

УДК 621.3

В.Ф.Резцов, член-кор. НАН України, **В.П.Кучинський**, **О.М.Суржик** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ), **С.С.Кокошин**, канд.фіз.-мат. наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

Особливості розподілу температурного поля на поверхні фотоелектричних і фототермічних модулів за різних умов тепловідводу

В статті з використанням методу кінцевих елементів виконано аналіз розподілу температурного поля панелі фототермічного модуля з композиту за різних умов тепловідводу.

Ключові слова: сонячна енергетика, фотоелектричний модуль, тепловідвід.

В статье с использованием метода конечных элементов выполнен анализ распределения температурного поля панели фототермического модуля из композита при разных условиях теплоотвода.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрический модуль, теплоотвод.

Вступ. Ефективність роботи фотоелектричних перетворювачів в основному залежить від спектрального складу світла, інтенсивності освітлення і температури фотоелементів. Для серійних фотоелектричних модулів (ФЕМ) з природним повітряним охолодженням шляхом мінімізації термічного опору захисного покриття фотоелементів і конструктивних вузлів ФЕМ максимальна температура світлоприймаючої поверхні обмежена величиною 85°C [1]. У фототермічному модулі (ФТМ) разом з отриманням електричної енергії відбувається також знімання теплової енергії. При цьому слід зазначити, що збільшення температури фотоелементів призводить до зниження ККД перетворення [2].

При установці пластин фотоелементів на панелі з композиту тепловідвід здійснюється за допомогою розміщеного в ній колектора з примусовим водяним охолодженням [3]. В цьому випадку температурне поле ФТМ практично не залежить від параметрів довкілля (температури, вітру, опадів) і визначається тільки конструкцією елементів панелі та умовами тепловідводу. Ці умови можуть включати як можливі зміни витрати теплоносія (аж до його повного припинення), так і ймовірність закупорки однієї або декількох трубок колектора. Таким чином, визначення і аналіз температурного поля панелі за різних умов тепловідводу є актуальним завданням при розро-

бці елементів конструкції та експлуатаційних характеристик ФТМ.

Постановка задачі та метод розрахунку.

Принципова схема конструкції ФТ-модуля з тепловідвідною панеллю з композиційного матеріалу наведена на рис. 1, де зображений фрагмент його поперечного перерізу з односкляним покриттям.

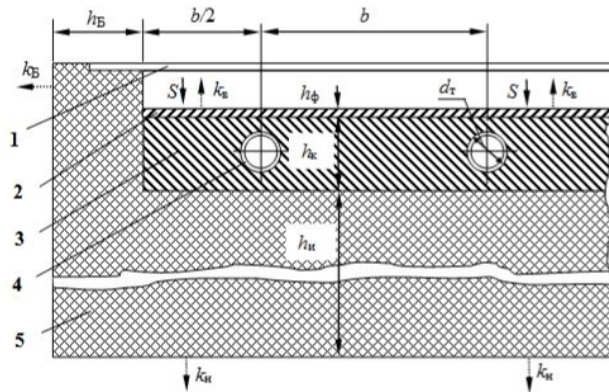


Рис. 1. Геометрична модель обраного розрахункового елемента фототермічного модуля.

При цьому: 1 – односкляне прозоре покриття; 2 – пластини фотоперетворювача; 3 – тепловідвідна панель з композиту; 4 – трубка для теплоносія; 5 – теплоізоляція. Товщина пластини фотоперетворювача $h_{\phi} = 0,35$ мм істотно менша від товщини тепловідвідної панелі з композиту $h_k = 8-20$ мм, а коефіцієнт теплопровідності матеріалу фотоперетворювача (кремній ВЧ) $\lambda_{\phi} = 156$ Вт/м·град може на два порядки перевищувати коефіцієнт теплопровідності композиту.

Виходячи з цього, постановка завдання і розрахунок основних теплових характеристик ФТМ може проводитися без урахування параметрів пластин фотоперетворювача і повністю співпадає з аналогічними розрахунками традиційних СК гарячого водопостачання з тепловідвідною панеллю з композиту.

