "ХПІ", Чернівці)

Синхронізована фасеточна система інсталяції сонячних модулів

Розроблено та досліджено двохосову фасеточну синхронізовану слідкуючу систему для інсталяції сонячних модулів. Запропонована слідкуюча система зручна для застосування в умовах щільної міської забудови для розміщення на горизонтальних та вертикальних поверхнях дахів та стін висотних будинків. Представлені експериментальні характеристики макетного зразка запропонованої слідкуючої системи.

Разработана и исследована двухосевая фасеточная синхронизированная следящая система для инсталляции солнечных модулей. Предложенная следящая система удобна для применения в условиях плотной городской застройки для размещения на горизонтальных и вертикальных поверхностях крыши и стен высотных зданий. Представлены экспериментальные характеристики макетного образца предложенной следящей системы.

Вступ. Внаслідок дорожчання енергії від традиційних вуглеводневих та ядерних джерел, а також постійного зниження цін на енергію від нетрадиційних відновлюваних джерел має місце зближення значень їх вартості. Експерти прогнозують, що "вирівнювання" цін на електроенергію від традиційних та альтернативних джерел можна чекати уже в 20-30-х роках нинішнього сторіччя, після чого роль альтернативної енергетики значно зросте, і вона отримає статус одного з головних факторів забезпечення життєдіяльності людської цивілізації. Одним із таких альтернативних відновлюваних джерел електроенергії є фотовольтаїчні сонячні електростанції (далі СЕС) [1–5].

Розміщення фотовольтаїчних електростанцій. Розрізняють два підходи до практичного застосування СЕС: централізоване та децентралізоване їх розміщення. Прийнято вважати, що важливою перевагою фотовольтаїчних СЕС є можливість їх децентралізованого розміщення безпосередньо на енергоспоживаючому об'єкті. Завдяки цьому "сонячні" джерела електроенергії мають переваги по надійності, оскільки не уразливі з боку аварій або дій терористів, на відміну від таких енергогенеруючих об'єктів, як потужні атомні чи гідроелектростанції. Крім того, в разі децентралізованого використання СЕС, непотрібно витрачати кошти на прокладку та обслуговування ліній