

УДК 536.248.2

С.М.Хайрнасов (НТУУ "КПІ", Київ)

Сучасний стан використання теплових труб у сонячних теплових та комбінованих колекторах

Сьогодні істотний внесок у виконання завдання щодо економії ресурсів робить широке впровадження ресурсозберігаючого обладнання на основі теплових труб. Використання теплових труб у якості теплопередавальних і теплообмінних конструктивних елементів дозволяє створити на їх основі ефективне обладнання нового покоління для сонячних енергетичних систем. Теплові труби можуть широко використовуватися як з метою удосконалення застарілого обладнання (підвищення його коефіцієнта корисної дії, надійності та ресурсу роботи), так і при створенні високоякісних і економічних зразків нової техніки. На сьогодні можна виділити наступні системи та обладнання сонячної енергетики, де широко використовуються теплові труби: сонячні плоскі, вакуумні і термосифонні теплові колектори, а також комбіновані сонячні колектори. В статті наводиться аналіз сучасного стану використання теплових труб у сонячних енергетичних системах.

Ключові слова: термосифон, тепла труба, сонячна енергетика, сонячний тепловий колектор, комбінований сонячний колектор.

Сегодня существенный вклад в решение задачи экономии ресурсов делает широкое внедрение ресурсосберегающего оборудования на основе тепловых труб. Использование тепловых труб в качестве теплопередающих и теплообменных конструктивных элементов позволяет создать на их основе эффективное оборудование нового поколения для солнечных энергетических систем. Тепловые трубы могут широко использоваться как в целях совершенствования устаревшего оборудования (повышение его коэффициента полезного действия, надежности и ресурса работы), так и при создании высококачественных и экономичных образцов новой техники. На сегодняшний день можно выделить следующие системы и оборудование солнечной энергетики, где широко используются тепловые трубы: солнечные плоские, вакуумные и термосифонные тепловые коллекторы, а также комбинированные солнечные коллекторы. В статье приводится анализ современного состояния использования тепловых труб в солнечных энергетических системах.

Ключевые слова: термосифон, тепловая труба, солнечная энергетика, солнечный тепловой коллектор, комбинированный солнечный коллектор.

Вступ. Екологічні проблеми, такі як глобальне потепління і забруднення навколишнього середовища, потребують використання альтернативних енергетичних ресурсів як для енергетичного забезпечення будівель, так і в транспорті та промисловості. Ці проблеми [1] будуть підвищувати ціни на енергоносії, поки відновлювані джерела енергії не замінять традиційні види палива в якості основного джерела. Глобальна потреба в економії енергії та необхідне використання відновлюваних джерел сьогодні відкривають підходи та методи одержання і перетворення енергії.

На сьогоднішній час багато сучасного теплообмінного обладнання не відповідають вимогам за малою вагою, легким монтажем, універсальністю, масштабованістю і автономністю. Так, наприклад, технології створення будівель з низьким енергоспоживанням потребують використання методів та систем з мінімальними енерговитратами [2–4].

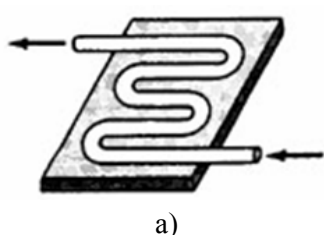
Якщо ставити задачу створення пасивних систем тепломасопереносу, то використання термосифонів (ТС) [5] і теплових труб (ТТ) [6] відкриває широкі можливості для вирішення проблем теплопередачі в нових енергоефективних рішеннях.

Технологія ТС і ТТ (рис. 1) відома достатньо давно [7]. Вони являють собою герметичний теплопередавальний пристрій, що працює за замкнутим випарниково-конденсаційним циклом при існуванні теплового контакту з джерелом та стоком тепла. Тепло, яке підводиться до теплової труби, витрачається на випаровування теплоносія, що знаходиться у корпусі теплової труби, потім переноситься парою (при існуванні перепаду тиску) у вигляді прихованої теплоти випаровування і виділяється при конденсації пари (на відстані від міста випаровування) з урахуванням умов організації того чи іншого засобу відведення тепла. Конденсат повертається у зону випаровування або

під впливом капілярних сил (при існуванні капілярної структури (КС)) у ТТ, або за рахунок масових сил – у ТС. Таким чином, ТС є окремим випадком ТТ і конструктивно відрізняється відсутністю КС і принципом повернення конденсату до зони випаровування: за рахунок масових сил, а не капілярних, як у випадку з ТТ.

Незважаючи на простоту конструкції, ТС і ТТ мають ряд унікальних властивостей. Насамперед, це величезна еквівалентна теплопровідність (відношення переданого теплового потоку до площі поперечного перерізу корпусу і перепаду температури на одиниці його довжини). Друге унікальна властивість ТС і ТТ – трансформація щільності теплового потоку, тобто концентрація або деконцентрація теплового потоку на ділянці тепловідводу в порівнянні з ділянкою теплопідводу. Перераховані властивості ТС і ТТ зумовили їх достоїнства і значні переваги в порівнянні з елементами теплопередавальних, теплообмінних або термостабілізуючих систем традиційного виконання. До таких переваг належать: малі габарити, маса і металоємність, простота конструкції, відсутність рухомих деталей і безшумність роботи, відсутність витрат енергії на переміщення теплоносія, надійність, безпека та економічна робота.

