

УДК 697.329.001.24

**Н.А.Швачко**, кандидат технічних наук, доцент

**А.В.Приймак**, кандидат технічних наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури

Луцький державний технічний університет

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМОВАНОГО КОЛЕКТОРА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГЕЛІОСИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

*Значне підвищення цін на паливо та підвищення вимог до охорони навколишнього середовища змушують прогнозувати більш широке розповсюдження систем сонячного теплопостачання на території України.*

*Перспективними є плоскі колектори із селективним поглинаючим покриттям і скляні трубчасті колектори з вакуумною ізоляцією. Дослідження вакуумованого колектора сонячної енергії з різними типами концентраторів наведені на експериментальному стенді. Результати досліджень представлені в графічному вигляді у порівнянні з іншими вакуумованими колекторами.*

Плоскі сонячні колектори, що випускаються в нашій країні [1], характеризуються невисокою ефективністю і тому придатні лише для систем сонячного гарячого водопостачання. Перспективними є плоскі колектори із селективним поглинаючим покриттям і скляні трубчасті колектори з вакуумною ізоляцією.

Ефективність колектора можна підвищити збільшенням його оптичного ККД і зменшенням коефіцієнта тепловтрат, що досягається застосуванням у конструкції колектора:

- вакуумної ізоляції променепоглинаючої поверхні абсорбера, що забезпечує зниження до мінімуму тепловтрат теплопровідністю і конвекцією;
- селективного покриття на променепоглинаючі поверхні з високою поглинаючою здатністю в діапазоні короткохвильового (до 2 мкм) сонячного випромінювання і низькою випромінюваністю в інфрачервоній області;

– концентратора сонячної радіації, що знижує тепловтрати випромінюванням внаслідок зменшення площі поверхні, що поглинає сонячне випромінювання;  
 – променепрозорих структур, що придушують конвекцію повітря в просторі між абсорбером і заскленням.

Показники теплової ефективності сонячних установок тепlopостачання з колекторами різних типів: ККД сонячного колектора  $\eta_k$ ; питома теплопродуктивність колектора за розрахунковий період (доба, місяць, рік)  $q_k$ ; річний (місячний) ступінь заміщення теплового навантаження  $f$ ; загальний ККД сонячної установки  $\eta_y$ ; річна (місячна) економія теплоти від традиційного джерела  $q_{\text{эв}}$  віднесена до  $1 \text{ м}^2$  площі поверхні колектора сонячної енергії.

Один з найбільш раціональних способів одержання високих експлуатаційних характеристик геліоустановок — вакуумна ізоляція в колекторі. Оптимальний ступінь вакуумування скляної оболонки колектора, при якому можна практично знехтувати кондуктивно-конвективними тепловтратами, згідно з [2]

$$P = kT^2 / [\sqrt{2} \pi d_m^2 \{ (T+C) \}], \quad (1)$$

де  $P$  — абсолютний тиск повітря у вакуумованій оболонці, Па;

$T$  — температура повітря, К;

$k$  — постійна Больцмана;

$l$  — довжина вільного пробігу молекули повітря, м;

$d_m$  — діаметр молекули, м;

$C$  — постійна Сазерленда (для повітря 112 К).

У колекторів (у вигляді судини Дьюара), де приплив молекул повітря від скла малий і можна максимально зменшити визначуваний розмір вакуумованого обсягу, ступінь вакуумування 1,5 Па.

Мета теплових випробувань сонячних колекторів — визначити миттєве значення ККД колектора  $\eta_k$ , постійну часу колектора  $\tau_0$  і коефіцієнт  $K(i)$ , що враховує вплив кута падіння сонячних променів  $i$  на оптичний ККД колектора  $\eta_0$  [3—5].