Температурне поле в панелі ФТМ можна описати системою диференціальних рівнянь в декартових координатах, що складається з рівняння теплопровідності і рівнянь для підігрівання теплоносія у відповідній *i*-ій трубці колектора:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial x} - \frac{k_T \Pi}{C_p M_i} (T_{T,i} - \theta_i) = 0, \quad (2)$$

де $T(x, y, z)$ – шукане поле температури панелі ФТМ; $\theta_i(x)$ – середньомасова температура теплоносія в *i*-ій трубці колектора; $T_{T,i}(x)$ – температура внутрішньої поверхні *i*-ої трубки колектора; M_i – масова витрата теплоносія в *i*-ій трубці; Π – периметр внутрішньої поверхні трубки колектора; k_T – коефіцієнт тепловіддачі в трубках; C_p – питома теплоємність теплоносія; λ – коефіцієнт теплопровідності композиту; S – внутрішнє (поверхнєве) джерело тепла.

Для розрахункової області (рис. 1) на верхній, бічній і нижній межах, а також у трубках задаються граничні умови III-го роду, що враховують теплообмін поверхні з довкіллям за законом Ньютона-Рихмана:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k [T - \theta], \quad (3)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі (КТВ) для відповідної поверхні панелі та внутрішньої поверхні трубок колектора; $\theta = \theta_c$ для поверхні панелі та $\theta = \theta_i(x)$ для трубок; \mathbf{n} – модуль вектора нормалі до поверхні розділу середовищ.

При цьому КТВ на верхній поверхні ФТМ відповідає односкляному покриттю ($k_B = 6$ Вт/(м²·град) при середній температурі панелі 65°C і температурі довкілля 20°C). Коефіцієнт тепловіддачі в трубках k_T при зміні швидкості течії від 5 до 20 см/с (ламінальний режим, оскільки число $Re < 2300$) визначався за формулою:

$$k_T = 3,66 \cdot \lambda_B / d_B = 3,66 \cdot 0,612 / 0,004 = 560 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}, \quad (4)$$

де λ_B – коефіцієнт теплопровідності води.

У свою чергу, КТВ для нижньої $k_H = 0,74$ Вт/(м²·град) і бічної $k_B = 2$ Вт/(м²·град) поверхні панелі визначаються, виходячи з геометричних розмірів (товщини h_H і h_B) теплоізоляції та величини коефіцієнта тепловіддачі при природній конвекції в повітрі 8 Вт/(м²·град). Коефіцієнт теплопровідності композиту $\lambda = 2,5$ Вт/(м·град) приймався для варіанту з 40% об'ємним вмістом сталевого дробу і з'єднувальною сполукою у вигляді цементно-піщаної суміші [5].

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) і (2) проводився методом послідовних наближень, а розв'язок рівняння теплопровідності (1) у тривимірній постановці із вказаними граничними умовами (3) виконувався числовим методом кінцевих елементів (МКЕ) з використанням програми Comsol 3.3 [7]. За основу методики прийняті теоретичні положення, викладені в роботі [6]. Розрахункова область була представлена у вигляді N кінцевих елементів з 8 вузлами. Рівняння для підігрівання теплоносія [2] у відповідній *i*-ій трубці розв'язувалося методом Рунге-Кутта з початковою умовою $\theta_i(x_0) = \theta_{ex} = 20^\circ\text{C}$. Для першого наближення задавалася лінійна залежність $\theta_i(x) = \theta_{ex}$. У розрахунках також приймалось допущення про рівність значень M_i, k_T для всіх трубок колектора з примусовим рухом теплоносія.

Результати дослідження. Визначення і аналіз температурного поля ФТМ за різних умов тепловідводу проведено на прикладі експериментального зразка з наступними геометричними і теплофізичними параметрами:

геометричні розміри, мм	1200×540
зовнішній d_T і внутрішній d_B діаметр мідних трубок, мм	6; 4
відстань між трубками b , мм	67,5
кількість трубок n , шт.	8
товщина шару композиту h_K , мм	12
товщина шару теплоізоляції h_{IB}, h_{IB} , мм	50; 20
коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції λ_{II} , Вт/(м·град)	0,042
коефіцієнт теплопровідності міді λ_M , Вт/(м·град)	390
тепловий потік сонячної радіації S , Вт/м ²	740
температура навколишнього середовища θ_c , °C	20

На рис. 2 наведено розподіл температурного поля світлосприймаючої поверхні панелі при русі теплоносія (води) по всіх трубках колектора з масовою витратою $M = 0,36$ г/с у кожній трубці. При цьому букви А-Е є мітками ліній ізотерм, °С. Як видно, максимальна температура панелі ФТМ дорівнює $T_{\text{макс}} = 62^\circ\text{C}$, а температура теплоносія на виході досягає $\theta_{\text{вих}} = 52^\circ\text{C}$, що відповідає необхідному рівню температури для більшості обладнання гарячого водопостачання.

