

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРАХ З ВІЛЬНИМ РЕЖИМОМ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕПЛОНОСІЯ

Отримано 14 бер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 21 чер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 лип. 2024 р.

Головко В. М.¹, Володарський В. Г.²

Автор для кореспонденції: Головко Володимир,
e-mail: golovkovm@ukr.net

¹ д-р техн. наук, професор.
<https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

² аспірант.
<https://orcid.org/0009-0002-6133-2298>

^{1,2} НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Ефективна теплопередача має першочергове значення для підвищення продуктивності сонячних колекторів, забезпечуючи раціональне використання сонячної енергії. У цій статті аналізуються різні методи інтенсифікації теплопередачі в сонячних колекторах для підвищення їх загальної ефективності. Розглядаються п'ять різних підходів: перетворення абсорбуючих панелей у нагрівальні елементи, інтеграція нанофлюїдів для підвищення теплопровідності, включення скручених стрічкових елементів для індуквання турбулентності, впорскування повітряних бульбашок та модифікація структур вакуумних трубок для удосконалення шляхів теплопередачі. Кожен метод оцінюється на основі його здатності підвищувати теплопровідність, складності впровадження, міркувань вартості, сумісності та подальшого покращення продуктивності. Переваги та обмеження цих методів дозволяють на практиці приймати обґрунтовані рішення щодо підвищення ефективності теплопередачі в сонячних колекторах і в такий спосіб сприяти використанню сонячної енергії для сталого виробництва енергії.

Ключові слова: сонячна водонагрівальна установка, вільний режим теплообміну, інтенсифікація теплообміну.

ANALYSIS OF METHODS OF THERMAL TRANSFER INTENSIFICATION IN SOLAR COLLECTORS USING FREE HEAT TRANSFER FLUID CIRCULATION MODE

Received Mar. 14, 2024; accepted Jun. 21, 2024
Available online Jul. 01, 2024

Golovko V.¹, Volodarskyi V.²

Author for correspondence: Golovko Volodymyr,
e-mail: golovkovm@ukr.net

¹ Dr. of Tech. Sciences, prof.
<https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

² Postgraduate student.
<https://orcid.org/0009-0002-6133-2298>

^{1,2} National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

¹ Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. Effective heat transfer is paramount for increasing the productivity of solar collectors, ensuring optimal utilization of solar energy. This article explores various methods of enhancing heat transfer in solar collectors to improve their overall efficiency. Five different approaches are considered: converting absorbing panels into heating elements, integrating nanofluids to enhance thermal conductivity, incorporating twisted tape elements to induce turbulence, injecting air bubbles, and modifying the structures of vacuum tubes to optimize heat transfer pathways. Each method is evaluated based on its enhancement of thermal conductivity, implementation complexity, cost considerations, compatibility, and potential performance improvement. Understanding the advantages and limitations of these methods, researchers and practitioners can make informed decisions regarding enhancing heat transfer efficiency in solar collectors, thereby promoting the use of solar energy for sustainable energy production.

Keywords: solar water heating installation, free mode of heat exchange, intensification of heat exchange.

Вступ. З плином часу і зростанням цін на паливо робота над підвищенням ефективності сонячних колекторів стала необхідною для вирішення енергетичних задач традиційних джерел енергії [1]. В умовах глобальної енергетичної кризи та зростаючої уваги до екологічних аспектів виробництва енергії раціоналізація роботи сонячних колекторів є одним з ключових напрямів розвитку енергетичних технологій. Сучасний світ зіткнувся з гострою потребою не лише пошуку відновлюваних джерел енергії, але й значного підвищення ефективності їх використання. У цьому контексті сонячна енергія як одне з найбільш доступних та екологічно чистих джерел виходить на передній план.

Останнім часом використання сонячної енергії в основному зосереджується на виробництві фотоелектричної енергії, утилізації сонячної теплової енергії та комплексному їх використанні [2]. У цій роботі основна увага приділятиметься дослідженню сонячного колектора, який є особливим видом теплообмінника, що перетворює сонячне випромінювання на теплові хвилі, які проходять через робоче середовище [3].

Порівняно з іншими формами пристроїв для утилізації сонячної енергії сонячний колектор має високу ефективність, тривалий термін служби, низькі початкові інвестиції, просту конструкцію, легку установку та обслуговування. До того ж його можна широко використовувати для зимового опалення, гарячого водопостачання й технологій сушіння в сільському господарстві з обладданою перспективою розвитку та ринковим потенціалом.

Серед різноманітних типів сонячних колекторів на особливу увагу заслуговують ті, що працюють на основі вільної циркуляції теплоносія. Основними перевагами їх використання є такі:

- Енергонезалежність та екологічність. Відсутність потреби у використанні електричної енергії для циркуляції теплоносія робить ці системи ідеальними для віддалених або автономних об'єктів. Вони не викидають в атмосферу шкідливі речовини, сприяючи збереженню довкілля.
- Простота установки та обслуговування. Спрощена конструкція мінімізує потребу в регулярному технічному обслуговуванні, знижуючи загальні витрати на використання системи.
- Довговічність. Завдяки меншій кількості рухомих частин, такі системи часто мають вищу надійність і триваліший термін експлуатації порівняно з колекторами, що використовують примусову циркуляцію.

Однак ефективність таких систем безпосередньо залежить від ефективності теплообміну між теплоносієм та поверхнею абсорбера, який поглинає сонячне випромінювання. Тут на перший план виходить проблема інтенсифікації теплообміну, що має критичне значення для підвищення загальної продуктивності системи.

Збільшуючи швидкість, з якою теплота передається від сонячних променів до робочої рідини всередині колектора, можна значно покращити загальну продуктивність системи. Останнім часом вивчення ефективних методів інтенсифікації теплообміну привернуло значну увагу через підвищені вимоги промисловості до теплообмінного обладнання, створення та експлуатація якого менш дорогі. Економія матеріалів і використання енергії є сильною мотивацією для розробки вдосконалених методів інтенсифікації. Під час проектування систем охолодження в геліоенергетичній промисловості важливою умовою є компактність і легкість теплообмінників. Крім того, покращення теплообміну необхідне для багатьох застосувань на електростанціях, у хімічній та нафтогазовій промисловості. Це спонукало до розробки покращених поверхонь теплообміну. Загалом покращені поверхні теплообміну можна використовувати для:

- зменшення загального об'єму теплообмінника й для того, щоб зробити теплообмінники більш компактними та легкими;
- збільшення загального значення коефіцієнта теплообміну та площі теплообміну;
- зменшення початкової вартості теплообмінника.

У процесі роботи розглянуто принципи, що лежать в основі режиму вільної циркуляції теплоносія, а також проведено аналіз інноваційних методів і технологій, спрямованих на інтенсифікацію теплообміну в сонячних колекторах.

Постановка завдання. Провести аналіз та порівняти методи інтенсифікації теплообміну в сонячних колекторах з вільним режимом циркуляції теплоносія.

Виклад основного матеріалу. Загалом принцип роботи сонячного колектора полягає в захопленні сонячного випромінювання та передачі його теплообмінній рідині – в такий спосіб відбувається його перетворення на придатну для використання теплову або електричну енергію. Однак детальніший механізм зазначеного процесу залежить від конкретного типу сонячного колектора та його призначення. У цьому аналізі будуть розглянуті варіанти сонячних колекторів з вільним режимом циркуляції теплоносною рідини.

