

**Висновки.** 1. Створено абсорбер сонячного колектора з полімерного композиційного матеріалу на основі вуглепластику з наповнювачами.

2. Підвищення стабільності матеріалу абсорбера з наповненого вуглепластику можна отримати за рахунок збільшення частки наповнювача та зменшення розмірів дисперсної фази.

3. Раціональним є використання радіаційної

технології затвердіння композиції матеріалу абсорбера СК.

1. Резцов В.Ф., Суржик Т.В., Суржик О.М. Експериментальне дослідження теплопровідності композиційного матеріалу колектора сонячної енергії на основі вуглепластику // Відновлювана енергетика. – № 4. – 2007. – С. 47–50.

2. Суржик Т.В. Експериментальне дослідження абсорбера полімерних сонячних колекторів на довговічність // Відновлювана енергетика. – № 1. – 2008. – С. 25–29.

УДК 353.23:620.97

Д.П.Коломієць, Л.Л.Харченко (Національний університет харчових технологій, Київ),  
С.В.Матях (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### Визначення усередненої температури фотоелектричних батарей

*На основі використання теореми про дивергенцію розроблено метод розрахунку середньої температури фотоелектричних батарей. У результаті натурних експериментальних досліджень встановлено, що результати теоретичного аналізу та експериментальні дані якісно узгоджуються.*

**Ключові слова:** теорема про дивергенцію, фотоелектрична батарея, середня температура.

*С использованием теоремы о дивергенции разработан метод расчета средней температуры фотоэлектрических батарей. В результате натурных экспериментальных исследований установлено, что результаты теоретического анализа и экспериментальные данные качественно согласуются.*

**Ключевые слова:** теорема о дивергенции, фотоэлектрическая батарея, средняя температура.

**Вступ.** Як ніколи, ощадливе використання енергоресурсів стало актуальною задачею енергетичної безпеки України. Певні надії в цьому питанні покладаються на відновлювані джерела енергії, зокрема, на сонячну енергетику, використання якої помітно зростає [1].

Сонце дає нам безкоштовну енергію (біля  $1360 \text{ Вт/м}^2$ ), якою потрібно тільки правильно розпорядитися. Для цього важливо знати "радіаційний баланс" сонячного випромінювання, тобто, в якій кількості воно поступає у визначене місце за визначений час.

Оскільки найбільш інтенсивна інсоляція спостерігається в середині дня, то максимальне поглинання сонячного випромінювання в Україні, потужність якого на більшій частині території становить до  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , можна отримати за допомогою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), що орієнтовані у південному напрямку та змонтовані під кутом від  $30^\circ$  до  $65^\circ$

щодо обрїю. Але навіть при певних відхиленнях від цих умов геліосистема може виробляти достатню кількість енергії. Прийнятними є, наприклад, відхилення до  $45^\circ$  на південний схід або південний захід.

Очевидно, що за ясної погоди електрична потужність сонячної батареї, зібраної з ФЕП, істотно залежить від орієнтації їх робочої поверхні (площини) відносно потоку сонячної енергії – найбільша кількість енергії сприймається поглиначем при розташуванні його площини перпендикулярно напрямку інсоляції (рис. 1).

Разом з тим, внаслідок обертання Землі навколо своєї осі, що проходить через північний (NCP) і південний (SCP) астрономічний полюс (рис. 1а), а також зміни відстані від Сонця до Землі через еліптичну траєкторію руху Землі навколо Сонця (рис. 1б), в різні часи доби та пори року сонячні промені падають на земну поверхню циклічно (щорічно) під різним кутом. Отже,

для перетворення максимальної кількості сонячної енергії за світловий час необхідно мати оптимальне розташування (найкраще – екватор) та орієнтацію площини ФЕП у просторі.

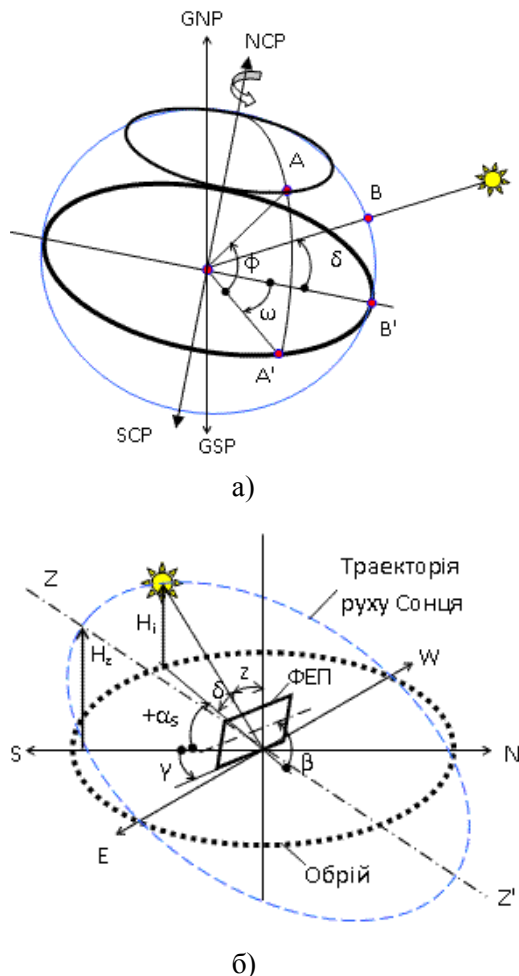


Рис. 1. Схема визначення положення точки А на поверхні Землі відносно сонячних променів (а) і кута інсоляції довільно орієнтованої площини ФЕП (б).