Миттєвий ККД колектора без концентрації сонячного випромінювання

$$\eta_k = \frac{Q_k}{\dot{A} \dot{I}_k} = \frac{mc_p}{\dot{A} \dot{I}_k} (T_{TK} - T_{TH}) = F'(\tau\alpha)_e - F'K_k \frac{T_{сер} - T_B}{I_k} = F_R(\tau\alpha)_e - F_R K_k \frac{T_{TH} - T_B}{I_k}, (2)$$

де  $Q_k$  — кількість корисної теплоти, вироблена сонячним колектором за 1 с, Вт;

$A$  — площа поверхні колектора,  $m^2$ ;

$I_k$  — щільність потоку сонячного випромінювання на поверхню колектора,  $Вт/м^2$ ;

$m$  — масова витрата теплоносія в колекторі,  $кг/с$ ;

$c_p$  — питома ізобарна теплоємність теплоносія,  $Дж/кг \cdot K$ ;

$T_{TH}$ ,  $T_{TK}$ ,  $T_{сер}$  — початкова, кінцева і середня температури теплоносія в колекторі,  $K$ ;

$T_B$  — температура навколишнього середовища (повітря),  $K$ ;

$F'$  — коефіцієнт ефективності теплообміну між ребром променепоглинаючої поверхні і теплоносієм;

$(\tau\alpha)_e$  — ефективна поглинаюча здатність (оптичний ККД) колектора;

$K_k$  — коефіцієнт тепловтрат колектора,  $Вт/м^2 \cdot K$ ;

$F_R$  — коефіцієнт відводу теплоти з колектора.

Коефіцієнт  $F_R$  зв'язаний з  $F'$  наступним співвідношенням:

$$F_R = \frac{mc_p}{AK_K} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{AK_K F'}{mc_p} \right) \right]. (3)$$

За умови сталості  $F'(\tau\alpha)_e$  і  $F'K_k$  характеристику колектора можна представити у вигляді лінійної залежності  $\eta_k$  від  $(T_{сер} - T_B)/I_k$ . На графіку нульова ордината дорівнює  $F'(\tau\alpha)_e$  при нормальному падінні сонячних променів на поверхню колектора, а тангенс кута нахилу прямої —  $F'K_k$ . У дійсності  $F'(\tau\alpha)_e$  змінюється зі зміною кута падіння сонячних променів, а  $F'K_k$  залежить від температури колектора й умов навколишнього середовища. Замість  $T_{сер}$  часто використовується  $T_{TH}$ , і тоді за характеристикою колектора визначають  $F_R(\tau\alpha)_e$  і  $F_R K_k$ .

Умови випробувань сонячних колекторів визначаються методикою [3–9]. Так, в експериментах з рідинними колекторами сонячної енергії, відповідно до [1,3], повинні виконуватися наступні умови.

1. Щільність потоку сумарного сонячного випромінювання на поверхню колектора не нижче  $630 \text{ Вт/м}^2$ . Піранометр термопарного типу встановлений у площині колектора в місці, де виключається його затінення.

2. Азимут і орієнтація колектора вибираються так, щоб кут падіння сонячних променів на площину колектора під час зняття експериментальних даних не перевищував  $30^\circ$ .

3. Витрата рідкого теплоносія постійна і дорівнює  $0,02 \text{ кг/с}$  на  $1 \text{ м}^2$  площі поверхні апертури колектора.

4. Для розрахунку параметра  $(T_{\text{сер}} - T_{\text{в}})/I_k$  потрібно не менш чотирьох значень температури теплоносія, причому вони повинні перевищувати температуру навколишнього середовища на  $0; 30; 50$  і  $70^\circ\text{C}$  (в оптимальному варіанті). Для кожного значення температури необхідно зняти покази чотирьох точок – по дві до і після полудня. Одержуваний при цьому ККД колектора – середньоінтегральна за 15-хвилинний інтервал величина при постійній щільності потоку сонячного випромінювання.

5. Зміна температури теплоносія в колекторі повинна обмірюватись з точністю  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  двома каліброваними термометрами опору або диференціальною термопарою, приєднаною до потенціометра. Похибки виміру інших величин — витрати теплоносія, температури навколишнього середовища і кута падіння сонячних променів повинні не перевищувати  $\pm 1\%$ .

Протягом усього періоду випробувань зміна температури повітря має бути не вищою за  $30^\circ\text{C}$ , швидкість вітру становити  $4,4 \text{ м/с}$ . Процедура випробувань однакова для колекторів різних типів. Відповідно до [1,3] виміри проводяться серіями тривалістю  $15 \text{ хв}$  (але не менше від постійної часу колектора).