Вільна (природна) циркуляція являє собою циркуляцію рідини в трубопровідних системах або відкритих басейнах, що відбувається внаслідок зміни щільності, викликані різницею температур. Вода рухається з малих труб до резервуара шляхом природної конвекційної циркуляції [4]. Для природної циркуляції не потрібні механічні пристрої для підтримки потоку. Цей тип циркуляції зазвичай має низьку вартість, але при ньому теплота постійно втрачається, особливо в холодні зимові дні, дні, коли погода похмура, і вночі, тому що ізолятор не використовується [5].

До основних типів сонячних колекторів належать: плоскі та вакуумні трубчасті колектори. Плоскі колектори загалом складаються з металевого корпусу, поглинальної пластини темного кольору з проходами для циркуляції рідини і прозорого покриття, яке забезпечує передачу сонячної енергії до пластини. Бокові та задня сторони корпусу зазвичай ізолювані задля зменшення втрати теплоти в навколишнє середовище.

З метою відведення теплоти від сонячного колектора теплоносієм циркулює трубками, щоб відібрати теплоту від пластини абсорбера. Через зміну температури рідини змінюються її властивості, як-от густина, в'язкість, питома теплоємність і теплопровідність [6], внаслідок чого виникає так званий термосифонний ефект. Рідина збирається в ізолюваному баку, щоб запобігти втратам теплоти нагрітої рідини [7].

У вакуумних трубчастих колекторах використовується скляна трубка для оточення абсорбера вакуумом і ефективного протистояння атмосферному тиску. Вакуум, який оточує абсорбер, значно зменшує втрати теплоти конвекцією та теплопровідністю, завдяки чому досягається більша ефективність перетворення енергії. Теплоносна рідина може надходити в кожну трубку та виходити з неї або контактувати з теплопровідною трубкою,

що проходить усередині трубки. Теплові трубки виконують функцію передачі теплоти рідині в теплообміннику, розміщеному поперечно відносно труб. Колектор зазвичай має ізоляцію зі скловати й покривається захисним металом або пластиком. Високі температури, що можуть виникати всередині вакуумованих трубок, можуть вимагати спеціальної конструкції для запобігання перегріванню. Деякі вакуумні трубчасті колектори працюють як тепловий односторонній клапан завдяки тепловим трубкам. Це дає змогу досягти притаманної їм максимальної робочої температури, яка діє як функція безпеки [8].

Перетворення сонячної енергії на теплоту характеризується ефектом теплоаккумуляції, що супроводжується низкою процесів тепло- і масообміну, основним і найважливішим з яких є випромінювання [9]. Кількість сонячної енергії, яку адсорбує поглинальна панель, пропорційна тепловій потужності сонячної системи гарячого водопостачання. Зниження тепловиділення відбувається за рахунок дії зовнішніх факторів, що викликають охолодження теплоносія. Серед варіантів покращення теплообміну найефективнішими є посилення теплового захисту елементів системи та збільшення площі радіаційної поверхні сонячного колектора.

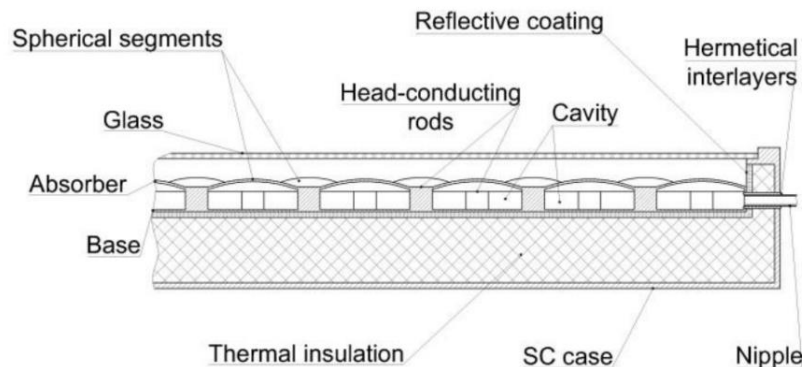


Рис. 1. Переріз сонячного колектора [10]

Fig. 1. Solar collector cross-section [10]

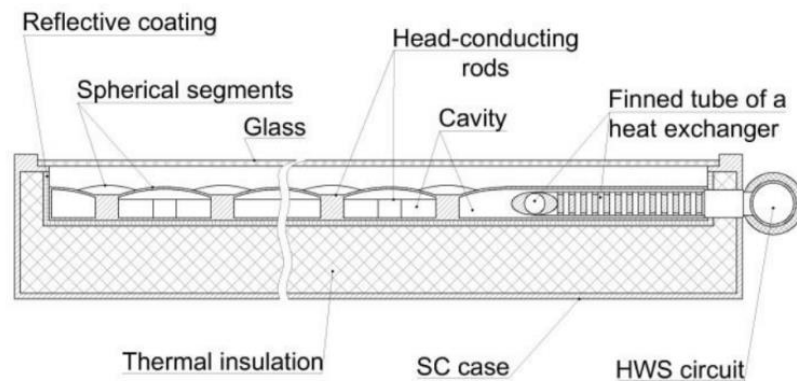


Рис. 2. Поздовжній розріз сонячного колектора [10]

Fig. 2. Solar collector longitudinal section [10]

У роботі [10] описана реалізація концепції інтенсифікації поглинання теплової енергії під час роботи сонячних систем гарячого водопостачання, яка здійснюється шляхом модернізації поглинальної панелі плоского сонячного колектора шляхом перетворення її на нагрівальний елемент. Цей пристрій складається з двох тонкостінних мідних пластин, розташованих паралельно одна одній і з'єднаних між собою замковим контуром бічних стінок і стрижневих теплопровідних елементів. Зверху – промеприймальна панель з утворенням сферичних сегментів; внизу розташована основа. Ця концепція наведена на рис. 1 та 2.

Рішення про зміну форми абсорбера обумовлене бажанням при збереженні габаритних розмірів корпусу збільшити площу поглинальної поверхні, величина якої є основною характеристикою геліотермічної установки.

У ході дослідження, проведеного в межах роботи [11] був розроблений інноваційний підхід до підвищення ефективності теплообміну рідин, який ґрунтується на обміні робочої рідини з нанофлюїдами. У цій роботі була зроблена спроба продемонструвати зміни в процесі теплообміну при використанні оксиду нікелю (NiO), оксиду алюмінію (Al_2O_3) і оксиду міді (CuO) як нанофлюїдів при об'ємних концентраціях 0,05, 0,075 і 0,1 %. З цією метою було побудовано конічний сонячний колектор з використанням місцевих сталевих листів. Усередині конуса використовується ізоляційна набивка з пінополіуретану. Сонячна енергія фокусується на поглинальній поверхні за допомогою тонкої світловідбивальної алюмінієвої фольги. Робочі рідини, які використовуються в більшості сонячних систем, – це вода, гліколи та нанофлюїди. Найвищий рівень ефективності, якого можна досягти в стоячих системах, обмежується низькою теплопровідністю цих робочих рідин. Отже, для підвищення ККД сонячних енергосистем необхідно покращити характеристики теплообміну робочих тіл. Було показано, що нанофлюїди є корисними як робочі рідини, не в останню чергу завдяки своїм властивостям забезпечувати ефективніший теплообмін.

Загалом перевага нанофлюїдів при використанні їх як теплоносія у сонячних колекторах пояснюється такими аспектами:

- збільшенням густини й питомої теплоємності робочого тіла, а отже, підвищення його коефіцієнта теплопередачі;
- збільшенням теплообміну між рідиною та приймачем;
- зниженням температури абсорбера.