Загалом кут інсоляції (падіння сонячних променів)  $i$  на довільно орієнтовану площину ФЕП, яка має певний азимут  $\gamma_s$  та кут нахилу до обрїю  $\beta$  (рис. 1б), визначається за формулою [2]:

$$\begin{aligned} \cos i = \sin \beta \left[ \cos \delta (\sin \varphi \cos \alpha \cos \omega + \right. \\ \left. + \sin \alpha \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos \alpha \right] + \\ \left. + \cos \beta (\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi), \right. \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\delta$  – кут сонячного схилення;  $\varphi$  – широта місця установки ФЕП;  $\omega$  – годинний кут.

Кут схилення Сонця  $\delta$  залежить від обертання Землі навколо Сонця. Для конкретного дня його можна визначити за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin(220,975 + 0,9863 n), \quad (2)$$

або більш точно [3]:

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ \sin(23,45^\circ) \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 81) \right] \right\},$$

де  $n$  – порядковий номер дня у році, відрахований від 1-го січня.

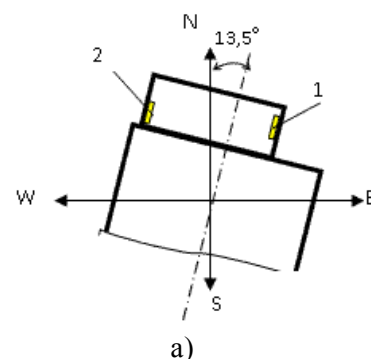
Широта місця установки  $\varphi$  показує, на скільки точка інсоляції зміщена від екватора. Так, для м. Києва – це  $50^\circ 27' 16''$  північної широти. Годинний кут  $\omega$  переводить місцевий сонячний час у число градусів, що Сонце проходить по небосхилу (зранку – негативний, увечері – позитивний).

Безпосередньо поверхню ФЕП по відношенню до обрїю може бути встановлена горизонтально ( $\beta = 0^\circ$ ), вертикально ( $\beta = 90^\circ$ ), або під довільним кутом у межах  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ . При  $\beta = 90^\circ$  рівняння (1) має вигляд:

$$\begin{aligned} \cos i = \cos \delta (\sin \varphi \cos \alpha \cos \omega + \sin \alpha \sin \omega) - \\ - \sin \delta \cos \varphi \cos \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

З даних, наведених у роботі [4], видно, що з березня по вересень фотоелектричні батареї, які розташовані вертикально, мають майже удвічі меншу питому електричну потужність, ніж ті, що зорієнтовані оптимально. Очевидно, що оптимальний кут нахилу  $\beta$  дорівнює широті місця установки, тобто для м. Києва це  $\sim 51^\circ$ .

Для встановлення можливостей використання сонячних батарей у якості джерела постійного струму та теплової енергії одночасно, а також оцінки ефективності роботи ФЕП за різних умов їх орієнтації було задіяно дві сонячні батареї типу СТАРТ БС-1, які розміщували вертикально на висоті 20 м від поверхні землі (7 поверх) у протилежних вікнах (двокамерні склопакети) в середині будівлі (м. Київ, вул. Володимирська, 72). Вісь будівлі зміщена від північного напрямку на  $13,5^\circ$  (рис. 2а). Азимут розташування батарей становив відповідно  $\gamma_1 = -75^\circ$  та  $\gamma_2 = +105^\circ$  (рис. 2б).



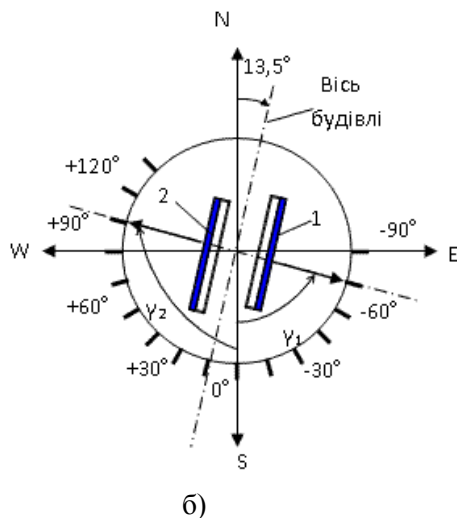


Рис. 2. План розташування сонячних батарей у будівлі (а) та азимут розташування ФЕП (б).

Кожна з батарей має 224 кремнієвих ФЕП, що розташовані у 32 ряди (по довжині батареї) по 7 елементів у ряду (по ширині батареї). Площа активної (світлоприймальної) поверхні батареї становить 0,443 м<sup>2</sup>. Загальна ефективна площа ФЕП – до 0,36 м<sup>2</sup>, коефіцієнт заповнення активної поверхні – понад 80%. Зовнішня поверхня ФЕП має характерний синій колір, внутрішня – світло-сірий. Розміри батареї 1030×450×30 мм. Монтажна площа – біля 0,5 м<sup>2</sup>. Електричні параметри: з'єднання окремих ФЕП – паралельне; номінальна напруга холостого ходу  $U_{xx} = 18$  В;

струм короткого замикання  $I_{к.з.} = 2$  А.

Вимірювання ЕРС, що генерувалась батареями ФЕП у режимі холостого ходу, проводили вольтметрами типу Щ4300. Температуру внутрішньої поверхні ФЕП батареї вимірювали за допомогою інфрачервоного термометра (оптичного пірометра) типу *Scan Temp 485 Professional* з лазерною і перехресною оптикою 20:01 (свідоцтво про державну метрологічну атестацію №24.387.13 від 01.02.13 р.).