Альтернативна методика випробувань колекторів сонячної енергії передбачає два окремі експерименти для визначення оптичного ККД  $\eta_o$  і коефіцієнта тепловтрат  $K_k$  колектора. Перший проводиться з температурою теплоносія в колекторі, що не відрізняється від  $T_{\text{в}}$ . У даних умовах тепловтрати колектора – нуль, і отже,  $\eta_k$  дорівнює  $F_R \eta_o$ . Другий експеримент проводиться при відсутності надходження сонячного випромінювання на поверхню колектора, тобто при  $I_k=0$ , краще вночі. При цьому попередньо нагрітий теплоносій пропускається через колектор, де він проохолоджується,

отже, корисна енергія колектора дорівнює його тепловтратам і має знак мінус:

$$q_k = - F_R K_k (T_{T.H} - T_b) . \quad (4)$$

Для визначення  $q_k$  вимірюють витрата теплоносія і різницю його температур у колекторі. Ефективний коефіцієнт тепловтрат  $F_R K_k$  дорівнює тангенсу кута нахилу прямої, що зображує залежність  $q_k$  від  $T_{T.H} - T_b$ . Достойнство даної методики у тому, що величина  $K_k$  не залежить від  $I_k$ , а результати більш точні.

Постійна часу колектора

$$\tau_o = K \frac{C_k}{C_T} , \quad (5)$$

де  $K$  — коефіцієнт, який враховує відмінність температури окремих елементів колектора від температури теплоносія;

$C_k, C_T$  — повні теплоємності, сумарна всього колектора і потоку теплоносія в колекторі, Дж/К, Вт/К.

Якщо  $T_{T.H}$  дорівнює  $T_b$  і сонячна енергія на колектор не надходить, то відношення різниці температур теплоносія в колекторі в момент часу  $\tau$  до цієї різниці в початковий момент, коли раптово затінюється колектор,

$$\frac{(T_{T.K} - T_{T.H})_\tau}{(T_{T.K} - T_{T.H})} = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_o}\right) \quad (6)$$

( $\tau_o$  — постійна часу колектора, с).

В експерименті з визначення постійної часу колектора  $T_{T.H} = T_b + 1^\circ\text{C}$  підтримується в процесі випробування колектора при щільності потоку сонячного випромінювання  $I_k$  не нижче  $790 \text{ Вт/м}^2$ . Після встановлення постійної  $T_{T.K}$  на виході з колектора його швидко затінюють і безупинно записують зміну  $T_{T.K}$  у часі. На цьому ж графіку реєструється  $T_{T.H}$ , потім по ньому визначають  $\tau_o$  на основі (6).

Залежність  $\eta_o$  від кута падіння сонячних променів  $i$  враховується поправковим коефіцієнтом

$$\eta_o(i) = \eta_o(0) * K(i). \quad (7)$$

Для визначення  $K(i)$  проводиться випробування колектора з  $T_{г.н} = T_{в} \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\eta_K = FR\eta_0$  при різних кутах падіння сонячних променів на поверхню колектора,  $i = 0; 30; 45$  і  $60^\circ\text{C}$ . Доцільно використовувати стенд із регульованим кутом нахилу колектора до горизонту. У даному випадку всі випробування проводяться опівдні за короткий час.

Експериментальне дослідження проводилося нами з одиничним модулем вакуумованого сонячного колектора, тобто скляною судиною Дьюара, яка запаяна з одного боку (рис. 1а). У середині скляної оболонки розташований абсорбер у вигляді зачорненої мідної пластини, припаяної до U-подібної трубки для циркуляції теплоносія (води). Відповідно до прийнятої методики передбачені вимірювання температури води на вході і виході колектора двома хромель-копелевими термопарами і потенціометром, щільності потоку сумарного сонячного випромінювання, що надходить на поверхню колектора, піранометром П-8М разом з гальванометром ГСА, витрати води ваговим методом, температури навколишнього повітря термометром і швидкості вітру анемометром.