Відомі різні конструктивні рішення з використанням теплових труб у системах енергозбереження [5, 7], а також як елементів систем, що працюють з використанням відновлюваних джерел енергії [8]. Але, перш за все, ТС і ТТ мають хорошу перспективу застосування в сонячних енергетичних системах. Сонячна енергія є одним із перспективних джерел енергії як крок до зменшення залежності від інших енергетичних ресурсів. Використання ТС і ТТ в сонячних енергетичних системах почало широко розглядатися з 80-х років [9]. У статті наводиться аналіз сучасного стану та перспектив використання ТТ і ТС в різних типах сонячних колекторів (СК).



а)

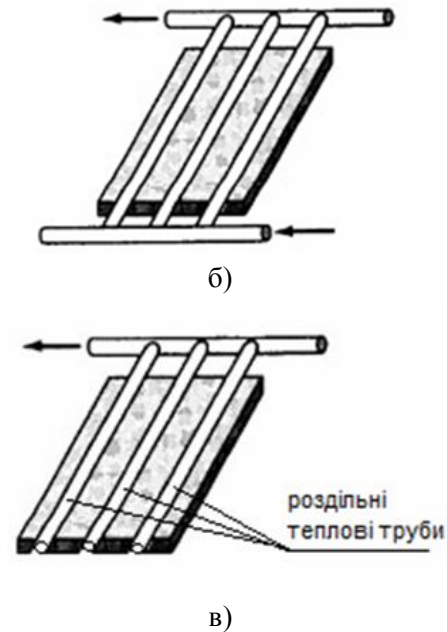
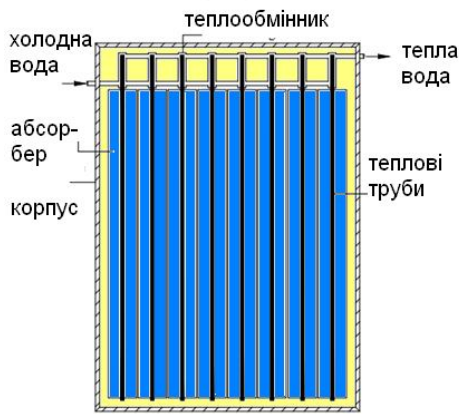


Рис. 1. Конструкція та схеми течії робочої рідини в ПСК: а – серпантинна схема; б – колекторна схема; в – схема з тепловими трубами.

1. Плоскі теплові сонячні колектори на основі ТТ. Більшість конструкцій плоских теплових сонячних колекторів (ПСК) [10] побудовані за проточною схемою, тобто робоча рідина (вода чи пропіленгліколь) тече по спеціальних каналах (трубах), що утворюють контур під абсорбером (теплопоглинаючою поверхнею). Але в деяких конструкціях ПСК можуть застосовуватися ТТ [11]. Якщо порівнювати звичайні ПСК на ТТ і без них, то використання ТТ може зменшувати ефективність до 10%, що визначається додатковим термічним опором самих ТТ та додатковим термічним опором теплообмінника між зонами конденсації ТТ і зовнішнім контуром. Але ТТ дають можливість знизити гідравлічний опір контуру робочої рідини в СК більш ніж у 2 рази [12] (рис. 1) і забезпечити модульність конструкції та простоту складання [13]. Розгерметизація однієї ТТ не приводить до значного зниження ефективності СК в порівнянні з тим, якщо буде розгерметизація рідинного контуру в звичайному ПСК.

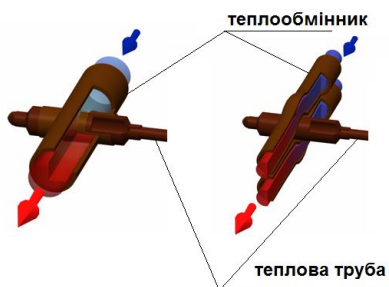
Звичайна конструкція ПСК з ТТ наведена на рис. 2. Зазвичай вона має спеціальний мідний теплообмінник, у який вставляються чи впаюються зони конденсації ТТ (рис. 2в). У такій конструкції теплообмінника реалізується щільне омивання робочою рідиною зон конденсації ТТ.



а)



б)



в)

Рис. 2. Звичайна схема конструкції ПТТ з мідними ТТ (а) [14], загальний вигляд експериментального прототипу (б) [15] та варіанти контакту зон конденсації ТТ з теплообмінником зовнішнього контуру робочої рідини (в).

Ряд робіт присвячено дослідженню впливу параметрів мідних ТТ на ефективність ПСК. У статті [16] наведено інформацію про розроблені та випробувані мідні ТТ для прототипу ПСК для підігріву води і показано, що такі ТТ можуть ефективно працювати як теплообмінні елементи в такій конструкції. В роботах [17, 18] наведені результати досліджень режимів роботи ТТ з КС для ПСК. Вказується на вплив відношення довжини ТТ до її діаметра l/d на ефективність ПСК.