Як видно з результатів вимірювань за погодних умов, наприклад 14.06.2013, розташування батарей суттєво впливає на напругу фотобатарей ( $U_{xx1}$  і  $U_{xx2}$ ) та особливо на температуру внутрішньої поверхні окремо взятих ФЕП – четвертих по горизонталі першого ( $t_b$ ), шістнадцятого ( $t_c$ ) і тридцять другого ( $t_n$ ) рядів відповідно (рис. 3).

Було встановлено [5–7], що влітку, навіть за несприятливих погодних умов (велика хмарність) та при неоптимальній (вертикальній) орієнтації сонячних батарей, температура внутрішньої поверхні їх ФЕП може зростати до 60°C і більше. Результати вимірювання температури поверхні кожного ФЕП (табл. 1-3) показали, що за погодних умов, наприклад, 04.07.2013, навіть коли батареї знаходяться в тіні (табл. 1), температура їх поверхні більша на 5-6 градусів від стандартної (25°C).

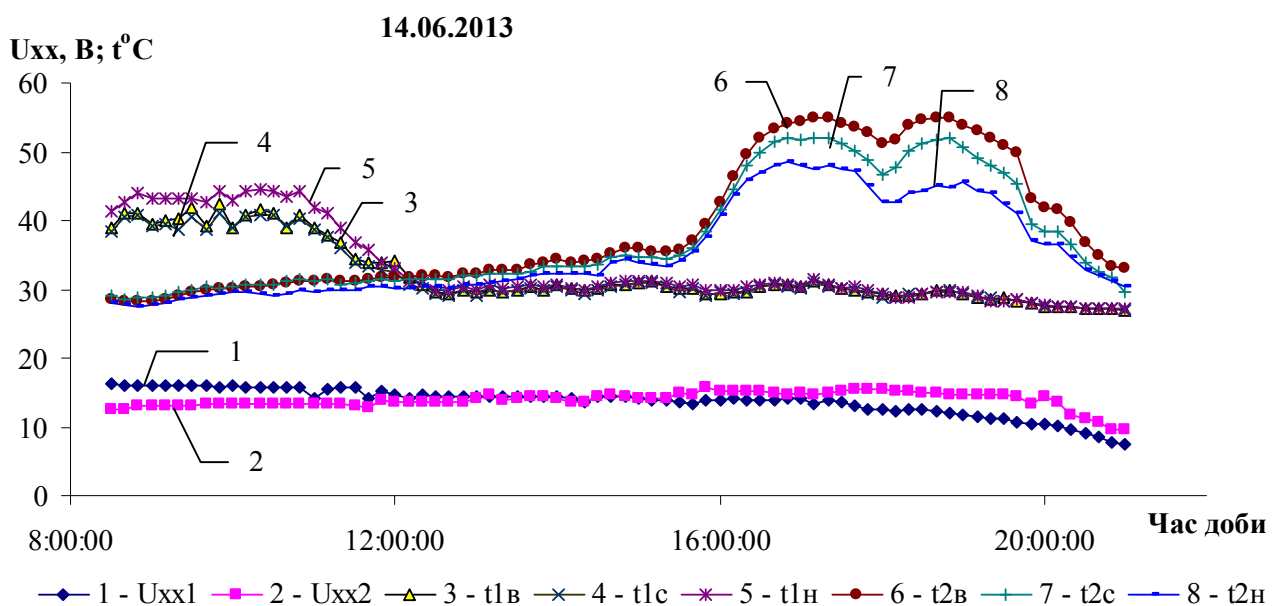


Рис. 3. Зміна напруги холостого ходу та температури внутрішньої поверхні ФЕП батарей БС №1 і №2 за погодних умов 14.06.2013.

**Таблиця 1. Температура внутрішньої поверхні ФЕП батареї №1 за погодних умов 04.07.2013 з 16<sup>00</sup> до 16<sup>18</sup> (тінява сторона, ясно) при  $U_{xx}$  в межах 13,2÷13,3 В**