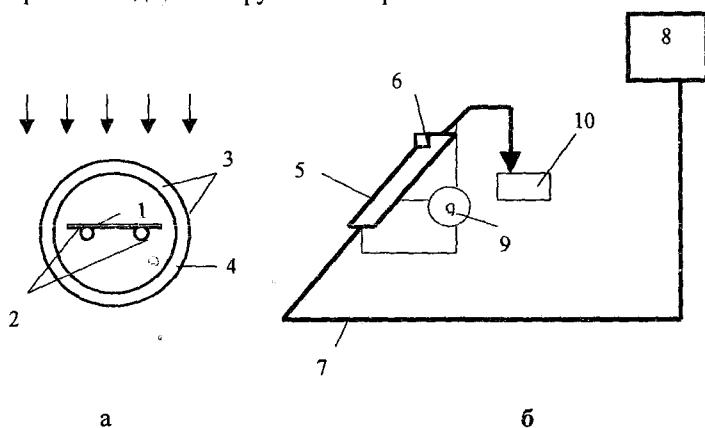


Рис.1. Поперечний розріз вакуумованого колектора сонячної енергії (а) і схема експериментальної установки для дослідження ефективності сонячного колектора (б):

- 1 – променепоглиняльний елемент – зачорнена мідна пластина;
- 2 – U-подібна трубка для циркуляції теплоносія;
- 3 – прозора скляна оболонка типу судини Дьюара;
- 4 – вакуумований простір;
- 5 – модуль вакуумованого сонячного колектора;
- 6 – піранометр у площині колектора;
- 7 – сполучні трубопроводи;
- 8 – бак холодної води з постійним рівнем рідини;
- 9 – блок вимірювання температур;
- 10 – блок вимірювання витрати теплоносія

Схему установки для проведення вимірювань колектора зображено на рис. 1, б. Вакуумований колектор досліджено з використанням поверхні, розташованої під модулем колектора, двох типів: дифузно і дзеркально відбиває. У третьому варіанті на зовнішню поверхню вакуумованої оболонки колектора наносилось дзеркальне покриття, що було концентратором сонячного випромінювання.

Результати випробувань модуля вакуумованого колектора з поверхнею, яка дифузно відбиває, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати випробувань вакуумованого колектора сонячної енергії

| № випробування | $T_{гн}, ^\circ\text{C}$ | $T_{гк}, ^\circ\text{C}$ | $I, \text{Вт/м}^2\text{К}$ | $m, \text{кг/год}$ | $T_{в}, ^\circ\text{C}$ | $\eta_k, \%$ | $(T_{сер}-T_a)/I_k, \text{К м}^2/\text{Вт}$ |
|----------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------------|
| 1              | 29,84                    | 29,0                     | 566,3                      | 4,74               | 26,4                    | 46,8         | 0,0027                                      |
| 2              | 28,15                    | 30,79                    | 632,8                      | 4,62               | 26,4                    | 49,9         | 0,0049                                      |
| 3              | 32,26                    | 37,26                    | 855,0                      | 3,0                | 26,4                    | 45,1         | 0,0098                                      |
| 4              | 33,29                    | 39,45                    | 938,14                     | 2,52               | 27,1                    | 42,7         | 0,0098                                      |
| 5              | 33,74                    | 39,88                    | 944,4                      | 2,88               | 27,1                    | 48,5         | 0,0103                                      |
| 6              | 33,29                    | 40,67                    | 815,7                      | 2,05               | 26,1                    | 45,5         | 0,0133                                      |
| 7              | 34,18                    | 40,89                    | 908,8                      | 2,1                | 26,1                    | 39,2         | 0,0126                                      |
| 8              | 34,47                    | 41,61                    | 898,0                      | 2,22               | 26,1                    | 45,5         | 0,0133                                      |
| 9              | 32,26                    | 36,82                    | 898,2                      | 3,36               | 26,2                    | 44,1         | 0,0093                                      |
| 10             | 33,0                     | 37,41                    | 857,8                      | 3,6                | 26,1                    | 47,8         | 0,0106                                      |
| 11             | 33,40                    | 38,09                    | 810,2                      | 3,18               | 26,1                    | 47,6         | 0,0119                                      |
| 12             | 27,19                    | 31,24                    | 465,7                      | 1,86               | 25,2                    | 41,7         | 0,0072                                      |
| 13             | 35,50                    | 43,94                    | 731,3                      | 1,44               | 27,7                    | 43,0         | 0,0164                                      |
| 14             | 35,0                     | 44,09                    | 795,4                      | 1,68               | 28,1                    | 42,3         | 0,0144                                      |
| 15             | 35,74                    | 44,09                    | 821,7                      | 1,56               | 29,7                    | 41,0         | 0,0124                                      |
| 16             | 36,69                    | 48,29                    | 858,5                      | 1,38               | 30,1                    | 43,2         | 0,0144                                      |
| 17             | 34,32                    | 40,75                    | 792,1                      | 2,40               | 32,2                    | 50,3         | 0,068                                       |
| 18             | 35,50                    | 41,76                    | 765,5                      | 2,40               | 31,1                    | 50,8         | 0,0100                                      |