Проте хоча використання нанофлюїдів має низку переваг, існує декілька причин, через які повний перехід на сонячні системи з нанофлюїдами як теплоносія може становити деякі труднощі [12]:

- витрати на виробництво та підготовку нанофлюїдів є високими;

- використання нанофлюїдів призводить до високих експлуатаційних витрат через збільшення роботи насосів;
- якщо система працює в умовах природної конвекції та має надто високі температури, наночастинки агрегують і поводяться нестабільно;
- наночастинки можуть атакувати та роз'їдати металеві частини системи та навіть блокувати шляхи потоку. (Корозія залежить від матеріалу труби. Наприклад, навіть з водою або нанофлюїдами, руйнування не відбувається при використанні труб з нержавіючої сталі, але корозія рівномірно розподіляється по всій трубі при використанні мідних труб);
- вважається, що наночастинки можуть мати згубні наслідки для навколишнього середовища та здоров'я людини.

У процесі дослідження циліндричний абсорбер заповнювався нанорідиною, а вода циркулювала всередині приймача за допомогою спіральної мідної трубки. Масовий потік води залишався постійним, $8,33 \times 10^{-3}$ кг/с, а абсорбер ємністю 1,3 л був заповнений нанорідиною, тоді як всю експериментальну установку зберігали на відкритому місці для сонячного випромінювання. В ході експерименту фотони зв'язувалися колектором і спрямовувалися до поглинача. Для реєстрації температури використовувалися термопари.

Температура води та інших нанофлюїдів зростала протягом дня, як показано на рис. 3. Температуру вимірювали між 9:00 ранку та 6:00 вечора 10 вересня 2021 року в Куфі, Ірак, на 32.05 широті і 44.37 довготи. Внаслідок порівняння результатів використання трьох нанофлюїдів, NiO, Al_2O_3 і CuO (рис. 3), з різними концентраціями (0,05, 0,075 і 0,1 %) можна зазначити, що ефект від цих типів наночастинок є позитивним порівняно з кожною концентрацією базової рідини (води). Експерименти проводилися з водою та нанофлюїдами, що містять різний відсоток наночастинок NiO, Al_2O_3 та CuO, 0,05, 0,075 та 0,1 % за об'ємом. Підвищення температури вимірювали протягом дня, і було зафіксовано різницю. Збільшення концентрації подібних нанофлюїдів підвищує загальну температуру дня, оскільки загальна теплопровідність рідини збільшується. Графік показує, що середня температура зростає зі збільшенням концентрації наночастинок.

Результати демонструють, що підвищення температури й теплового підсилення досягається за допомогою нанофлюїдів і різної концентрації наночастинок. Отже, нанофлюїди мають кращі теплообмінні властивості, ніж вода. Швидкість тепловіддачі безпосередньо залежить від концентрації наночастинок для всіх об'ємних відсотків. Теплообмін посилюється зі збільшенням концентрації наночастинок.

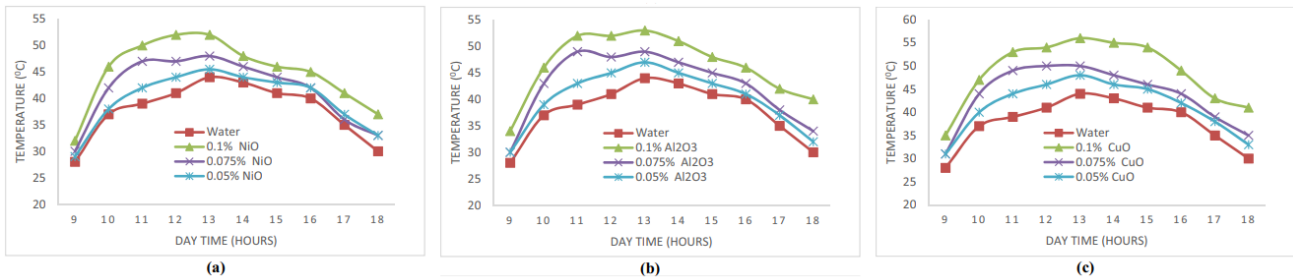


Рис. 3. Порівняння температури для (а) NiO, (б) Al₂O₃ та (с) нанофлюїдів CuO у різних концентраціях [11]

Fig. 3. Comparison of temperature for (a) NiO, (b) Al₂O₃ and (c) CuO nanofluids at different concentrations [11]

Ще одним методом інтенсифікації теплообміну можна вважати інтеграцію в структуру плоского колектора трьох типів скручених стрічок (односкрученої стрічки (single twisted tape – ST), подвійно скрученої стрічки (double twisted tape – DT) і змішаної скрученої стрічки (mixed twisted tape – SDT)), які порівнюються з простою трубкою з коефіцієнтами кручення (TR = 2), як було виконано в ході експериментального дослідження у роботі [13].

Схема експериментальної установки складається з двох листів скла товщиною 4 мм, які використовуються для покриття сонячного колектора над пластиною з міді та алюмінію (40 x 160 см), що має чорне покриття для максимальної адсорбції енергії сонячного випромінювання. Чотири труби (діаметром 1,25 см і довжиною 160 см)

розміщені над пластиною, щоб служити для проходу теплопровідної рідини. Застосовували три типи скручених стрічок (ST, DT і SDT) для порівняння з простою трубкою, яка використовувалася з коефіцієнтами кручення (TR = 2), як показано на рис. 4.

Система складається з двох колекторів, 40 x 160 x 15 см, кожен з яких підключений до двох резервуарів для води ємністю 20 л кожен. Задня та бокова сторони колектора ізолювані скловатою товщиною 7,5 см, щоб мінімізувати втрати теплоти. Дерев'яний корпус оточує вищезгадані компоненти і захищає їх від пилу, вологи та будь-яких зовнішніх впливів. Експериментальна установка також доповнена резервуарами, витратоміром, сонячним лічильником, клапаном, реєстратором даних, манометром і термopарою.