ПСК з ТТ із меншим значенням l/d (52,63 для діаметра ТТ 19 мм в порівнянні з 58,82 для діаметра ТТ 17 мм) має більшу ефективність, що підтверджується більш ефективною роботою ТТ з більшим діаметром у режимі ТС. У роботі [14] наведено результати щодо оптимізації відношення довжини зони випаровування до конденсації ТТ (l_{ϕ}/l_k) діаметром 12,5 мм. Найбільший корисний тепловий потік одержано при відношенні $l_{\phi}/l_k=8,25$. Ефективність такого ПСК при звичайній роботі дорівнювала 55,6%. Аналогічне дослідження проводили автори статті [15] тільки з ПСК на основі ТТ еліптичної форми (26×16,7 мм). Використовувались мідні ТТ довжиною 1 м із сітчастою КС з нержавіючої сталі. ТТ були заправлені метанолом. Отримано оптимальне значення $l_{\phi}/l_k=5,6$. Результати показали, що ефективність такого ПСК може бути до 80% за рахунок того, що абсорбером є сам корпус ТТ, а еліптична поверхня ТТ підвищує загальну теплопоглинаючу поверхню. Автори статті [19] наводять результати досліджень ПСК на основі мідних ТТ з різними теплоносіями (ацетон, метанол, етанол). ТТ з теплоносієм ацетоном забезпечили більш ефективну роботу ПСК.

Таким чином, ефективність конструкцій ПСК з мідними ТТ перш за все визначається ефективністю відводу теплоти від зон конденсації ТТ і контактом між теплопоглинаючою поверхнею і поверхнею ТТ. Частково вирішити технологічні проблеми може використання в конструкції ПСК алюмінієвих теплових труб.

Також у літературі існує інформація про ПСК на основі алюмінієвих ТТ. У роботі [20] наведено результати розробки та дослідження алюмінієвих ТТ і ПСК на їх основі (рис. 3). ТТ з'єднувалися з абсорбером лазерною зваркою. Алюмінієві ТТ (без капілярної структури, тобто ТС) мали внутрішній діаметр $d_{\text{вн}}=8$ мм, зовнішній діаметр $d_{\text{зов}}=10$ мм, відношення $l_{\phi}/l_k=20$, загальною довжиною 1685 мм та були заправлені ацетоном масою 4,1 г. Результати розрахунку показали, що такі ТТ можуть мати термічний опір $R_{\text{т}}=0,16-0,25$ К/Вт при тепловій потужності, що передається однією ТТ, від 50 до 150 Вт та куті нахилу 45°. ПСК на основі таких ТТ мав максимальну ефективність у діапазоні від 69% до 76%

в залежності від кута нахилу та масової витрати робочої рідини. Температура стагнації розроблених алюмінієвих ТТ становила плюс 130°C. Автори також показали, що якщо використовувати температуру стагнації ТТ, при якій СК перестає працювати (так звана точка "гальмування"), можна здешевити сонячні енергетичні системи з СК до 25% за рахунок відмови від спеціальних запобіжних систем перегріву.



а)



б)

Рис. 3. ПСК на основі алюмінієвих ТТ [20].

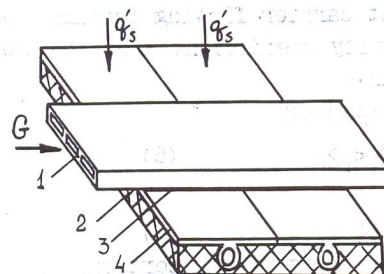
У статті [21] наведені результати досліджень теплопоглинаючої поверхні на основі плоских алюмінієвих ТТ висотою 3 мм та шириною 60 мм кожна. У такому СК використовується звичайне контактне кріплення між зоною конденсації ТТ і теплообмінником. Автори зазначають, що використання теплопровідного силікону зменшило термічний опір майже у два рази. Але треба брати до уваги, що такі плоскі ТТ мають високе значення термічного опору, що може перевищувати 0,2-0,3 К/Вт. Крім того, при малих кутах нахилу СК (нижче 30°) на основі таких ТТ може знизуватись ефективність СК за рахунок зниження ефективності роботи самих плоских ТТ.

Для забезпечення технологічності та простоти з'єднання ТТ з теплообмінником можна використовувати алюмінієві профільні ТТ. Така схема бу-

ла запропонована в роботі [22] (рис. 4а). Слід зазначити, що така конструкція має ще дві переваги:

- одночасне виготовлення теплопоглинаючої поверхні (у вигляді полиць) і самої ТТ, що зменшує термічний опір контакту і дає можливість відмовитись від додаткових технологічних операцій (пайка, зварювання) кріплення корпусу ТТ до теплопоглинаючої поверхні;
- використання канавчатої КС, що дає змогу підвищити тепловий потік, який передається однією ТТ, в режимі ТС до 26% [23] у порівнянні з ТТ без КС за рахунок зменшення впливу винесення рідини парою.

В роботі [24] наведені експериментальні результати дослідження алюмінієвих профільних ТТ (рис. 4б) та ПСК на їх основі (рис. 4в).