Характеристики випробуваного модуля вакуумованого колектора з дифузновідбивною (1) і дзеркальновідбивною (2) поверхнями, лінійним концентратором сонячного випромінювання (3), а також плоского колектора (5) Братського заводу опалювального устаткування і вакуумованого колектора (4) фірми «Філіпс» наведено на рис. 2.

По лінійних залежностях визначені ККД колектора  $\eta_k$  від параметра  $(T_{сер}-T_a)/I_k$ , методом найменших квадратів значення  $F'(\tau_a)_e$  і  $F'K_k$ . Порівняємо

оптико-теплові характеристики випробуваного нами вакуумованого колектора з іншими сонячними колекторами.

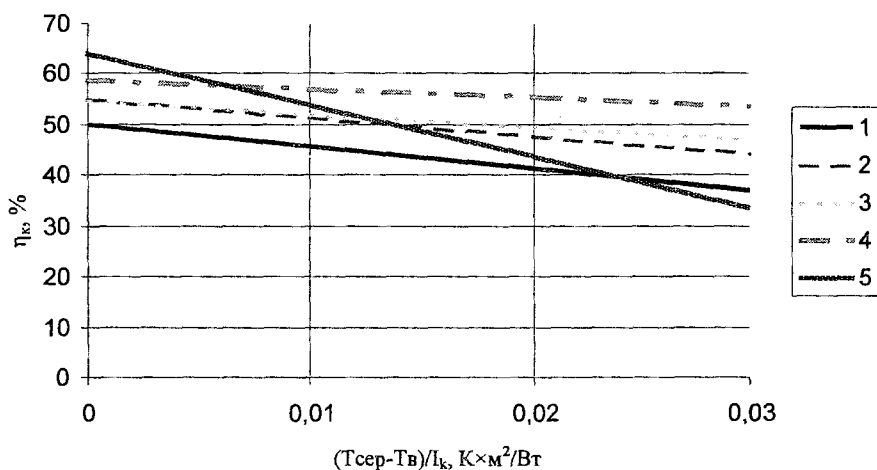


Рис.2

| Тип сонячного колектора                                           | $F'(\tau\alpha)_e$ | $F' K_k$ ,<br>$Вт/м^2 \cdot K$ |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Модуль вакуумованого колектора:                                   |                    |                                |
| над дифузновідбивною поверхнею                                    | 0,5                | 4,3                            |
| дзеркальновідбивною поверхнею                                     | 0,55               | 3,68                           |
| з концентратором на скляній оболонці                              | 0,545              | 2,55                           |
| Вакуумований колектор фірми „Філіпс” [8]                          | 0,59               | 1,8                            |
| Плоский колектор Братського заводу опалювального устаткування [2] | 0,64               | 10,08                          |

Найбільша ефективність вакуумованого скляного колектора фірми «Філіпс» з тепловою трубкою для передачі теплоти із зони поглинання сонячного випромінювання в зону відведення теплоти. Однак при значеннях  $(T_{cer} - T_b) / I_k$  від 0 до 0,005  $K \cdot m^2 / Wt$ , що відповідають високій щільності потоку сонячного випромінювання і малій різниці температур теплоносія  $T_{cer}$  і

зовнішнього повітря  $T_v$ , ККД плоского колектора вище ККД інших розглянутих колекторів. Зазначимо, що даний діапазон значень параметра  $(T_{сер}-T_v)/I_K$  практично не реалізується, тому порівнювати характеристики колектора має сенс при більш високих величинах цього параметра.

