

УДК 620.92

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.18](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.18)**INVESTIGATION OF THE OPERATING EFFICIENCY OF AN AIR SOLAR COLLECTOR WITH DIFFERENT TYPES OF TRANSPARENT COVERING****ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПОВІТРЯНОГО
СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРОЗОРОГО ПОКРИТТЯ**

Dmytro M. Yerokhin
erokhin-dima@ukr.net
ORCID: 0009-0001-7302-8245

Д. М. Єрохін,
аспірант

Odesa National University of Technology, Odesa

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Abstract. The paper addresses the issues related to air solar collectors that enable the direct use of solar energy for air heating in hybrid heat supply systems combining several heat sources based on different operating principles. Air solar collectors within hybrid heat supply systems perform an important function by reducing the load on the primary heat source and increasing overall energy efficiency. It is demonstrated that one of the key elements significantly affecting the thermal performance of a collector is the transparent cover, which determines the level of solar radiation transmittance and the magnitude of heat losses to the environment. A concept of using polymer materials is presented, which involves the partial or complete replacement of traditional materials with polymers that provide acceptable optical and thermal characteristics at substantially lower cost, weight, and manufacturing energy intensity. The paper describes the design features of a solar collector intended for studying the efficiency of various types of transparent covers, as well as the results of experimental investigations conducted at different levels of total solar radiation intensity. The aim of the study is an experimental investigation of the influence of the type of polymer cover of an air solar collector on its thermal and operational characteristics in order to develop low-cost and energy-efficient solar thermal installations. The scientific novelty of the research lies in the comparative evaluation of the energy performance of transparent covers obtained through experimental studies of the transmittance of different types of transparent coverings and the efficiency coefficients of an air solar collector. The selection of cover materials was based on cost and availability criteria and included high-quality 3 mm thick window glass, 4 mm thick transparent cellular polycarbonate, and 2.5 mm thick textured transparent polystyrene. It was found that the use of a cover with a specific matte surface increases the efficiency of the solar collector under conditions with a significant proportion of diffuse solar radiation. The practical significance of the study consists in the proposed technical solutions for manufacturing efficient air solar collectors and the obtained dataset on transmittance and efficiency as functions of solar radiation intensity and cover type.

Key words: hybrid heat supply systems; energy engineering; experiment; solar collector efficiency; polymer materials; absorber.

Анотація. Розглядається проблематика повітряних сонячних колекторів, що дозволяють безпосередньо використовувати сонячну енергію для нагрівання повітря для гібридних системах теплопостачання, в яких поєднується декілька джерел теплової енергії з різними принципами роботи. Сонячні повітряні колектори в складі гібридних систем теплопостачання виконують важливу функцію, а саме зменшують навантаження на основне джерело тепла та підвищують загальну енергоефективність. Доведено, що одним із ключових елементів, що істотно впливає на теплотехнічні характеристики колектора, є прозоре покриття, яке визначає рівень пропускання сонячного випромінювання та величину теплових втрат у навколишнє середовище. Наведена концепція використання полімерних матеріалів, яка полягає у частковій або повній заміні традиційних матеріалів полімерними, які забезпечують прийнятні оптичні й теплотехнічні характеристики за значно нижчої вартості, маси та енергомісткості виробництва. Наведені особливості виготовлення сонячного колектора, призначеного для дослідження ефективності різних типів прозорого покриття та результати експериментальних досліджень при різних значеннях загальної інтенсивності сонячного випромінювання. *Метою роботи є експериментальне дослідження впливу типу полімерного покриття сонячного повітряного колектору на теплотехнічні та експлуатаційні характеристики колекторів для створення дешевших і ефективних за енергетичними показниками сонячних теплових установок. Наукова новизна* проведеного дослідження полягає в порівняльній оцінці за енергетичними показниками якості прозорих покриттів, що отримано при експериментальному дослідженню

пропускної спроможності різних типів прозорого покриття та коефіцієнтів ефективності повітряного сонячного колектора, при чому вибір матеріалів для покриттів здійснювався за критерієм вартості та доступності: високоякісне віконне скло товщиною 3 мм, прозорий сотовий полікарбонат товщиною 4 мм та текстурований прозорий полістирол товщиною 2,5 мм. Визначено, що використання покриття зі специфічною матовою поверхнею в умовах значної долі розсіяного сонячного випромінювання підвищує ефективність роботи сонячного колектора. *Практична значимість* полягає у запропонованих технічних рішеннях стосовно виготовлення ефективних сонячних повітряних колекторів та отриманому масиву даних щодо пропускної здатності та коефіцієнту корисної дії в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання та типу покриття.