| Розташування фотоелектричних перетворювачів |                |      |      |      |      |      |      | Середньоарифметична температура ряду |
|---------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------------|
| по вертикалі                                | по горизонталі |      |      |      |      |      |      |                                      |
|                                             | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |                                      |
| 1                                           | 31,2           | 31,3 | 31,2 | 30,9 | 30,6 | 30,5 | 30,5 | 30,89                                |
| 2                                           | 31,2           | 31,3 | 31,1 | 30,9 | 30,7 | 30,7 | 30,4 | 30,90                                |
| 3                                           | 31,4           | 31,3 | 31,1 | 30,8 | 30,8 | 30,6 | 30,4 | 30,91                                |
| 4                                           | 31,2           | 31,4 | 31,2 | 31   | 30,8 | 30,7 | 30,4 | 30,96                                |
| 5                                           | 31,2           | 31,5 | 31,2 | 31,1 | 30,8 | 30,8 | 30,5 | 31,01                                |
| 6                                           | 31,2           | 31,2 | 31,1 | 31,0 | 30,8 | 30,7 | 30,5 | 30,93                                |
| 7                                           | 31,2           | 31,2 | 31,1 | 30,9 | 30,7 | 30,6 | 30,5 | 30,89                                |
| 8                                           | 31,0           | 31,1 | 31   | 30,9 | 30,9 | 30,7 | 30,6 | 30,89                                |
| 9                                           | 30,8           | 31,0 | 31,2 | 30,9 | 30,7 | 30,5 | 30,5 | 30,80                                |
| 10                                          | 30,8           | 31,1 | 31   | 30,8 | 30,5 | 30,5 | 30,4 | 30,73                                |
| 11                                          | 30,6           | 31,0 | 30,9 | 30,9 | 30,5 | 30,4 | 30,4 | 30,67                                |
| 12                                          | 30,6           | 30,9 | 30,8 | 30,6 | 30,5 | 30,4 | 30,3 | 30,59                                |
| 13                                          | 30,4           | 30,8 | 30,8 | 30,7 | 30,5 | 30,4 | 30,3 | 30,56                                |
| 14                                          | 30,4           | 30,7 | 30,7 | 30,4 | 30,5 | 30,3 | 30,3 | 30,47                                |
| 15                                          | 30,6           | 30,7 | 30,5 | 30,4 | 30,3 | 30,2 | 30,2 | 30,41                                |
| 16                                          | 30,4           | 30,8 | 30,6 | 30,5 | 30,4 | 30,3 | 30,2 | 30,46                                |
| 17                                          | 30,6           | 30,7 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,3 | 30,2 | 30,46                                |
| 18                                          | 30,4           | 30,6 | 30,7 | 30,5 | 30,4 | 30,3 | 30,2 | 30,44                                |
| 19                                          | 30,4           | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,2 | 30,1 | 30,0 | 30,30                                |
| 20                                          | 30,4           | 30,6 | 30,5 | 30,5 | 30,3 | 30,2 | 30,1 | 30,37                                |
| 21                                          | 30,4           | 30,7 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,2 | 30,0 | 30,39                                |
| 22                                          | 30,6           | 30,5 | 30,5 | 30,4 | 30,2 | 30,1 | 29,9 | 30,31                                |
| 23                                          | 30,0           | 30,5 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,4 | 30,1 | 30,34                                |
| 24                                          | 30,1           | 30,6 | 30,6 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,2 | 30,41                                |
| 25                                          | 30,0           | 30,5 | 30,5 | 30,5 | 30,6 | 30,4 | 30,1 | 30,37                                |
| 26                                          | 30,1           | 30,5 | 30,5 | 30,6 | 30,5 | 30,2 | 30,0 | 30,34                                |
| 27                                          | 29,8           | 30,4 | 30,5 | 30,5 | 30,4 | 30,2 | 30,0 | 30,26                                |
| 28                                          | 29,9           | 30,4 | 30,5 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 29,9 | 30,30                                |
| 29                                          | 29,8           | 30,4 | 30,5 | 30,6 | 30,6 | 30,4 | 30,0 | 30,33                                |
| 30                                          | 29,8           | 30,2 | 30,6 | 30,7 | 30,7 | 30,6 | 29,8 | 30,34                                |
| 31                                          | 29,9           | 30,1 | 30,4 | 30,5 | 30,4 | 30,4 | 30,0 | 30,24                                |
| 32                                          | 29,8           | 30,0 | 30,2 | 30,3 | 30,1 | 30,1 | 29,8 | 30,04                                |

Ще більше відхилення від стандартної температури мають ФЕП при опроміненні сонцем. Так, для окремих перетворювачів батареї №1 воно становило понад 31 градус (табл. 2), а для ФЕП батареї №2 – понад 28 градусів (табл. 3).

Таблиця 2. Температура внутрішньої поверхні ФЕП батареї №1 за погодних умов 22.04.2013 з 10<sup>16</sup> до 10<sup>32</sup> (сонячна сторона, ясно) при  $U_{xx}$  в межах 15,19÷15,29 В