Дзеркально відбивна поверхня, яка підстеляє, і концентратор, напилений на зовнішню поверхню скляної оболонки вакуумованого колектора, підвищують ККД і знижують коефіцієнт тепловтрат. Для систем опалення і технологічного теплопостачання параметр  $(T_{сер}-T_v)/I_K$  перевищує  $0,02 \text{ К м}^2/\text{Вт}$ , при цьому ефективність випробуваних і розглянутих колекторів спадає в такому порядку: вакуумований колектор фірми «Філіпс», вакуумований з концентратором, із дзеркальною, що підстеляє, і дифузійною поверхнями, плоский. Значна перевага колектора фірми «Філіпс» полягає в застосуванні селективних покриттів на променепоглиняльній поверхні абсорбера і на поверхні скляної оболонки. В іншій модифікації вакуумованого колектора цієї фірми коефіцієнт тепловтрат  $1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$  [6].

Основна область застосування скляних вакуумованих трубчастих колекторів сонячної енергії – геліосистеми теплопостачання цивільних і промислових об'єктів у районах з холодним і помірним кліматом, а також у системах технологічного теплопостачання. Завдяки вакуумуванню скляної оболонки колектора істотно знижуються тепловтрати колектора, отже, зменшується граничне значення щільності потоку сонячної радіації, починаючи з якого колектор дає корисну теплоту. У результаті цього у вакуумованих колекторах можна нагріти теплоносії до  $250^\circ\text{C}$ , що значно розширює область застосування вакуумованих колекторів. Поки що їхня вартість вища від вартості плоских колекторів в 1,5–2 рази, а технологія виготовлення складніша. Однак відзначається тенденція до зниження вартості виготовлення вакуумованих колекторів, крім того, досягнути прогресу у виробництві високоефективних селективних плоских колекторів [10].

### Список літератури

- І. Ферт А.Р., Щекина И.А. Конструкции и расчет солнечных водонагревателей // Водоснабжение и санитарная техника. – 1988. – № 4.

2. Колтун М.М., Матвеев В.Н., Гаврилова И.П. //Гелиотехника. – 1980. – № 5. С. 3–11.
3. **ASHRAE Standard 93-77.** Method of Itesting to determine thermal performance of solar collectors. N. Y.: ASHRAE Inc. 1977.
4. **Фрид С.Е.** Методы испытаний тепловых солнечных коллекторов.– М.: Препринт ИВТАН № 3-248. – 1988. – 56 с.
5. **Hill J.E., Wood B.D., Reed K.A.** Testing solar collectors. In: Advances in Solar Energy. An annual review of research and development/Eds. Boer K. W., Duffie J.A. New York etc.: Plenum Press, 1986. V. 2. P. 349–404.
6. **Lazzarin R. M., Grinzato E., Schibuola .L.**//INTERSOL'85. Proceedings of 9-th Biennial Congress. ISES. Montreal, 23–29 June, 1985. Oxford etc.: Pergamon Press. 1986. P. 1289–1293.
7. **Proctor D.**//Solar Energy. 1984. V. 32. P. 377–386.
8. **Proctor D.**//Solar Energy. 1984. V. 32. P. 387–394.
9. **Proctor D.**//Solar Energy. 1984. V. 32. P. '395—399.
10. **Gilliaert D., Te bald i P.** The development of a calculation procedure for the long-term performance prediction of solar domestic hot water systems. In: Advances in Solar Energy Technology. Proc. of the Biennial Congress of the LSES, Hamburg, 13–18 Sept. 1987/Eds. W.H. Bloss, F.Pfieterer. Oxford etc.: Pergamon press. 1988. V. 1. P. 737—741.