Ключові слова: гібридні системи теплопостачання; енергетика; експеримент; ефективність сонячного колектора; полімерні матеріали; абсорбер.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Сучасні тенденції розвитку енергетики спрямовані на зменшення споживання викопних палив та підвищення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у системах теплопостачання. Одним із перспективних напрямів є застосування гібридних систем теплопостачання, які поєднують декілька джерел теплової енергії з різними принципами роботи. У таких системах важливу роль також відіграють сонячні повітряні колектори, що дозволяють безпосередньо використовувати сонячну енергію для нагрівання повітря. Сонячні повітряні колектори в складі гібридних систем теплопостачання виконують важливу функцію, а саме зменшують навантаження на основне джерело тепла та підвищують загальну енергоефективність. Ефективність роботи сонячного повітряного колектора визначається взаємодією кліматичних умов, конструктивних параметрів та режимів експлуатації. Оптимальний підбір і поєднання цих факторів дозволяє суттєво підвищити енергетичну ефективність систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії. Найбільшу увагу слід приділити визначенню конструктивних параметрів. Одним із ключових елементів, що істотно впливає на теплотехнічні характеристики колектора, є прозоре покриття, яке визначає рівень пропускання сонячного випромінювання та величину теплових втрат у навколишнє середовище.

Незважаючи на наявність численних досліджень у галузі сонячної енергетики, питання кількісної оцінки впливу типу прозорого покриття на ефективність роботи повітряного сонячного колектора залишається недостатньо висвітленим, особливо з урахуванням реальних кліматичних умов експлуатації. Рішення цієї проблеми можливо шляхом проведення експериментальних досліджень на сонячному повітряному колекторі в вигляді пілотної установки з різними типами прозорого покриття.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Традиційні системи на викопному паливі викидають токсичні речовини в атмосферу, тому актуальним є використання продуктів, які не спричиняють негативного впливу на навколишнє середовище та мають тривалий термін служби [2, 3]. Повітряний сонячний

колектор є поширеним пристроєм, що використовується для опалення приміщень, сушіння сільськогосподарських культур тощо [3]. Одним із методів підвищення впливу та продуктивності сонячних систем повітряного опалення є реалізація гібридних систем, які пропонують ряд переваг щодо нагрівання повітря в приміщеннях, нагрівання води та вентиляції приміщень. У гібридних системах теплопостачання сонячні колектори зазвичай виконують функцію додаткового або допоміжного джерела тепла, зменшуючи навантаження на основні теплогенеруючі установки. Їх використання є доцільним у поєднанні з такими джерелами енергії, як теплові насоси [4], твердопаливні або біомасові котли [5]; електричні нагрівальні системи, живлені від фотоелектричних панелей [6]; системи вентиляції з рекуперацією тепла [7]. Сонячний повітряний колектор є пристроєм, у якому сонячне випромінювання поглинається абсорбуючою поверхнею та передається повітрю, що проходить через колектор. Основними перевагами таких колекторів є простота конструкції, відсутність ризику замерзання теплоносія та низькі експлуатаційні витрати.

Поєднання сонячних повітряних колекторів із тепловими насосами дозволяє підвищити загальну ефективність системи. Попередній підігрів повітря, що надходить до випарника теплового насоса, сприяє збільшенню коефіцієнта перетворення (COP) та зниженню споживання електричної енергії [4].

У системах з твердопаливними або біомасовими котлами сонячні повітряні колектори забезпечують часткове покриття теплового навантаження в денний час та в періоди міжсезоння [5]. Це дозволяє скоротити витрати палива, зменшити кількість пусків котла та підвищити довговічність обладнання.

Перспективним напрямом є використання сонячних повітряних колекторів у складі вентиляційних систем з рекуперацією тепла. У цьому випадку колектор здійснює попередній нагрів припливного повітря, що знижує теплові втрати та підвищує комфортні умови в приміщеннях. Такий підхід є особливо ефективним для енергоефективних та пасивних будівель. Комбіновані плоскі сонячні колектори для нагріву води та повітря можуть зменшити витрати на енергію, пов'язану з опаленням води та приміщень, при мінімальному монтажі. Результати [7] показують,

що на енергетичні характеристики колектора значно впливають сонячне випромінювання та масова витрата води та повітря. Пікова енергетична та ексергетична ефективність інтегрованого колектора-акумулятора на 88,8% та 3,5% відповідно вища, ніж у колектора без теплового акумулювання при витраті води 0,025 кг/с та масовій витраті повітря 0,0132 кг/с. Загальний коефіцієнт втрат тепла інтегрованого колектора-акумулятора на 4,2% нижчий при вищій витраті, ніж без теплового акумулювання.