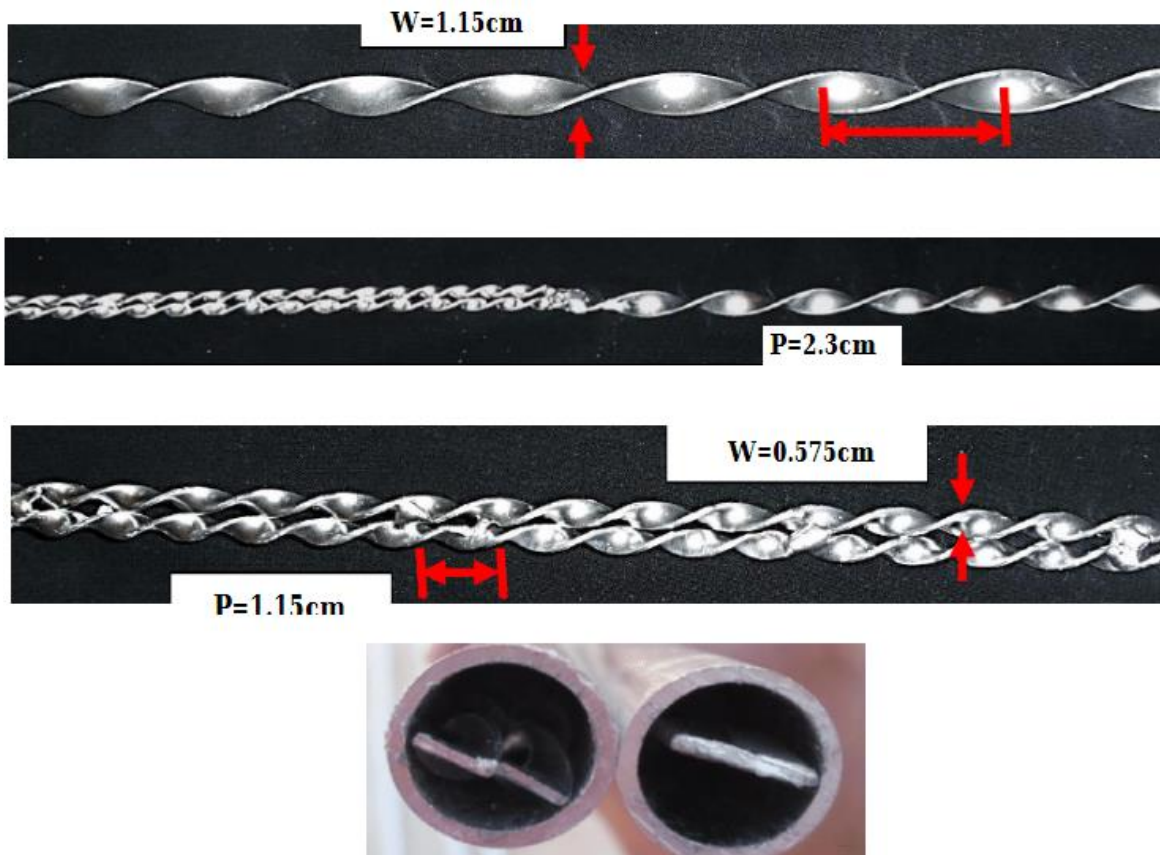


Рис. 4. Типи скручених стрічок, що вставляються в трубу [13]

Fig. 4. Twisted tape types inserted in the pipe [13]

Як результат проведеного дослідження на рис. 5 наведено залежності впливу типу скрученої стрічки на значення температури води на виході з колектора в порівнянні з простою трубкою, вставленою в трубку на плоскому колекторі, виготовленому з алюмінію та міді, який нахилений під кутом 45° , та орієнтацією колекторів відносно південного напрямку. Результати показують, що значення температури води на виході у скручених стрічках подвійного типу вище, ніж у простих трубах.

Односкручена стрічка має меншу ефективність, ніж подвійна, а зі змішаним типом крученої стрічки результати помірні. Також показано вплив типів металу на результати – мідний колектор кращий за алюмінієвий, оскільки мідь має вищу теплопровідність. Усі наведені нижче результати отримано в стаціонарному режимі (постійна температура води на вході протягом всього часу спостереження). Показання температури води на виході записували кожні 15 хв протягом однієї години.

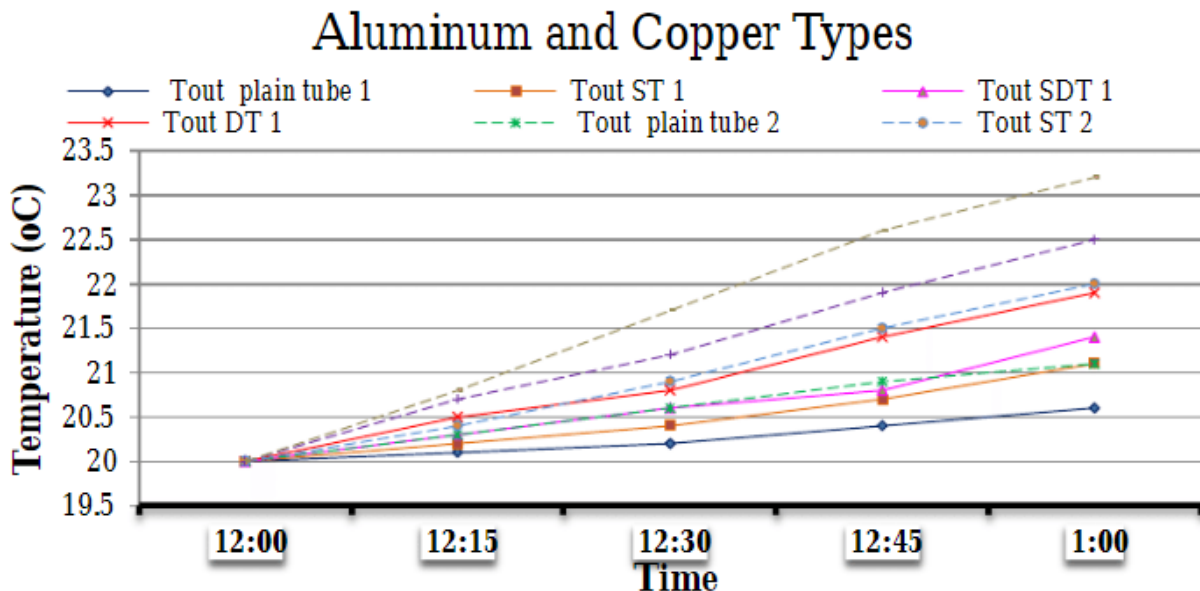


Рис. 5. Порівняння температури води на виході колекторів з алюмінію та міді з установленою гладкою трубкою; скрученими стрічками ST, SDT і DT [13]

Fig. 5. Comparison of outlet water temperature among collectors of aluminum and copper with tube; ST, SDT and DT twisted tapes [13]

Результати показують, що використання змішаної скрученої стрічки підвищує температуру на виході приблизно на 10 % більше, ніж звичайна труба. Максимальна температура води, отримана зі змішаною крученою стрічкою, становила $67,7$ і $61,4$ °C для мідного та алюмінієвого колектора відповідно.

Загалом, виходячи з результатів експериментального дослідження, проведеного з використанням плоского колектора в кліматичних умовах Іраку, можна зробити такий висновок: використання закрученої стрічки підвищує температуру води на виході, при цьому подвійний тип забезпечує вищу температуру води порівняно з іншими типами.

Метою наступного дослідження [14] була модифікація внутрішньої структури вакуумної труби колектора для сприяння теплопередачі через алюмінієве ребро до мідної теплової труби шляхом введення скрубів з нержавіючої сталі у вакуумну трубу для збільшення площі теплопровідної поверхні.

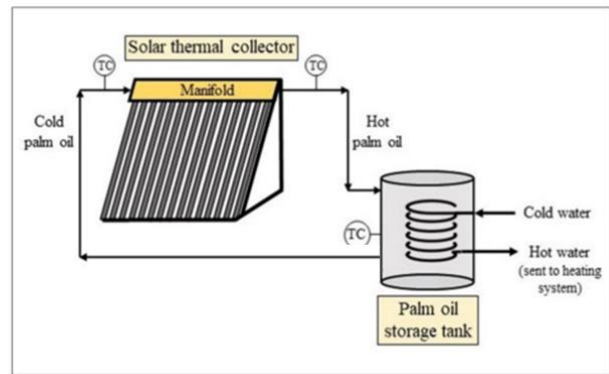
До складу експериментальної установки входили 20 вакуумованих трубок, що містили 10 мол.% етиленгліколю

у воді як теплообмінну рідину; пальмова олія використовувалася як нагрівальне середовище, що отримувало теплову енергію від кінчиків вакуумованих трубок, розміщених у колекторі, а потім передавалася для зберігання в резервуар.