а)



б)



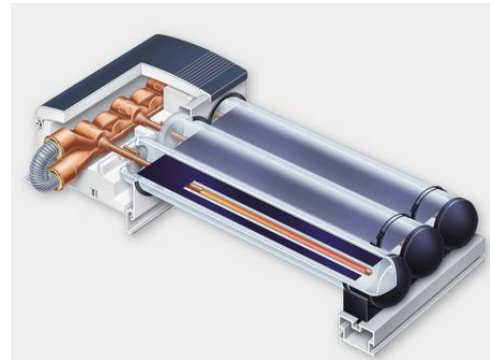
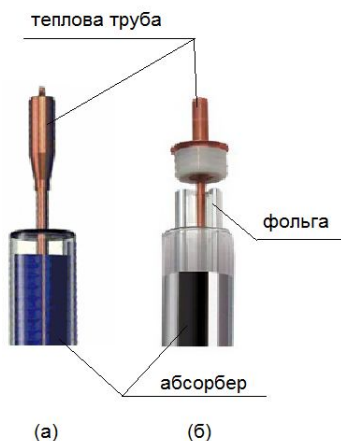
в)

Рис. 4. ПСК з алюмінієвими профільними ТТ: а – конструктивна схема ПСК [23]; б – алюмінієва профільна ТТ для ПСК [24]; ПТТ на основі алюмінієвих профільних ТТ; 1 – плоский теплообмінник зовнішнього контуру робочої рідини; 2 – теплоізоляція; 3 – термопаста чи теплопровідний силікон; 4 – ТТ.

Результати [24] показали, що розроблені алюмінієві профільні ТТ довжиною 2000 мм, зовнішнім діаметром 14 мм, $l_{\theta}/l_{\kappa}=11$, з теплоносієм ацетоном та канавчатою КС у вигляді Ω -подібних канавок забезпечували тепловий потік, що передається однією ТТ, більше 300 Вт при кутах нахилу 5-90° і 210 Вт при горизонтальному розташуванні. Термічний опір таких ТТ був 0,02-0,07 К/Вт. ПСК на основі розроблених ТТ мав ефективність до 72%. Поверхня ТТ не мала селективного покриття, а була покрита чорним анодом.

2. Вакуумні теплові сонячні колектори на основі ТТ. Широке використання ТТ сьогодні отримали у вакуумних теплових сонячних колекторах (ВСК) [25]. Велику роль у цьому зіграло значне спрощення складання ВСК. Причому використання ТТ дало змогу проводити складання прямо на місці установки сонячної енергетичної системи, що спростило монтаж і заміну ТТ при пошкодженні.

На ринку представлені два типи ВСК – з одним склом (рис. 5а) та з подвійним склом (рис. 5б). ВСК з одним склом – це скляний об’єм, всередині якого знаходиться зона випаровування ТТ з припаяною чи привареною теплопоглинаючою поверхнею. ВСК з подвійним склом являє собою скляну відвакуумовану колбу [26]. При цьому внутрішня поверхня колби має селективне покриття і є абсорбером. Всередині колби розташована зона випаровування ТТ. Тепло передається від внутрішньої поверхні колби до ТТ теплопровідною фольгою чи іншим контактним елементом. У першому і в другому випадку акумульовану теплоту ТТ передають робочій рідині в спеціальному теплообміннику (рис. 5в та 2в).



в)

Рис. 5. Типи ВСК: а – з одним склом; б – з подвійним склом; в – конструкція ВСК компанії Viessmann [27].

В залежності від конструкції ВСК їх максимальна ефективність коливається від 65% до 80%. ВСК з подвійним склом має нижчу ефективність за рахунок додаткових термічних опорів на ділянці передачі теплоти до ТТ, а також за рахунок розміру поверхні апертури.

Зазвичай у ВСК застосовують мідні ТТ. Такі ТТ мають діаметр зони випаровування від 8 до 12 мм та зоною конденсації 14 і 22 мм. ТТ виготовляються без КС, іноді з сітчастою чи порошковою КС.

Також можуть використовуватися мідні ТТ з тепловим вентиляем [28]. Такі ТТ дозволяють автономно виключати роботу СК при перегріванні за рахунок спеціального теплового вентиля чи мембрани. Тепловий вентиль зазвичай включає металеву пружину і управляючу пружину чи мембрану. При перегріві ТТ за рахунок тиску пари тепловий вентиль чи мембрана перекривають вихід зони випаровування до зони конденсації ТТ, робоча рідина не поступає до зони випаровування і ВСК не працює. Це важливо у випадках, коли настає перегрів ТТ, наприклад, при поломці насосної станції сонячної енергетичної системи.

Окрім мідних ТТ у ВСК можуть використовуватися алюмінієві ТТ. Наведені експериментальні результати [24] показують, що такі ВСК з подвійним склом мають максимальну ефективність до 72%, що відповідає ефективності інших конструкцій ВСК з подвійним склом. Перевага застосування алюмінієвих ТТ – можливість виготовляти профіль ТТ як одне ціле зі спеціальними плавниками для передачі теплової енергії від вакуумної колби до корпусу ТТ замість фольги. За

рахунок чого можна виключити термічний контактний опір між ТТ і фольгою.