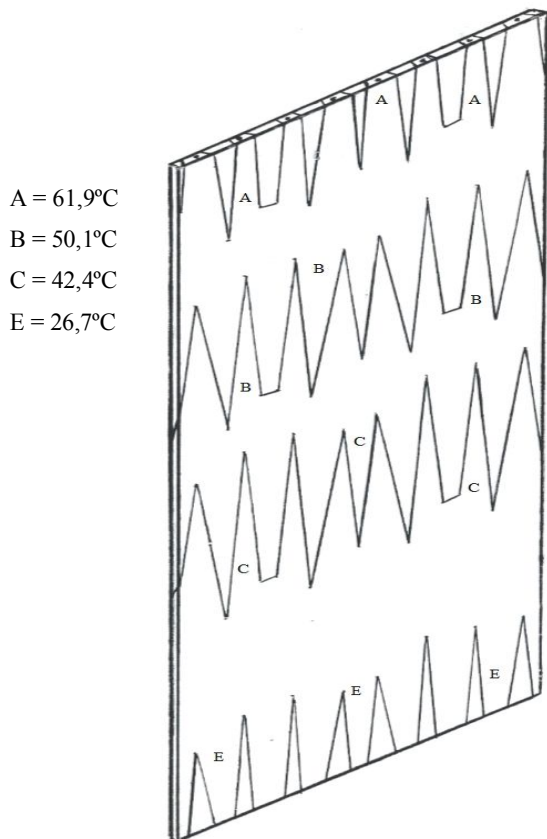


Рис. 2. Ізотерми розподілу температурного поля на плоскій поверхні фотопанелі (при охолодженні з примусовим рухом води по всіх трубках).

Збільшення витрати теплоносія від 0,21 до 1,2 г/с (рис. 3) знижує його температуру на виході з 65 до 30°C. При цьому відповідно максимальна температура світлосприймаючої поверхні панелі знижується з 69,5 до 44°C.

На рис. 4 показано розподіл температурного поля світлосприймаючої поверхні панелі ФТМ у випадку закупорки 2-х середніх трубок колектора при збереженні в інших масової витрати теплоносія $M = 0,36$ г/с. Зазначений режим тепловідводу непридатний для експлуатації, тому що отримане значення $T_{\text{макс}} = 110^\circ\text{C}$ суттєво перевищує припустиму величину 85°C для ФЕМ [1].

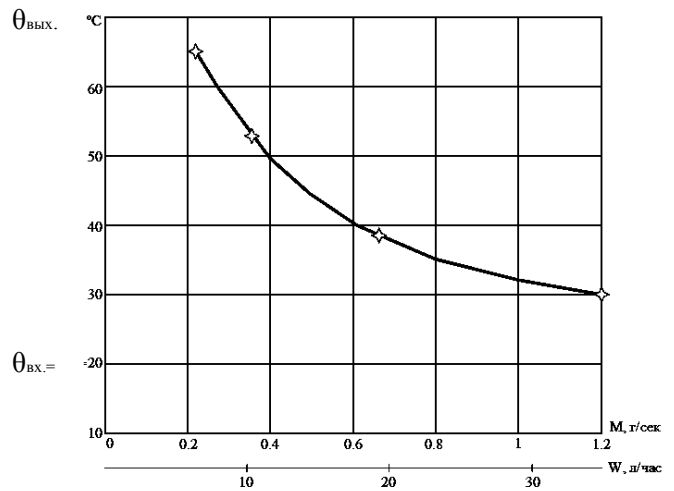


Рис. 3. Зміна температури охолоджувальної води при збільшенні витрат.

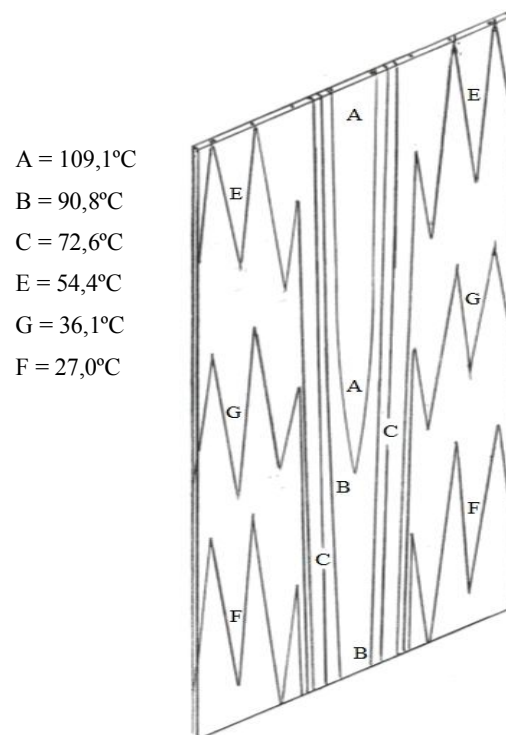


Рис. 4. Ізотерми розподілу температурного поля на площині фотопанелі при закупорці двох сусідніх каналів системи охолодження.