Температура пальмової олії на вході та виході, температура резервуару для зберігання та інтенсивність сонячної енергії реєструвалися щогодини. Система була відключена між 16:00 та 0:00 ранку, а зміна температури протягом цього періоду реєструвалася для оцінки втрат теплоти з баку-акумулятора. Термопари типу k (похибка $\pm 0,4$ %) та вимірювач сонячної інтенсивності (TM-206, похибка ± 5 %, TENMARS ELECTRONICS, Тайвань) використовувалися для вимірювання температури та інтенсивності сонячного випромінювання відповідно. Експерименти проводили протягом 6 послідовних днів з однаковою інтенсивністю сонячного випромінювання та температурою навколишнього середовища в листопаді 2020 року. Середня інтенсивність сонячних променів у ці дні становила приблизно $828,36$ – $870,93$ Вт/м². Експериментальний колектор та його схема наведені на рис. 6.



(a)



(b)

Рис. 6. Установка сонячного вакуумно-трубного колектора в експерименті (a); схема вакуумно-трубного сонячного колектора (b) [14]

Fig. 6. A set of evacuated-tube solar collector system in the experiment (a); schematic of evacuated-tube solar collector (b) [14]

Внутрішню структуру вакуумної трубки було модифіковано для сприяння передачі теплоти до мідної теплової трубки. Алюмінієве ребро помістили всередину вакуумної трубки, як показано на рис. 7, а. Щоб модифікувати цю трубку, скрубери з нержавіючої сталі були вставлені в зазор між вакуумованою трубкою та мідною тепловою трубкою для збільшення площі теплопровідної

поверхні. Частка порожнечі і маса скруберів із нержавіючої сталі, розміщених у вакуумованих трубках, становили приблизно 2 % і 109,7 г відповідно. Набір для експериментів складається з 2 стандартних трубок і 2 модифікованих трубок, як показано на рис. 7, б. Термопари типу k ($\pm 0,4$ % похибки) були прикріплені на кінцях теплових трубок.



(a)



(b)

Рис. 7. Поперечний розріз стандартної та модифікованої труб (a); Експериментальна установка (b) [14]

Fig. 7. Cross-sectional view of the standard and modified tubes (a); experimental set up (b) [14]

Теплоносій є ключовим компонентом, що використовується для роботи циклу вакуумного колектора. Одним із простих способів підвищити продуктивність колектора є збільшення швидкості передачі теплоти від внутрішньої скляної стінки до рідини, що передає теплоту всередині теплової труби. Досягнення вищої температури теплоносія приводить до збільшення швидкості збереження його теплоти.

Експериментальні результати, що відповідають спостереженню за температурою кінців стандартних і модифікованих вакуумованих трубок протягом дня, проілюстровано на рис. 8. Температура кінців стандартної та модифікованої трубок різко зростає між 9:15 у та 10:15. Між 11:24 та 12:19 температура обох трубок різко падає, що узгоджується з тенденцією сонячної інтенсивності. Потім температура починає підвищуватися, поки не

стане стабільною, з 12:44 до 16:06. Час нагрівання стандартних і модифікованих трубок від температури навколишнього середовища до стабільного рівня температури становить приблизно 60 хв. Середня температура модифікованої трубки (160,32 °C) була приблизно на 20 °C вищою, ніж стандартної трубки (138,71 °C). Ці температури були використані для дослідження поведінки фазової зміни теплоносія за умови, що:

- температура кінця теплової трубки приблизно еквівалентна температурі теплоносія всередині теплопровідної трубки;
- перепад температур між дном і кінчиком теплової трубки не враховується;
- падіння тиску від потоку пари не враховується.

Діаграма Т-х, у (мольна частка пара / рідина етиленгліколю відносно температури) 10 мол.% етиленгліколю у воді при 1 атм, наведена на рис. 9. За допомогою цієї діаграми Т-х, у можна визначити молярні частки етиленгліколю при будь-якій конкретній температурі в рівновазі.

Наприкінці слід зазначити, що скрубери з нержавіючої сталі можуть значно покращити продуктивність сонячного теплового поглинач з вакуумною трубкою, оскільки вони можуть підвищити загальний коефіцієнт теплопередачі в 10 разів порівняно зі стандартною трубою. Середня температура модифікованого кінцевника трубки (160,32 °C) була приблизно на 20 °C вищою, ніж стандартного кінцевника трубки. Модифікований вакуумний колектор забезпечив підвищення ефективності на 34,96 % порівняно з стандартним колектором у тих самих кліматичних і робочих умовах.

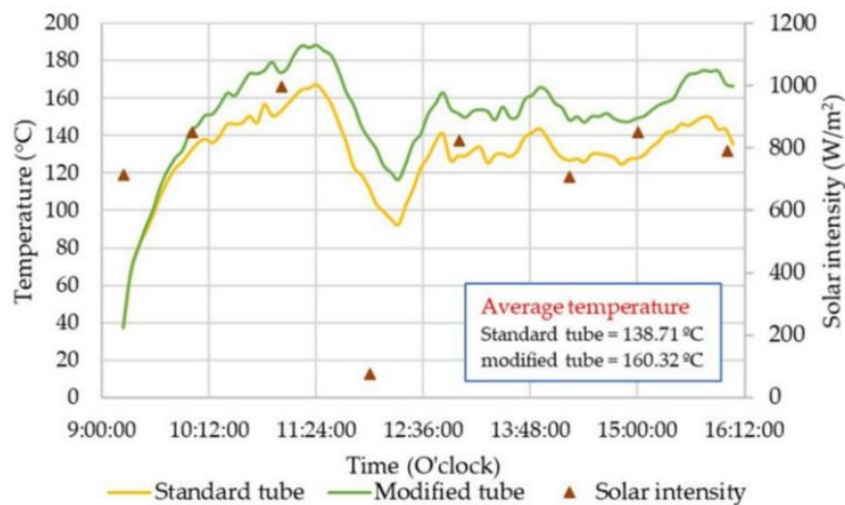


Рис. 8. Порівняння температури кінців стандартної та модифікованої трубок [14]

Fig. 8. Comparison of the heat pipe tip temperature of the standard tube and modified tube [14]

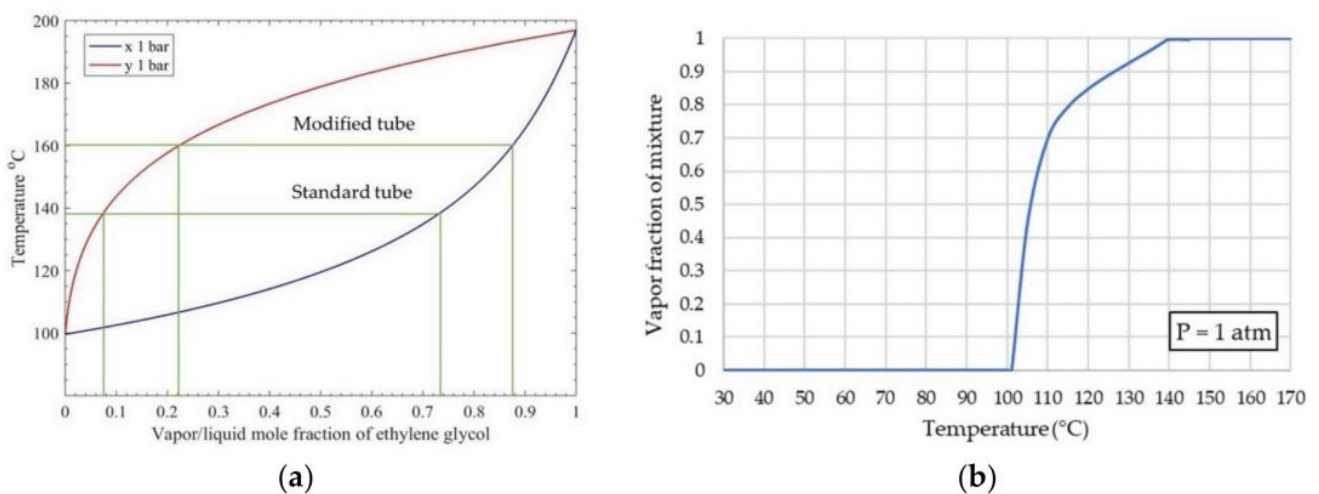


Рис. 9. Т-х, у діаграма 10 мол.% етиленгліколю у воді при 1 атм (а); Зв'язок між часткою пари 10 мол.% етиленгліколю у воді та температурою при 1 атм (б) [14]