В роботі [29] запропоновано використовувати пульсаційні теплові труби у ВСК (рис. 6). Автори зазначають, що з точки зору низької вартості, а також гнучкості та високої продуктивності, пульсаційні ТТ мають перспективу. Фактично така схема являла собою ТС з великою кількістю зон випаровування та загальною зоною конденсації. В якості теплоносіїв використовувались етанол та фреони R-142b, R-134a. Найбільша ефективність ВСК була досяжна з теплоносієм етанолом.

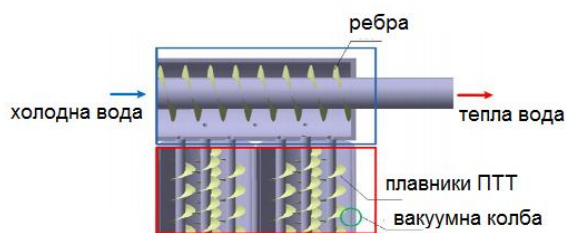
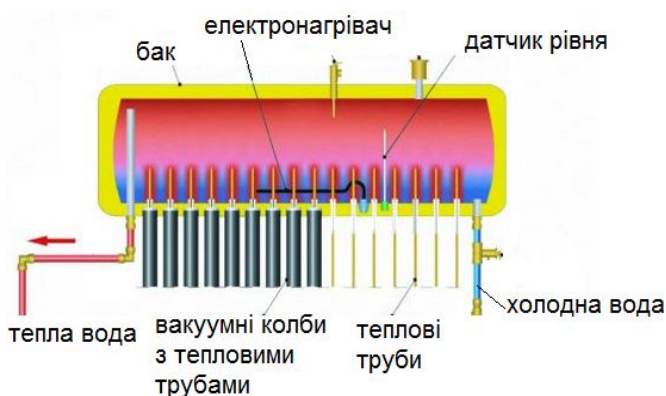
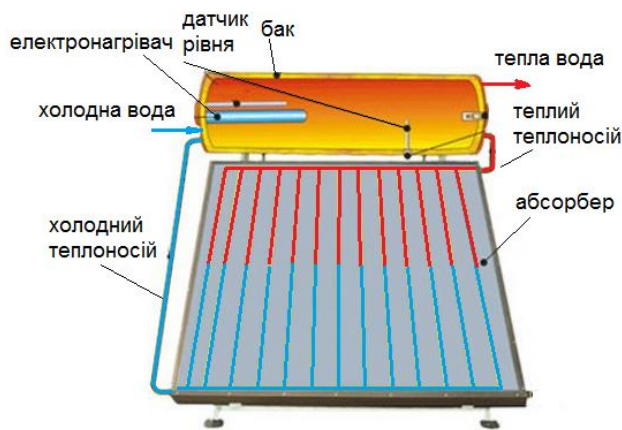


Рис. 6. Конструкція ВСК з ПТТ [25].

3. Термосифонні (конвекційні) теплові сонячні колектори на основі ТТ. Перевага застосування ТТ [30], перш за все, існує в термосифонних теплових сонячних колекторах (ТСК) (рис. 7). Так, використання ТТ в таких СК дає змогу підвищити їх ефективність на 25-30% за рахунок низької інерційності теплообмінних процесів у ТТ. Крім того, ТТ вирішують проблему запобігання зворотнього току робочої рідини в нічний час (використовується властивість роботи ТТ в режимі ТС як термодіоду) та заморожування робочої рідини [31].



а)



б)

Рис. 7. Порівняння конструкції вакуумного термосифонного сонячного колектора на основі ТТ зі звичайним термосифонним сонячним колектором: а – ВТСК з ТТ; б – звичайний ТСК.

Як видно з рис. 7, процес тепломасообміну в звичайному ТСК дуже інерційний. Він визначається природною конвекцією і залежить від ефективності прогрівання теплоносія під теплопоглинаючою поверхнею та організацією циркуляції теплоносія в контурі. У ВСК процес тепломасообміну значно ефективніший. Теплота від теплопоглинаючої поверхні (вакуумної колби) переноситься в бак за рахунок теплових труб. Запуск такої системи відбувається практично за 3-5 хвилин. Крім того, для підвищення інтенсифікації теплообміну води в баку зона конденсації ТТ має додатково зовнішню "юбку", що забезпечує щільний зазор. За рахунок цього відбувається інтенсивне прогрівання води в щілині від зони конденсації ТТ з подальшим викидом теплої води у бак, що значно інтенсифікує процес тепловіддачі.

4. Комбіновані сонячні колектори на основі ТТ. Комбіновані сонячні колектори (КСК) [32] одночасно перетворюють сонячне випромінювання в електричну і теплову енергію. Конструктивно вони являють собою комбінацію сонячного теплового колектора та фотоелектричної батареї.