| Розташування фотоелектричних перетворювачів |                |      |      |      |      |      |      | Середньоарифметична температура ряду |
|---------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------------|
| по вертикалі                                | по горизонталі |      |      |      |      |      |      |                                      |
|                                             | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |                                      |
| 1                                           | 55,5           | 57,8 | 58,2 | 57,9 | 58,0 | 57,4 | 56,0 | 57,26                                |
| 2                                           | 57,0           | 58,2 | 58,6 | 58,5 | 58,7 | 58,4 | 56,6 | 58,00                                |
| 3                                           | 57,4           | 58,5 | 58,8 | 58,8 | 58,2 | 58,5 | 56,5 | 58,10                                |
| 4                                           | 57,0           | 58,3 | 58,4 | 57,9 | 57,6 | 57,6 | 56,1 | 57,56                                |
| 5                                           | 56,5           | 57,7 | 56,5 | 56,5 | 56,4 | 56,5 | 56,3 | 56,63                                |
| 6                                           | 55,2           | 56,1 | 56,0 | 56,4 | 56,2 | 56,1 | 54,6 | 55,80                                |
| 7                                           | 54,6           | 55,5 | 55,6 | 55,9 | 55,8 | 55,6 | 55,5 | 55,50                                |
| 8                                           | 54,4           | 55,2 | 55,2 | 55,3 | 55,4 | 55,3 | 54,1 | 54,99                                |
| 9                                           | 54,1           | 54,8 | 54,7 | 54,8 | 55,2 | 54,9 | 53,6 | 54,59                                |
| 10                                          | 54,0           | 55,1 | 54,5 | 54,8 | 54,8 | 54,7 | 53,3 | 54,46                                |
| 11                                          | 53,6           | 54,6 | 54,2 | 54,3 | 54,5 | 54,0 | 53,0 | 54,03                                |
| 12                                          | 52,8           | 54,0 | 53,9 | 54,0 | 54,1 | 53,7 | 52,2 | 53,53                                |
| 13                                          | 52,3           | 53,8 | 54,0 | 53,9 | 53,7 | 53,5 | 51,9 | 53,30                                |
| 14                                          | 51,9           | 53,1 | 53,5 | 53,5 | 53,3 | 53,0 | 51,3 | 52,80                                |
| 15                                          | 51,7           | 53,0 | 53,3 | 53,1 | 53,2 | 52,7 | 50,7 | 52,53                                |
| 16                                          | 51,5           | 52,7 | 53,2 | 53,1 | 53,3 | 52,6 | 50,0 | 52,34                                |
| 17                                          | 50,9           | 52,5 | 53,5 | 52,8 | 53,0 | 51,9 | 49,3 | 51,99                                |
| 18                                          | 50,0           | 52,3 | 53,1 | 52,6 | 52,7 | 51,1 | 47,8 | 51,37                                |
| 19                                          | 49,9           | 52,2 | 53,2 | 52,7 | 52,4 | 51,1 | 47,6 | 51,30                                |
| 20                                          | 49,4           | 51,4 | 52,3 | 52,5 | 52,0 | 50,6 | 47,1 | 50,76                                |
| 21                                          | 48,9           | 51,5 | 52,0 | 52,3 | 51,8 | 50,0 | 46,3 | 50,40                                |
| 22                                          | 48,3           | 50,6 | 51,6 | 52,1 | 51,4 | 48,6 | 45,8 | 49,77                                |
| 23                                          | 48,2           | 50,3 | 51,2 | 51,6 | 50,7 | 49,0 | 45,3 | 49,47                                |
| 24                                          | 48,0           | 50,2 | 51,5 | 50,6 | 50,8 | 49,0 | 45,5 | 49,37                                |
| 25                                          | 47,3           | 49,6 | 51,0 | 51,0 | 50,2 | 48,1 | 44,5 | 48,81                                |
| 26                                          | 46,3           | 48,8 | 51,0 | 51,0 | 50,0 | 48,1 | 44,7 | 48,56                                |
| 27                                          | 45,8           | 48,9 | 50,5 | 50,5 | 49,8 | 47,8 | 44,3 | 48,23                                |
| 28                                          | 45,7           | 48,2 | 50,2 | 50,2 | 49,2 | 47,3 | 44,1 | 47,84                                |
| 29                                          | 45,8           | 48,2 | 50,2 | 49,8 | 48,8 | 46,8 | 43,9 | 47,64                                |
| 30                                          | 45,6           | 47,9 | 49,4 | 49,2 | 48,1 | 46,5 | 44,1 | 47,26                                |
| 31                                          | 45,3           | 47,8 | 49,0 | 49,0 | 47,7 | 45,9 | 43,7 | 46,91                                |
| 32                                          | 46,1           | 48,1 | 47,3 | 48,6 | 47,5 | 45,9 | 43,3 | 46,69                                |

Таблиця 3. Температура внутрішньої поверхні ФЕП батареї №2 за погодних умов 04.07.2013 з 16<sup>20</sup> до 16<sup>38</sup> (сонячна сторона, ясно) при  $U_{xx}$  в межах 14,5÷14,6 В

| Розташування фотоелектричних перетворювачів |                |      |      |      |      |      |      | Середньоарифметична температура ряду |
|---------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------------|
| по вертикалі                                | по горизонталі |      |      |      |      |      |      |                                      |
|                                             | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |                                      |
| 1                                           | 48,2           | 50,1 | 50,3 | 52   | 52,8 | 53,2 | 51,4 | 51,14                                |
| 2                                           | 48,9           | 50,9 | 51,9 | 52,5 | 53,1 | 53,5 | 52,7 | 51,93                                |
| 3                                           | 48,9           | 50,7 | 51,5 | 52,2 | 52,6 | 52,8 | 52,4 | 51,59                                |
| 4                                           | 48,6           | 50,5 | 51,5 | 52,3 | 52,7 | 52,3 | 51,7 | 51,37                                |
| 5                                           | 48,8           | 48,5 | 49,8 | 51   | 50,8 | 50,9 | 50   | 49,97                                |
| 6                                           | 48,8           | 48,7 | 50   | 50,8 | 51,8 | 51,3 | 49,3 | 50,10                                |
| 7                                           | 48,6           | 48,6 | 49,8 | 50,8 | 51,6 | 51,7 | 50   | 50,16                                |
| 8                                           | 48,7           | 49   | 50,3 | 51,2 | 51,6 | 51,2 | 49,5 | 50,21                                |
| 9                                           | 48,8           | 49   | 50,1 | 51,1 | 51,1 | 51,2 | 49,4 | 50,10                                |
| 10                                          | 48,6           | 49,2 | 50,1 | 50,8 | 51,2 | 51,3 | 49,3 | 50,07                                |
| 11                                          | 48,3           | 48,8 | 50,2 | 50,8 | 51,1 | 51,3 | 49,5 | 50,00                                |
| 12                                          | 48,3           | 48,7 | 49,9 | 50,7 | 50,9 | 50,9 | 49   | 49,77                                |
| 13                                          | 47,7           | 48,4 | 49,6 | 50,3 | 50,4 | 50,6 | 48,9 | 49,41                                |
| 14                                          | 46,9           | 48,3 | 49,1 | 50,2 | 50,6 | 50,2 | 48,9 | 49,17                                |
| 15                                          | 47,1           | 47,7 | 49   | 49,9 | 50,2 | 50,1 | 49,1 | 49,01                                |
| 16                                          | 47,1           | 47,7 | 49   | 49,8 | 50,2 | 50   | 48,5 | 48,90                                |
| 17                                          | 47,2           | 47,6 | 48,7 | 49,6 | 50   | 49,5 | 48,5 | 48,73                                |
| 18                                          | 47,1           | 47,5 | 48,5 | 49,2 | 49,4 | 49,4 | 48,2 | 48,47                                |
| 19                                          | 46,4           | 48,5 | 48,3 | 48,7 | 49,2 | 49   | 48,6 | 48,39                                |
| 20                                          | 46,7           | 48,7 | 48,2 | 48,5 | 49   | 49   | 48   | 48,30                                |
| 21                                          | 46,3           | 48,6 | 48   | 48,6 | 49,3 | 49,3 | 47,9 | 48,29                                |
| 22                                          | 45,8           | 47,8 | 47,5 | 48,2 | 49,2 | 48,7 | 47,5 | 47,81                                |
| 23                                          | 45,9           | 48,2 | 47,9 | 48,5 | 49,3 | 49,3 | 47,8 | 48,13                                |
| 24                                          | 45,9           | 48   | 48,7 | 48,2 | 48,7 | 48,7 | 48,6 | 48,11                                |
| 25                                          | 46,2           | 47,5 | 47,5 | 47,8 | 48,3 | 48   | 48   | 47,61                                |
| 26                                          | 45,8           | 47,3 | 48,1 | 47,6 | 48,3 | 48,8 | 47,8 | 47,67                                |
| 27                                          | 45,9           | 47,2 | 48,1 | 47,6 | 48,5 | 48,4 | 47,7 | 47,63                                |
| 28                                          | 46,1           | 47,2 | 48,2 | 47,5 | 48   | 48,3 | 47,8 | 47,59                                |
| 29                                          | 48,8           | 47,5 | 48,5 | 47,7 | 47,9 | 48   | 47,5 | 47,99                                |
| 30                                          | 46,6           | 48,1 | 48,7 | 48,8 | 47,7 | 47,7 | 48,6 | 48,03                                |
| 31                                          | 45,9           | 47,6 | 48,1 | 47,8 | 48,1 | 48,5 | 48,6 | 47,80                                |
| 32                                          | 45,9           | 48   | 46,6 | 46,8 | 44,4 | 47,5 | 47,9 | 46,73                                |