Fig. 9. T-x,y diagram of 10 mol% of ethylene-glycol in water at 1 atm (a); r elation between vapor fraction of 10 mol% of ethylene-glycol in water and temperature at 1 atm (b) [14]

Наступне дослідження [16] мало на меті вивчити підвищення продуктивності сонячного колектора шляхом експериментального дослідження ефекту впорскування повітря з мікробульбашками в потік води в двох спірально розташованих мідних трубках.

Схема експериментальної установки та зображення сонячного колектора наведені на рис. 10. Сонячний колектор був розроблений з особливими специфікаціями,

щоб забезпечити повне падіння сонячного випромінювання на нього, оскільки увага приділялася його конструкції з точки зору кутів та вибору форми, де труби були встановлені у формі двох спіральних кілець, а внутрішня поверхня сонячного колектора також була пофарбована матовою чорною фарбою з сумішшю наноматеріалу (термофарбник з 5 % нітрату титану) для збільшення поглинання випромінювання пластиною, що викликає збільшення тепловіддачі воді.

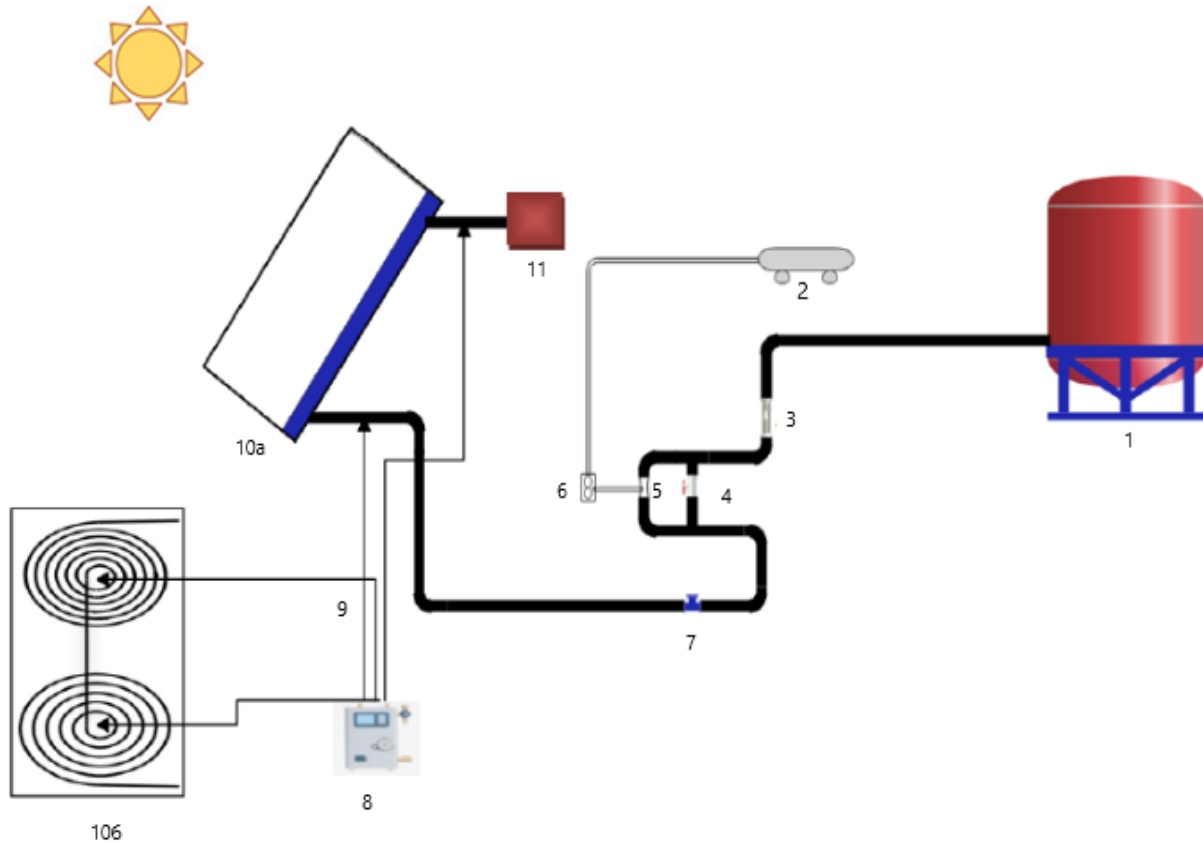


Рис. 10. Схема експериментальної установки: 1 – бак, 2 – повітряний компресор, 3 – витратомір води, 4 – клапан, 5 – пристрій Вентурі, 6 – витратомір повітря, 7 – зворотний клапан, 8 – реєстратор температури, 9 – термопара, 10 – сонячний колектор води, 11 – бак для зберігання [16]

Fig. 10. Schematic diagram of the experimental rig: 1 – tank, 2 – air compressor, 3 – wter flowmeter, 4 – valve, 5 – venturi, 6 – air flowmeter, 7 – check valve, 8 – temperature recorder, 9 – thermocouple, 10 – solar water collector, 11 – storage tank [16]

Сонячний колектор досліджувався у Бабіль, Ірак, довгота становила 44,4 E і широта – 32,4 N у найкращих експериментальних умовах провінції протягом перших місяців року. Сонячний колектор був нахилений під кутом 45° і прийнятий як відповідний стандартний кут відповідно до часу експериментальної роботи.

Основною метою цього дослідження було підвищення ефективності сонячного колектора, шляхом використання техніки впорскування повітря в проточну воду в сонячному колекторі, що викликає збільшення турбулентності руху води всередині труб. Пристрій Вентурі використовувався для введення повітря всередину трубок для змішування з водою, а потім стікання разом у трубку

сонячного колектора. Вигляд пристрою Вентурі наведено на рис. 11.

На рис. 12 наведено зміну різниці температур з часом для різної швидкості потоку води та постійної швидкості потоку бульбашок повітря. Збільшення витрати води зменшує різницю температур. Усі значення різниці температур досягли максимального значення о 2:00 дня. Максимальна різниця температур становила 36,1 °C при швидкості потоку води та бульбашок повітря 1 л/хв та 0,3 л/хв відповідно, тоді як максимальна різниця температур становила 12,5 °C для швидкості потоку води та повітряних бульбашок 1 л/хв та 0,3 л/хв відповідно, як наведено на рис. 13.