Застосування ТТ в КСК сьогодні розглядається як перспективний напрямок [33]. Така технологія на даний час є відносно новою, і відповідно дослідження у цьому напрямі обмежені. Використання ТТ в КСК має ряд переваг [33]: достатньо високе значення загальної ефективності – 42-68%; забезпечення низької температури фотоелементів; стабільні характеристики; ефективний

відбір тепла; зниження енергопотреб системи забезпечення циркуляції робочої рідини. Але такі КСК мають і недоліки: висока вартість за рахунок вартості ТТ; забезпечення надійності функціонування ТТ; складна конструкція. Крім того, слід зазначити, що загальна ефективність у порівнянні зі звичайним КСК при рівних умовах буде нижчою за рахунок додаткового термічного опору ТТ. Така різниця може становити до 10%.

В конструкціях КСК використовуються різні типи теплових труб: мідні з КС та без КС, плоскі алюмінієві, алюмінієві профільні ТТ. Так, авторами роботи [34] запропоновано використовувати плоскі ТТ. Цей КСК базується на плоских алюмінієвих ТТ з великою кількістю мікроканалів, що являють собою зони випаровування ТТ (рис. 8) [35]. Інший кінець такої ТТ є зоною конденсації і контактує з теплообмінником зовнішнього рідинного контуру. Автори підкреслюють, що така форма ТТ забезпечує гарний контакт з фотоелементами і нема необхідності застосовувати технологічні процеси пайки та зварювання абсорбера з ТТ, що приводить до зменшення теплового опору системи та підвищення ефективності КСК. Було також показано, що використання таких ТТ може підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, в порівнянні зі звичайними фотобатарейми, до 15-30%, якщо температура поверхні фотоелементів буде підтримуватись на рівні 40-50°C.

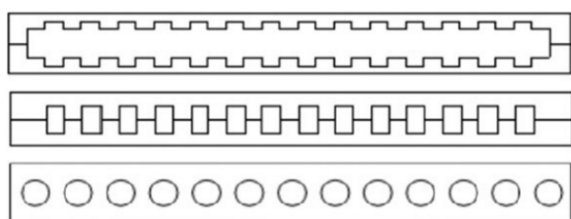


Рис. 8. Конструкція плоских алюмінієвих ТТ для КСК [35].

У роботі [35] наведено нову концепцію КСК: для фасадів будівель на основі пульсаційних теплових труб (рис. 9а). Така система складається з ПТТ, теплообмінника, оребрених труб, графітового теплопровідного шару, металевого каркаса, ламінованого шару з фотоелементами і теплоізоляцією.

Як альтернатива може розглядатись використання алюмінієвих профільних ТТ в КСК для фасадів будівель [36]. Така конструкція ТТ та КСК наведена авторами в роботі [37] (рис. 9б). Дослі-

дження показали, що за рахунок охолодження фотоелементів така конструкція КСК здатна підвищити ефективність перетворення сонячної енергії до 28% у порівнянні зі звичайною фотоелектричною батареєю. За максимальної електричної потужності 135 Вт/м² одночасно можна отримати теплову енергію до 457 Вт/м² при сонячному потоці 900 Вт/м² і температурі робочої рідини в зовнішньому контурі не вище 25°C.

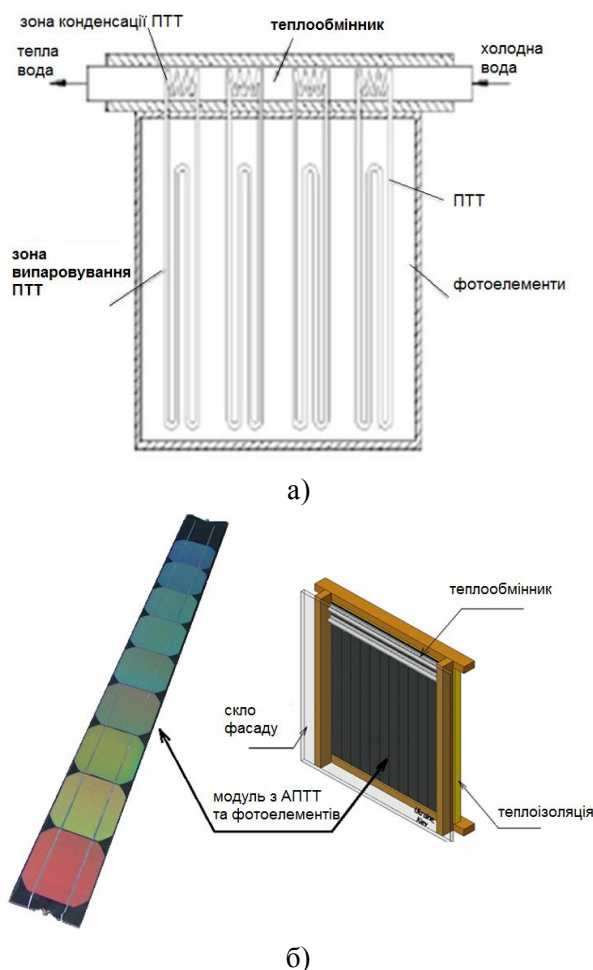


Рис. 9. Конструкція КСК з ТТ: а – на основі ПТТ [35]; б – на основі алюмінієвих профільних ТТ (АПТТ) [37].