На рис. 3 показані криві зміни середньоарифметичної температури горизонтальних рядів ФЕП сонячних батарей, побудовані за даними табл. 1-3. Бачимо, що у випадку перебування ФЕП у тінявій стороні (крива 1) різниця температур верхньої та нижньої частин батареї становить не більше 1°C, а ось при освітленні сонячними променями вона

може бути суттєвою: від 5 (крива 3) до 11 (крива 2) градусів.

З наведених даних видно, що температурне поле внутрішньої поверхні батарей є нерівномірним, особливо по висоті батареї. Певна відмінність температур поруч розташованих ФЕП (рис. 4) пов'язана, на наш погляд, з різницею їх загальних контактних термічних опорів.

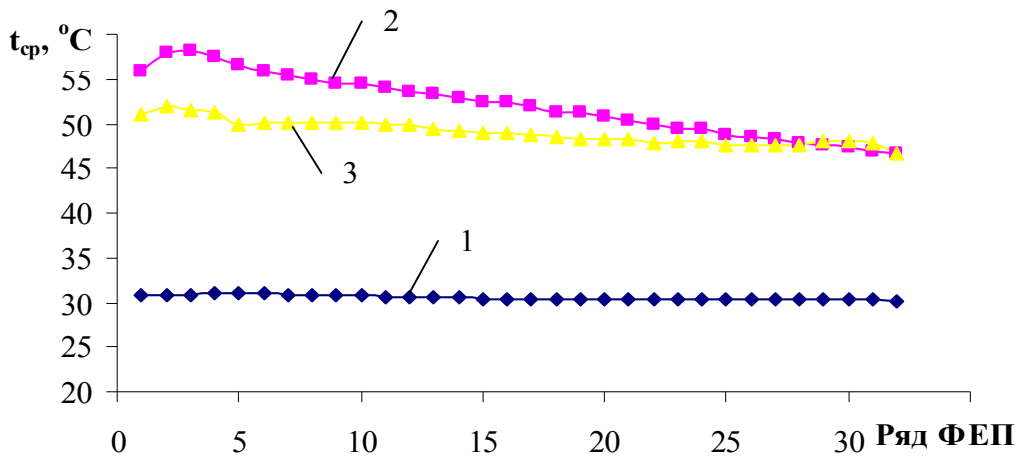


Рис. 3. Середньоарифметична температура поверхні ФЕП горизонтальних рядів сонячних батарей (зверху вниз): 1 – батарея №1 (тінь); 2 – батарея №1 (сонце); 3 – батарея №2 (сонце).