Рис. 11. Вигляд пристрою Вентурі [16]

Fig. 11. Appearance of the Venturi device [16]

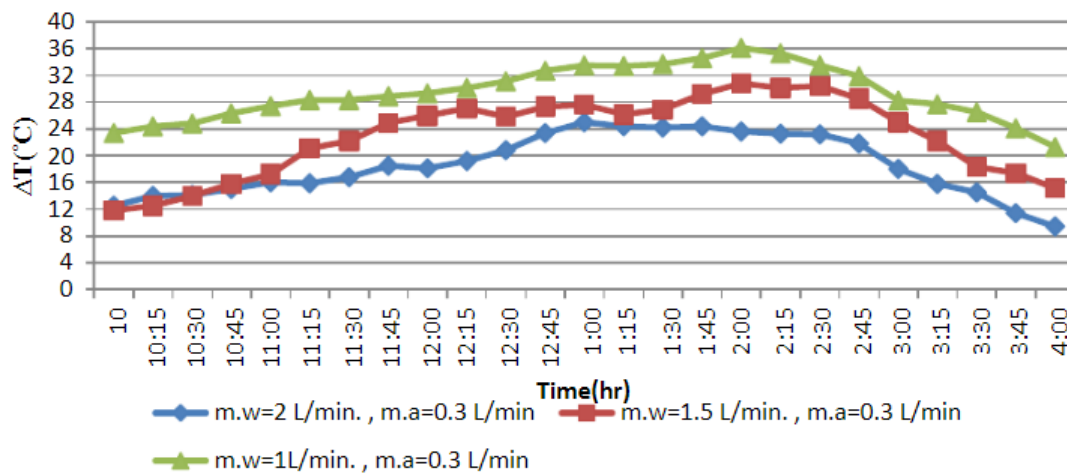


Рис. 12. Різниця температур із часом для закритої системи при різній швидкості потоку води та постійній швидкості потоку повітряних бульбашок [16]

Fig. 12. Temperature difference with time for the closed system at different water flow rate and constant air bubble flow rate [16]

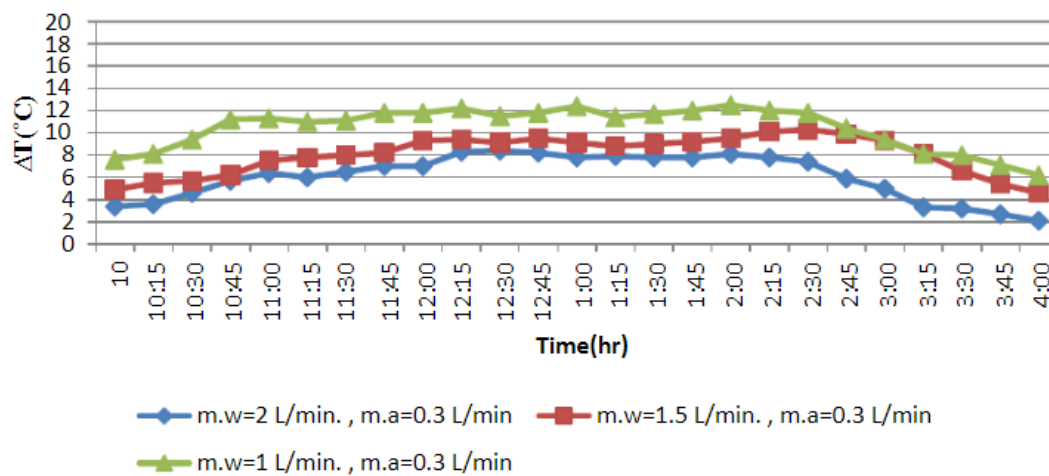


Рис. 13. Різниця температур із часом для закритої системи при різній швидкості потоку води та постійній швидкості потоку повітряних бульбашок [16]

Fig. 13. Temperature difference with time for the opened system at different water flow rate and constant air bubble flow rate [16]

Після аналізу всіх вищеописаних методів, спрямованих на інтенсифікацію теплообміну в сонячному колекторі, між теплообмінником та рідиною-теплоносієм, задля його більш ефективної роботи, постає важливість порівняння цих самих методів між собою, з метою виявлення найефективнішого. Задля порівняння методів, викладених вище, була складена таблиця, що окреслює ключові переваги та недоліки кожного.

Перетворення поглинальної панелі на нагрівальний елемент потенційно спрощує конструкцію колектора та знижує витрати на його розробку, оскільки витрачається менше матеріалів на збірку нагрівального елемента. Крім того, використання тонких мідних пластин може забезпечити хорошу теплопровідність. Однак слід зазначити обмежену універсальність у регулюванні вихідної температури, оскільки мідь може бути не найбільш рентабельним або ефективним матеріалом для передачі теплоти порівняно з новими матеріалами, такими як графен або вуглецеві нанотрубки, що становлять труднощі щодо інтеграції.

Інтеграція нанофлюїдів для покращеного теплообміну може виявитись потенційно вигідним рішенням, оскільки вони пропонують значно покращену теплопровідність у порівнянні з традиційними рідинами для передачі тепла, що сприяє ефективнішому теплообміну. Проте вартість виробництва нанофлюїдів може бути вищою порівняно зі звичайними рідинами. Крім того, питання щодо хімічної стабільності та довговічності нанофлюїдів у практичних застосуваннях залишається відкритим.

Вбудовування скручених стрічок у труби сонячних колекторів має ряд переваг. По-перше, структури зі скрученими стрічками можуть викликати турбулентність у потоці, підвищуючи коефіцієнти теплопередачі. Різні типи скручених стрічок пропонують різний ступінь посилення турбулентності, забезпечуючи гнучкість у реалізації процесу теплопередачі. По-друге, завдяки їхній закрученій формі збільшується ефективна площа поверхні, доступна для теплопередачі в колекторі. Звивиста геометрія стрічки створює додаткову шорсткість поверхні, що покращує тепловіддачу за рахунок збільшення коефіцієнтів конвективної тепловіддачі. Однак складність конструкції та процесу виробництва може бути причиною збільшених витрат. Крім того, ефективність структур з крученої стрічки може змінюватися залежно від таких факторів, як швидкість потоку та властивості рідини.

Модифікація внутрішньої структури вакуумних трубчастих колекторів завдяки введенню скруберів з нержавіючої сталі збільшує площу теплопровідної поверхні,

потенційно підвищуючи ефективність теплопередачі. Окрім цього, використання скруберів з нержавіючої сталі може підвищити довговічність колекторних трубок завдяки підвищенню їхньої стійкості до корозії. Але не слід нехтувати тим, що процес модифікації може вимагати додаткових етапів виробництва та витрат. Також забезпечення належного вирівнювання та інтеграції скруберів може становити труднощі, оскільки існує ризик завдати шкоди вакуумному ущільненню.

Технологія вдування бульбашок повітря через потік води виявилась не менш успішною у підвищенні продуктивності сонячного колектора завдяки інтенсифікації теплообміну. Введення повітряних бульбашок змінює динаміку рідини всередині колектора, сприяючи кращому змішуванню та розподілу потоку. Це може допомогти зменшити втрати тиску та організувати частку потоку, що сприятиме ефективнішій передачі теплоти по всій колекторній системі. Крім того, наявність бульбашок повітря може зменшити загальну масову швидкість потоку, необхідну для досягнення бажаної швидкості теплопередачі, що приводить до потенційної економії енергії.