Відсутність тепловідводу (закупорка) тільки однієї трубки колектора не обмежує експлуатацію ФТМ, тому що в цьому випадку лише незначна площа (менше 15%) верхньої ділянки панелі досягає 84°C.

Повне припинення подачі теплоносія у всіх трубках колектора приводить до значного зростання температури (рис. 5) верхньої поверхні в межах від 129 і більше °С.

A = 129,5°C
 B = 127,1°C
 C = 125,4°C
 E = 123,2°C
 G = 121,1°C

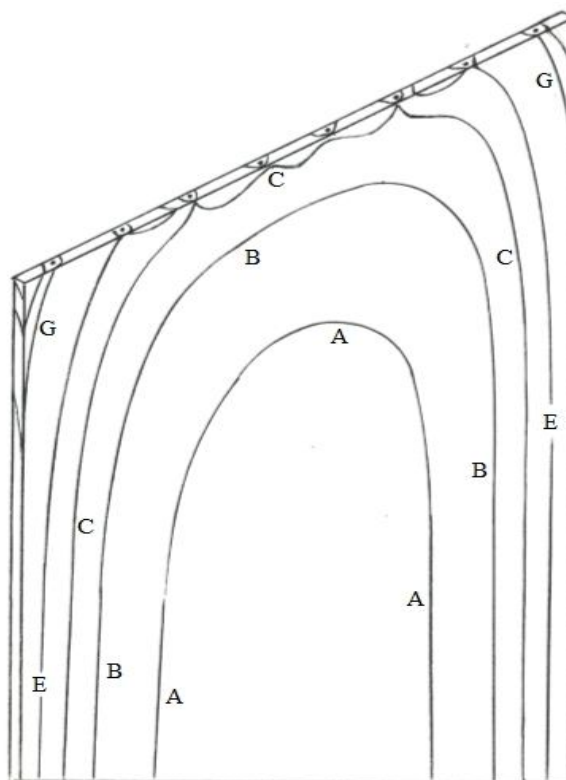


Рис. 5. Ізотерми розподілу температури на плоскій поверхні фотопанелі при повній закупорці каналів охолодження.

При цьому слід зазначити, що при швидкості вітру ~ 5 м/с КТВ над верхньою поверхнею ФТМ може досягати 12-20 Вт/(м²·град). У цих умовах максимальна температура панелі при видаленні світлопрозорої ізоляції встановлюється нижче 78°C і ФТМ у такий спосіб може експлуатуватися в режимі фотоелектричного модуля (ФЕМ).

Висновки. 1. Розглянута конструкція ФТМ при проходженні теплоносія (води) у всіх трубках колектора дозволяє, крім фотоЕРС, одержувати з 1 м² від 12 до 20 л/год гарячої води з температурою відповідно від 60 до 45°C.

2. При експлуатації ФТМ із відношенням $b/d_T \leq 11$ допускається відсутність тепловідводу (тобто закупорка) однієї з 4-х послідовно розташованих трубок колектора.

3. У випадку припинення подачі теплоносія у всіх трубках колектора рекомендується вилучити

світлопрозору ізоляцію і вести подальшу експлуатацію ФТМ у режимі фотоелектричного модуля.

1. www.kvazar.com
2. Денисенко Г.И. Возобновляемые источники энергии – К., КПИ. – 1979. – 232 с.
3. Кокошин С.С., Коломиец Д.П., Кучинский В.П., Суржик А.Н. Определение геометрических и теплофизических параметров солнечного коллектора и фототермического модуля с теплоотводами из композита // Відновлювана енергетика. – 2012. – №3(30). – С. 32–38.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Кокошин С.С., Коломиец Д.П., Кучинский В.П., Суржик А.Н. Методика определения коэффициента эффективной теплопроводности композитного материала теплоотводящей панели // Відновлювана енергетика. – 2012. – №4(31). – С. 51–54.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. www.comsol.com