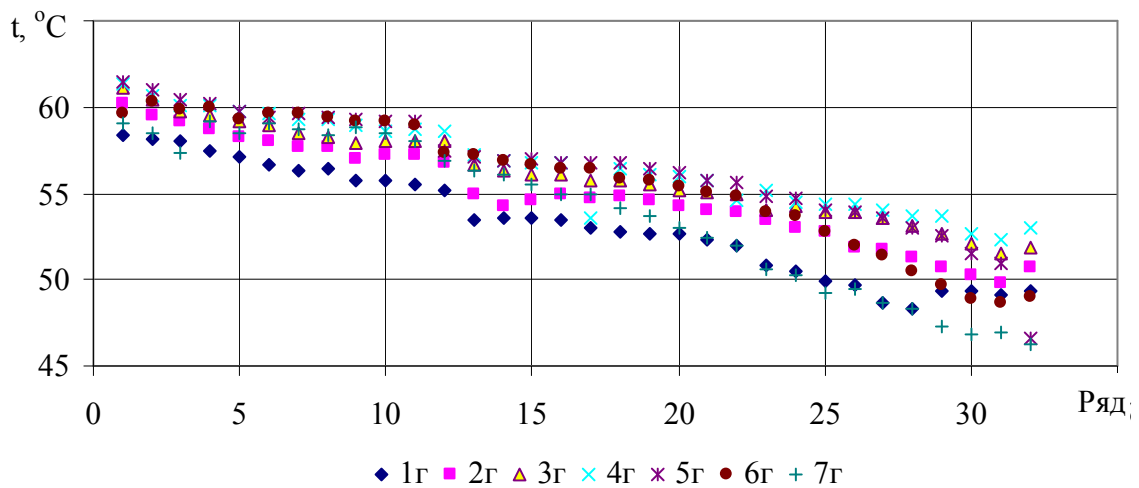


Рис. 4. Температурне поле внутрішньої поверхні ФЕП сонячної батареї БС-1 за погодних умов 20.07.2014 з 10<sup>45</sup> до 11<sup>20</sup> (сонячна сторона, ясно) при  $U_{xx}$  в межах 14,53÷14,55 В.

Відомо, що при температурі 40-45°C потужність сонячної батареї знижується на 15-17%. Тому застосування охолодження сонячних батарей не тільки підвищує їх електричну продуктивність, а й може слугувати джерелом отримання значної кількості теплової енергії. Для розрахунку ж теплової потужності сонячної батареї необхідна інформація про зміни в часі усереднених температур їх поверхонь, визначення яких, як правило, проводиться експериментальним шляхом або можна отримати аналітичними методами.

Пропонована методика аналітичного розрахунку усередненої температури батареї ґрунтується на застосуванні теореми про дивергенцію для рівняння нестационарної теплопровідності з об’ємним тепловиділенням:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla \cdot \{ \lambda \nabla T \} = q_v, \quad (4)$$

де  $\nabla \cdot$  – оператор дивергенції;  $\nabla T$  – градієнт температури  $T$  у фотоелектроперетворювачі;  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  – відповідно густина, питома ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності ФЕП;  $\tau$  – час;  $q_v$  – густина об’ємного омичного тепловиділення внаслідок перетворення сонячного випромінювання.

Для вибраної частоти сонячного випромінювання  $v$  величина  $q_v$  може бути представлена через дивергенцію вектора Умова-Пойнтінга  $\vec{\Pi}$  [8]:

$$\underline{q}_v = \vec{\delta}_{np} \cdot \vec{E} = \nabla \cdot \vec{\Pi}, \quad (5)$$

де  $\vec{\delta}_{np}$  – відповідно густина струму провідності;  $\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля для характерної частоти сонячного випромінювання.

Тому рівняння (4) може бути приведене до дивергентної форми, згідно з якою для довільного об'єму  $V$ , обмеженого замкненою поверхнею  $S$ , і для довільної векторної функції  $\vec{F}$  виконується умова:

$$\oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla \cdot \vec{F}) dV, \quad (6)$$

де  $d\vec{S} = \vec{n} |d\vec{S}|$  – вектор елементарної площини, спрямований убік одиничної нормалі  $\vec{n}$  до поверхні  $S$ .

Отже, наступним множенням рівняння (4) на  $dV$  та інтегруванням по об'єму  $V$ , обмеженому замкненою поверхнею  $S$ , застосування теореми про дивергенцію приводить рівняння (4) до наступного звичайного диференціального рівняння для середньої за об'ємом  $V$  температури

$$\bar{T}_{cp} = V^{-1} \int_V T dV \text{ при } \rho c_p = \text{const:}$$

$$\rho c_p \frac{dT_{cp}}{d\tau} = \frac{Q_+}{V} - \frac{Q_-}{V}, \quad (7)$$

де  $Q_+ = \oint_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S}$  – інтегральна густина потужності сонячного випромінювання, що падає по нормалі до поверхні  $S$ ;  $Q_- = \oint_S \vec{q} \cdot d\vec{S}$  – густина потужності теплової енергії, що відводиться від поверхні батареї ФЕП за рахунок природного або вимушеного охолодження, а також теплового випромінювання.

Після інтегрування рівняння (7) дозволяє визначити характер зміни середньооб'ємної температури при збільшенні та зменшенні густини енергії сонячного випромінювання протягом дня, а також значення встановленої температури  $T_{cp}$  за умови:  $Q_+ = Q_-$  (при  $\frac{dT_{cp}}{d\tau} = 0$ ).

Використання умов балансу  $Q_+ = Q_-$ , яке залежить від усередненої температури поверхні ФЕП, тотожної з середньою за об'ємом температурою ФЕП, дає також можливість за заданої

температури доквілля (охолоджуючого середовища) вибрати раціональні умови відбору тепла для зниження температури фотоелектричної батареї з метою підвищення коефіцієнта корисної дії перетворення енергії [9].

Крім того, враховуючи ту обставину, що зі зростанням температури поверхні фотобатареї інтенсивність конвективного і радіаційного тепловідводу  $Q_-$  в доквілля збільшується, то при  $Q_+ \cong \text{const}$  швидкість зростання температури  $T_{cp}$  в часі зменшується з відповідним зменшенням температурних напруг внаслідок нестационарності температури.

**Висновки.** Враховуючи те, що для відведення теплоти пропонується налаштувати примусове охолодження ФЕП із використанням композитів з різноманітними наповнювачами [10], отримані дані є актуальними для визначення оптимальних геометричних розмірів і параметрів сонячного фотоелектричного модуля з тепловідводами та коефіцієнта ефективної теплопровідності композитного матеріалу безпосередньо тепловідвідної панелі [11].