Існують конструкції КСК на основі вакуумних сонячних колекторів з мідними тепловими трубами. Такі КСК складаються з вакуумної колби з одним склом, в якій розташована тепла труба з фотоелементами на поверхні теплопоглинаючої поверхні [38] (рис. 10). Така конструкція КСК потребує інтенсивного тепловідводу від фотоелементів за рахунок ТТ, але при цьому дозволяє одержувати високу теплову ефективність при малих значеннях сонячного потоку та низьких температурах.



Рис. 10. Конструкція КСК на основі вакуумного сонячного колектора з ТТ [38].

Дослідження показали, що використання ТТ в КСК можуть мати потенціал при вирішенні проблем великих контурів сонячних енергетичних систем для запобігання їх розгерметизації, при можливості нерівномірного розповсюдження робочих рідин у різних частинах систем, при створенні модульних систем, а також у конструкціях КСК, які працюють у комбінації з тепловими насосами.

Висновки. У статті розглянуто різні варіанти застосування теплових труб у сонячних енергетичних системах. На сьогодні використання ТТ є не тільки перспективним, але й необхідним. Як елементи сонячних енергетичних систем використовуються і можуть бути перспективними різні типи ТТ: без капілярної структури (термосифони), з капілярною структурою (порошковою, сітчастою, металоволокнистою, канавчатою) та плоскі ТТ. Кожен тип ТТ має свої переваги і недоліки, що і визначає їх можливість застосування в тій чи іншій конструкції. Однак необхідно брати до уваги те, що ТТ вносять додатковий термічний опір у систему. При конструюванні необхідно забезпечити таке схемне рішення, яке компенсує їх термічний опір за рахунок підвищення розвиненої поверхні та ефективності системи тепловідведення чи інших факторів (складання, монтаж тощо). Крім того, бажано брати до уваги таку компоновку, при якій ТТ буде працювати в режимі термосифона, забезпечивши при цьому високі теплопередавальні властивості і низькі значення термічного опору. В інших випадках необхідно враховувати здатність і ефективність ТТ працювати проти сили тяжіння. Тільки в цьому випадку ТТ забезпечать ефективність сонячних енергетичних систем. Цього можна досягти комплексним підходом при конструюванні як

самої сонячної енергетичної системи, так і її елементів на основі ТТ.

1. Pareto V.E., Pareto M.P. The urban component of the energy crisis. SSRN; 2008.
2. Concerted Action | Energy Performance of Buildings Directive. <http://www.epbd-ca.eu/>.
3. Depraetere W. Integrated design solution for the multifunctional skin of an office building // Conference on Advanced Building Skins, Bressanone, Italy, 05-06 Nov. – 2013. – P. 41–45.
4. Voss K., Musall E. Net zero energy buildings. – Detail Green Book, 2012, ISBN 978-3-920034-80-5.
5. Bezrodny M.K., Piore I.L., Kostyuk T.O. Transfer Processes in Two-phase Thermosyphone Systems. Theory and Practice. – Augmented and Revised Edition. – Kiev: Fact, 2005. – 704 p.
6. Peterson G.P. An Introduction to Heat Pipes: modelling, testing and application – Wiley, 1994. – 356 p.
7. Reay D.A., Kew P.A. Heat Pipes. – Fifth edition. – 2006. – 374 p.
8. Randeep Singh, Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Aliakbar Akbarzadeh. Applications of heat pipes in energy conservation and renewable energy based systems. – Frontiers in Heat Pipes (FHP), 2, 033003 (2011). – P. 1–13.
9. Vasiliev L.L. Eds., Heat pipes in the systems with renewable energy sources. – Minsk: Science and technology, 1988. – P. 7–35.
10. Riffat S.B., Doherty P.S., Abdel Aziz E.I. Performance testing of different types of liquid flat plate collectors // International Journal of Energy Research. – 2000. – Vol. 24. – Issue 13. P. 1203–1215.
11. Jorge Facão and Armando C. Oliveira. Analysis of a Plate Heat Pipe Solar Collector. SET 2004 // International Conference on Sustainable Energy Technologies. Nottingham, UK, 28-30 June 2004.
12. Khairnasov S.M., Zaripov V.K., Rassamakin B.M., Kozak D.V. The Study of the Heat Engineering Characteristics a Solar Heat Collector Based on Aluminum Heat Pipe // Applied Solar Energy. – 2013. – Vol. 49. – No. 4. – P. 225–231.
13. 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. – 2013. – Vol. 7. – No. 4 (65). – P. 403–409.
14. Azad E. Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2008. – No. 32. – P. 1666–1672.
15. Sivakumar K., Krishna Mohan N. and Sivaraman B. Performance analysis of elliptical heat pipe solar collector // Indian Journal of Science and Technology. – 2011. – Vol. 4. – No. 1 (Jan). – P. 4–7.
16. Mehmet A. Development of heat pipes for solar water heaters // Solar Energy. – 1984. – No. 32. – P. 625–631.
17. Hussein H.M.S., Mohamad M.A., El-Astouri A.S. Optimization of a wickless heat pipe flat plate solar collector // Ener Convers Mgmt. – 1999. – No. 40. – P. 1949–1961.