Висновки

Внаслідок проведеного аналізу та порівняння методів інтенсифікації теплообміну в сонячних колекторах з вільним режимом циркуляції теплоносія встановлено, що продуктивність сонячних колекторів може бути значно підвищена за допомогою цілеспрямованого вибору та застосування цих методів. Так, наприклад, конверсія поглинальних панелей використовує існуючу інфраструктуру, але може мати обмеження в ефективності. Використання нанофлюїдів забезпечує значне підвищення теплопровідності, але є проблеми з ціною та стабільністю складу в базовій рідині. Інтеграція крученої стрічки та модифікація вакуумної трубки пропонує від середнього до високого рівня підвищення продуктивності, але пов'язана з помірною складністю впровадження та збільшенням вартості. Бульбашки повітря, які вводяться в потік рідини-теплообмінника, викликають турбулентність, сприяють конвективній теплопередачі та покращують теплові характеристики, однак існує ризик виникнення коливань швидкості потоку та градієнта температури, що може негативно вплинути на продуктивність і надійність системи. Порівняльний аналіз показав, що кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, що мають бути враховані під час проектування системи. У загальному підсумку інтенсифікація теплообміну в сонячних колекторах вимагає комплексного підходу, який враховує специфічні умови експлуатації та цілі використання.

Таблиця. Порівняння методів інтенсифікації теплообміну в сонячних колекторах

Table. Generalizing comparison of methods of heat exchange intensification in solar collectors

Аспект покращення	Конверсія абсорбуючої панелі	Нанофлюїди	Скручені стрічки	Сталеві скрубери	Впроскування повітряних бульбашок
Підвищення теплопровідності	Низьке, покладається на існуючу конструкцію	Забезпечує значне підвищення. Наночастинки, дисперговані в базовій рідині, ефективно збільшують теплопровідність	Помірне або високе підвищення теплопровідності через збільшення турбулентності та конвективного теплообміну	Від середнього до високого підвищення теплопровідності. Використовує структурні модифікації для підвищення ефективності теплопередачі	Помірне покращення за рахунок посиленого конвективного теплообміну
Складність інтеграції	Відносно низька складність, оскільки використовується існуюча інфраструктура	Помірна складність у підготовці та обслуговуванні. Вимагає ретельного відбору наночастинок і стабільної дисперсії в базовій рідині	Середня складність. Інтеграція елементів крученої стрічки вимагає модифікації конструкції колектора.	Середня складність. Можуть знадобитися структурні зміни та інтеграція додаткових компонентів	Середня складність, оскільки вимагає додаткового обладнання для створення бульбашок
Вартість	Зазвичай низька вартість, оскільки використовуються існуючі матеріали	Від помірної до високої вартості через ціну наночастинок і потенційних добавок для підвищення стабільності	Від помірної до високої вартості інтеграції та обслуговування елементів з крученої стрічки	Середня або висока вартість модифікацій і потенційних додаткових компонентів	Помірна вартість додаткового обладнання та обслуговування
Сумісність	Сумісність може відрізнитися залежно від оригінального дизайну колектора	Універсальна сумісність з різними матеріалами, але стабільність з різними композиціями рідин може відрізнитися	Універсальна сумісність з колекторами різних конструкцій і матеріалів	Сумісність може бути обмежена можливістю модифікації конструкції вакуумної трубки	Сумісність може бути обмежена системними вимогами
Потенційне підвищення продуктивності	Пропонує помірне підвищення продуктивності на основі існуючого дизайну	Забезпечує високий потенціал для підвищення продуктивності завдяки значному підвищенню теплопровідності	Пропонує високий потенціал для підвищення продуктивності завдяки сприянню турбулентності та конвективному теплообміну	Пропонує високий потенціал для підвищення продуктивності за рахунок підвищення ефективності теплопередачі за допомогою структурних модифікацій	Пропонує помірне покращення, сприяючи конвективному теплообміну

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Lorand Szabo. "The history of using solar energy". The 7th international conference on modern power systems (MPS2017).
2. Giovanni Tanda. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00414-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00414-9)
3. Norton, Brian (2013-10-11). *Harnessing solar heat*. Dordrecht: Springer. ISBN 978-94-007-7275-5. OCLC 862228449
4. Chenyuan Diao. "Solar Heating industry in china and Sweden", university of Gavle, 2014.
5. Soteris A. Kalogirou. "Solar Energy Engineering", Second Edition. ISBN 13:978-0-12-397270-5, 2014.
6. Graebel W. P. "Advanced fluid mechanics". ISBN 978-0-12-370885-4, 2007
7. John A. Duffie, William A. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes", Fourth Edition. ISBN 978-0-470-87366-3, 2013.
8. Honeyborne, Riaan. "Flat plate versus Evacuated tube solar collectors" (PDF). Go Green Heat Solutions. 2009.
9. Moss, R. W.; Henshall, P.; Arya, F.; Shire, G. S. F.; Hyde, T.; Eames. "Performance and operational effectiveness of evacuated flat plate solar collectors compared with conventional thermal, PVT and PV panels". *Applied Energy*. 2018. 216: 588–601.
10. Pirozhnikova, A & Govorunov, M & Pirozhnikova, T & Muro, G. (2019). Heat exchange process intensification in solar collectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 698. 055027. 10.1088/1757-899X/698/5/055027.
11. Smaisim, Ghassan & AbdulHussein, Widad & Abed, Azher. (2022). Enhancement of heat transfer from solar thermal collector using nanofluid. *Open Engineering*. 12. 968-976. 10.1515/eng-2022-0337.
12. Sarafraz, M. M.; Tlili, I.; Baseer, M.A.; Safaei, M.R. Potential of Solar Collectors for Clean Thermal Energy Production in Smart Cities Using Nanofluids: Experimental Assessment and Efficiency Improvement. *Appl. Sci.* 2019,9, 1877.
13. Ameen, Braa & Al-hadithi, Mustafa. (2015). Heat Transfer Enhancement of Flat Plate Solar Collectors for Water Heating in Iraq Climatic Conditions. <http://www.iasj.net>. 18. 259-272.
14. Supankanok, Rasa & Sriwong, Sukanpirom & Ponpo, Phisan & Wu, Wei & Chandra-Ambhorn, Walairat & Anantpinijwatna, Amata. (2021). Modification of a Solar Thermal Collector to Promote Heat Transfer inside an Evacuated Tube Solar Thermal Absorber. *Applied Sciences*. 11. 4100. 10.3390/app11094100.
15. Ma, L.; Lu, Z.; Zhang, J.; Liang, R. Thermal Performance Analysis of the Glass Evacuated Tube Solar Collector with U-Tube. *Build. Environ.* 2010,45, 1959–1967.
16. Abbas, Sarah & Abdul Redha, Zeina & Rashid, Farhan. (2023). Thermal Performance of Flat Plate Solar Water Collector Using Air Bubble Injection. *AIP Conference Proceedings*. 2651. 050019-1. 10.1063/5.0133663.
17. Duffy J. A., Beckman W. A. 2013 *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition.
18. S. Eiamsa, C. Thianpong and P. Eiamsa. (2010). Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
19. Abd-Elhady, M. S.; Nasreldin, M.; Elsheikh, M. N. Improving the Performance of Evacuated Tube Heat Pipe Collectors Using Oil and Foamed Metals. *Ain Shams Eng. J.* 2018, 9, 2683–2689.
20. Sarafraz M.; Tlili I.; Baseer M.A.; Safaei M.R. 2019 Potential of Solar Collectors for Clean Thermal Energy Production in Smart Cities Using Nanofluids: Experimental Assessment and Efficiency Improvement.