1. Кудря С.О., Пенелов О.В. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики / Відновлювана енергетика XXI століття: XIV-а міжнар. конф., 16-20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2013. – С. 27–28.
2. <http://solarsoul.net/orientaciya-i-ugol-naklona-solnechnyx-kollektorov>. Ориентация и угол наклона солнечных коллекторов. Публ. 12 июля 2012.
3. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills // Solar Energy. – 1969. – 12. – P. 333–346.
4. <http://khd2.narod.ru/gratis/solar.htm>. Солнечные установки. Публ. 24.01.2009
5. Коломієць О.Д., Коломієць Д.П., Чорна Н.А. Генерування ЕРС на вертикально розташованих фотоелектроперетворювачах сонячного випромінювання / XIII-а міжнар. конф., 16-20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2013. – С. 304–308.
6. Коломієць Д.П., Трепаліна А.К., Мазуренко О.Г., Кудря Т.С. Ефективність фотоелектроперетворювачів при вертикальному розташуванні сонячних батарей / Відновлювана енергетика XXI століття: XIV-а міжнар. конф., 16-20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2013. – С. 269–272.
7. Коломієць Д.П., Пелипенко А.І., Харченко Л.Л., Коломієць О.Д., Суржик О.М. Температурне поле вертикально розташованих батарей ФЕП сонячного випромінювання / Відновлювана енергетика XXI століття: XIV-а міжнар.



конф., 16-20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2013. – С. 273–278.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / пер. с англ. под общей ред. И.Г. Арамановича. – М: Наука, 1973. – 832 с.

9. Шевчук В.І. Еволюція комбінованого фотоелектричного модуля. / Відновлювана енергетика XXI століття: XV-а ювілейна міжнар. конф., 16-17 вересня 2014р. : тези доп. – м. Київ, 2014. – С. 186–191.

10. Кокошин С.С., Коломієць Д.П., Кучинський В.П., Суржик А.Н. Определение геометрических и параметров солнечного коллектора и фотоэлектрического модуля с теплоотводами из композита // Відновлювана енергетика – 2012. – №3. – С. 32–38.

11. Кокошин С.С., Коломієць Д.П., Кучинський В.П., Суржик О.М. Методика визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності композитного матеріалу тепловідвідної панелі / Відновлювана енергетика – 2012. – №4. – С. 51–54.

УДК 536.248.2

С.М.Хайрнасов (НТУУ "КПІ", Київ)

### Використання теплових труб у сонячних енергетичних системах: системи з концентрацією сонячної енергії, сонячні стіни, сонячні плити

*Сьогодні істотний внесок у вирішення завдання економії ресурсів роблять енергетичні системи на основі сонячних теплових колекторів та фотоелектричних батарей. Впровадження високоефективних теплопередавальних пристроїв (теплових труб) у конструкціях сонячних теплових колекторів дало змогу підвищити їх робочі характеристики. Однак використання теплових труб у якості теплопередавальних і теплообмінних конструктивних елементів дозволяє створити на їх основі нове обладнання для сонячної енергетики та підвищити ефективність наявного. Окрім сонячних теплових колекторів сьогодні можна виділити наступне обладнання для сонячної енергетики, де можуть широко використовуватись теплові труби: фотоелектричні і теплоелектричні системи з концентрацією сонячної енергії, сонячні стіни, сонячні плити для приготування їжі. В статті наводиться аналіз сучасного стану та перспектив використання теплових труб у таких сонячних енергетичних системах.*

**Ключові слова:** термосифон, тепла труба, сонячна енергетика, концентрація сонячної енергії, сонячні плити, сонячні стіни.

*Сегодня существенный вклад в решение задачи экономии ресурсов вносят энергетические системы на основе солнечных тепловых коллекторов и фотоэлектрических батарей. Внедрение высокоэффективных теплопередающих устройств (тепловых труб) в конструкциях солнечных тепловых коллекторов позволило повысить их рабочие характеристики. Однако использование тепловых труб в качестве теплопередающих и теплообменных конструктивных элементов позволяет создать на их основе новое оборудование для солнечной энергетики, а также повысить эффективность уже существующего. Кроме солнечных тепловых коллекторов сегодня можно выделить следующие системы и оборудование солнечной энергетики, где могут широко использоваться тепловые трубы: фотоэлектрические и теплоэлектрические системы с концентрацией солнечной энергии, солнечные стены, солнечные плиты. В статье приводится анализ современного состояния и перспектив использования тепловых труб в таких солнечных энергетических системах.*

**Ключевые слова:** термосифон, тепловая труба, солнечная энергетика, концентрация солнечной энергии, солнечные плиты, солнечные стены.

**Вступ.** У зв'язку з підвищенням цін на енергоносії та погіршенням екології одним із найважливіших завдань є пошук альтернативних джерел енергії, здатних замінити дорогий природний газ і нафтопродукти, які використовуються в комунальному секторі. У цьому аспекті є перспективними роботи, спрямовані на пошук і дослідження нових матеріалів, елементів та систем, що дозволяють знизити енергоспоживання. Глобальна потреба в економії енергії та необхідність використання відновлюваних джерел сьогодні відкривають нові підходи та методи одержання і перетво-

рення енергії. Одним із таких перспективних напрямків є використання сонячної енергії.

На сьогоднішній день відомі різні технології для перетворення сонячної енергії в теплову та електричну. Найбільш поширені та опрацьовані сьогодні – теплові сонячні колектори [1] та фотоелектричні батареї [2]. Однак нові вимоги до використання енергоресурсів відкривають шлях до розвитку та впровадження у виробництво таких систем, як сонячні енергетичні системи з концентрацією сонячної енергії [3], сонячні стіни [4], сонячні плити [5]. Так, наприклад, фотоелектри-