18. *Sivaraman B., Krishna Mohan N.* Experimental analysis of heat pipe solar collector with different L/d ratio of heat pipe // *Journal of Scientific & Industrial Research.* –2005. – Vol. 64. – P. 698–701.
19. *Brahim Taoufik, Mhiri Foued and Jemmi Abdelmajid.* Parametric Study of a Flat Plate Wick Assisted Heat Pipe Solar Collector // *J. Sol. Energy Eng.* – 2013. – No. 135(3). P. 345–354.
20. *Jack Steffen, Föste Sebastian, Schiebler Bert, Giovannetti Federico.* Neuartige Kollektoren mit Wärmeröhren zur Begrenzung der Stagnationstemperatur und Reduzierung der Systemkosten. In: OTTI e.V. (Hrsg.): 24. // *Symposium Thermische Solarenergie (Tagungsband).* Regensburg: Mai 2014. – P. 20.
21. *YueChao Deng, ZhenHua Quan, YaoHua Zhao, LinCheng Wang.* Experimental investigations on the heat transfer characteristics of micro heat pipe array applied to flat plate solar collector // *Science China Technological Sciences.* – 2013. – Vol. 56. – Issue 5. – P. 1177–1185.
22. *Borodkin A, Pustyakov J., Samoilo A., Sasin V., Tyurin N.* Autonomus system of solar heat supply. // 9th International Heat Pipe Conference, 1-5 May, 1995, Albuquerque, USA. – P. 845–855.
23. *Khairnasov S., Rassamakin B., Anisimova A., Naumova A.* Design and study of aluminium profile thermosyphons for photovoltaic-thermal solar collector // *Heat Pipe Science and Technology.* 2015. – No. 3. –Vol. 4. – P. 34–41.
24. *Rassamakin B., Khairnasov S., Zaripov V., Rassamakin A., Alforova O.* Aluminium Heat Pipes Applied in Solar Collectors // *Solar Energy.* – 2013. – No. 94. – P. 145–154.
25. *Antonius A.A. Slaats.* Solar collector, US Patent No US 4335709 A, 1982.
26. *Richard Collins, Bernard Pailthorpe, Brendan Bourke.* Evacuated solar collector tube, US Patent No. US 4834066 A, 1989.
27. <http://www.viessmann.ua/uk/ein-zweifamilienhaus/produkte/Solarthermie/>
28. *Mahjouri F.* "Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors" www.thermotech.com. 2005. Thermo Technologies, Web. 16 Sep 2009. <<http://thermotech.com/Downloads/Vacuum%20Tube%20Paper.pdf>>.
29. *Sang Il Leea, Gil Jae Sona, Kyu Il Hanb, Jong Soo Kima, Bang ho Jeongc.* Performance Evaluation of the Evacuated Solar Collector Using the Pulsating Heat Pipe // 10th IHPS, Taipei, Taiwan, Nov. 6-9, 2011. – P. 196–200.
30. *Bienert B.* Heat pipes for solar collectors, in: *Proceedings of the 1st International Heat Pipe Conference,* Stuttgart, Germany, 1973.
31. *Yi-Mei Liu, Kung-Ming Chung, Keh-Chin Chang and Tsong-Sheng Lee.* Performance of Thermosyphon Solar Water Heaters in Series // *Energies.* – 2012. – No. 5. – P. 3266–3278.
32. *Pascal Affolter, Wolfgang Eisenmann, Hubert Fechner, Matthias Rommel, Anton Schaap, Henrik Sørensen, Yiannis Tripanagnostopoulos, Herbert Zondag.* PVT ROADMAP, a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology, 2010 – 88 p.
33. *Xingxing Zhanga, Xudong Zhaoa, Stefan Smitha, Jihuan Xub, Xiaotong Yuc.* Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2012. P. 599–617.
34. *Zhao Y et al.* The experimental research of using novel flat-plate heat pipe for solar cells cooling // *Proceeding the Chinese thermal engineering physics of heat and mass transfer conference,* 13–16 November 2009. – P. 239–241.
35. *Xudong Zhao and Xingxing Zhang.* "Solar Photovoltaic/Thermal Technologies and Their Application in Building Retrofitting" in *Handbook Nearly Zero Energy Building Refurbishment,* Fernando Pacheco Torgal, Marina Mistretta, Arturas Kaklauskas, Claes G. Granqvist, Luisa F. Cabeza, Eds., Springer, 2013. – P. 615–658.
36. *Elgart Ya., Rassamakin B., Khairnasov S., Dusheiko M., Rassamakin A. and Frolov G.* Combined Photovoltaic-Thermal Solar Collector, Australian Patent No 2014100354, 10.04.2014.
37. *Rassamakin B., Khairnasov S., Dusheiko M., Alforova O.* Design of Photovoltaic-Thermal Module Based on Heat Pipes // 28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, 30 September – 04 October 2013.
38. *Kazimierz Szymocha, Douglas Lindstrom, Kristian Olsen.* Hybrid solar energy collector, US Patent N. US 20040055631 A1, 2004.