

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 променепоглинаючій 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 η_k ; питома теплопродуктивність колектора за розрахунковий період (доба, місяць, рік) q_k ; річний (місячний) ступінь заміщення теплового навантаження f ; загальний ККД сонячної установки η_y ; річна (місячна) економія теплоти від традиційного джерела $q_{\text{зв}}$ віднесена до 1 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 η_k , постійну часу колектора τ_0 і коефіцієнт $K(i)$, що враховує вплив кута падіння сонячних променів i на оптичний ККД колектора η_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 η_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 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° .

3. Витрата рідкого теплоносія постійна і дорівнює $0,02 \text{ кг/с}$ на 1 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°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°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 хв (але не менше від постійної часу колектора).

Альтернативна методика випробувань колекторів сонячної енергії передбачає два окремі експерименти для визначення оптичного ККД η_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, η_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 τ до цієї різниці в початковий момент, коли раптово затінюється колектор,

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

(τ_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 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 τ_o на основі (6).

Залежність η_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°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 запаєна 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.

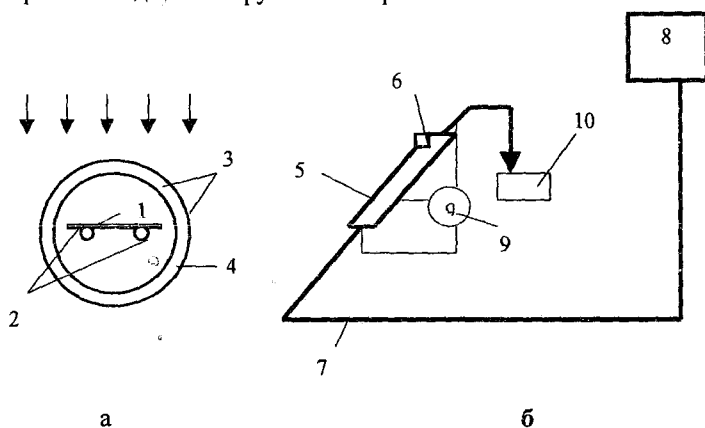


Рис.1. Поперечний розріз вакуумованого колектора сонячної енергії (а) і схема експериментальної установки для дослідження ефективності сонячного колектора (б):

- 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 η_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.

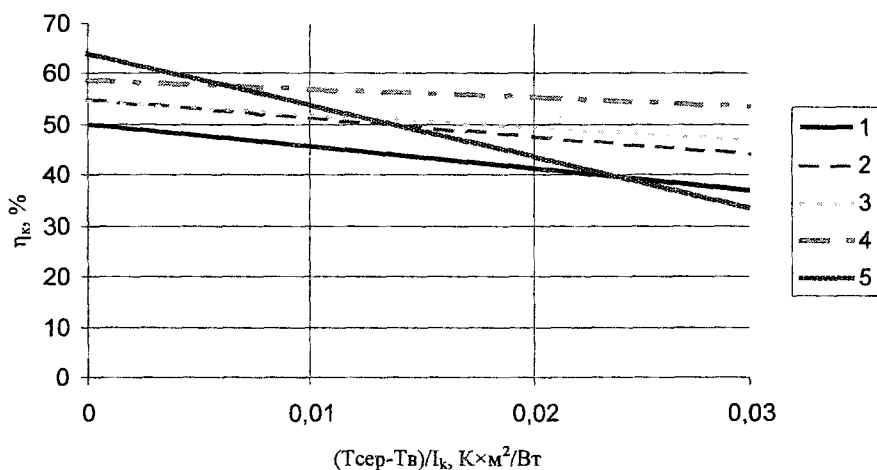


Рис.2

Тип сонячного колектора	$F'(\tau\alpha)_e$	$F' K_k$, $Bt/m^2 K$
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 $(T_{сер} - T_v)/I_k$ від 0 до 0,005 $K \cdot m^2 / Bt$, що відповідають високій щільності потоку сонячного випромінювання і малій різниці температур теплоносія $T_{сер}$ і

зовнішнього повітря T_b , ККД плоского колектора вище ККД інших розглянутих колекторів. Зазначимо, що даний діапазон значень параметра $(T_{сер}-T_b)/I_K$ 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 $(T_{сер}-T_b)/I_K$ 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°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.