До основних переваг використання сонячних повітряних колекторів у гібридних системах теплопостачання належать: збільшення частки відновлюваної енергії в енергобалансі, зменшення експлуатаційних витрат;

підвищення енергонезалежності об'єкта, зниження викидів парникових газів. Водночас слід враховувати залежність ефективності колекторів від погодних умов та обмежені можливості акумулювання теплової енергії, що потребує застосування додаткових засобів теплового накопичення або оптимального керування режимами роботи системи.

Особу увагу слід приділяти питанню зменшення маси та собівартості сонячного колектору. Концепція використання полімерних матеріалів полягає у частковій або повній заміні традиційних матеріалів (мінерального скла, міді, алюмінію) полімерними матеріалами, які забезпечують прийнятні оптичні й теплотехнічні характеристики за значно нижчої вартості, маси та енергомісткості виробництва. Ідея виготовлення дешевших та легших сонячних колекторів (СК) з використанням полімерних матеріалів не є новою [8, 9]. Сучасні виробники полімерних матеріалів виробляють сучасні пластмаси, стійкі до ультрафіолетового випромінювання. Ця властивість робить їх придатними для застосування в сонячній енергетиці. Полімерні матеріали також мають меншу вагу, що зменшує матеріалоємність сонячного колектора та їх опорних конструкцій.

Основною ідеєю дослідження [10] було створення плоского полімерного СК з низькою вартістю та високими теплотехнічними характеристиками, що відповідають характеристикам традиційних СК. В результаті порівняльного експериментального дослідження різних сонячних колекторів було визначено, що ефективність полімерного колектора на 8–15% нижча за ефективність традиційного колектора зі скла, проте оцінка життєвого циклу показала переваги застосування полімерних матеріалів у конструкції сонячних колекторів. В [11] розглядається можливість застосування сонячних колекторів, основним структурним елементом яких є стільникові полікарбонатні плити для гарячого водопостачання та опалення будівель.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу типу полімерного покриття сонячного

повітряного колектору на теплотехнічні та експлуатаційні характеристики колекторів для створення дешевших і ефективних за енергетичними показниками сонячних теплових установок.

Об'єктом дослідження є сонячний тепловий колектор як елемент системи сонячного теплозабезпечення.

Предметом дослідження є теплотехнічні, оптичні та експлуатаційні характеристики сонячного колектора з використанням полімерних матеріалів, зокрема прозорих полімерних покриттів і полімерних теплообмінних елементів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Монтаж експериментальної установки

Потреба у створенні експериментальної установки для дослідження сонячних повітряних колекторів пов'язана з необхідністю підтвердження ефективності використання рішень стосовно кількості повітряних каналів, способу розташування плоского абсорбера, вибору типу абсорбера, вибору прозорого покриття, вибору типу ізоляції та інші важливі для практики питання. Для порівняльного аналізу в дослідницьких експериментальних установках в галузі сонячної енергетики використовують дві або більше альтернативні конструкції, які відрізняються лише одним з елементів, вплив якого потрібно вивчити. Такий підхід обумовлений тим, що умови сонячного випромінювання змінні з часом і сильно залежать від стану атмосфери, що не дає можливості точного їх відтворення. Тому альтернативні рішення повинні проходити випробування одночасно в однакових умовах.

Виходячи з цього в проекті експериментальної установки передбачено спорудження двох однакових повітряних каналів, в яких розташований абсорбер, які мають однакове прозоре покриття і які мають достатню однакову теплоізоляцію. Повітря в каналах рухається зверху вниз під дією однакових вентиляторів. Така конструкція дозволяє міняти розташування абсорберів та їх тип, а також проводити порівняння різних видів прозорого покриття.

Установка має прямокутну основу з рійок перетином 40x20 мм, із зовнішніми розмірами 2000x660 мм для задньої стінки та передньої стінки. Кути рам підсилюються металевими кутовими елементами і з'єднуються в каркас установки чотирма вертикальними стійками довжиною 250 мм.

Корпус теплоізований листами екструзивного пінополістиролу ЕКОПЛИТ 1180x580x40. Два абсорбери виготовлені з листів оцинкованої сталі довжиною 1500 мм. Поверхні абсорберів покриті матовою чорною фарбою ACRYL RAL 9005M JET BLACK MATT для покращення поглинаючої здатності. Монтаж абсорберів в каналах проводиться на рівних відстанях від верхнього і нижнього країв корпусу в залежності від задачі порівняльного дослідження чорною або нефарбованою стороною до прозорого

покриття. Таким чином, отримано чотири варіанти для порівняльних експериментів. Основним варіантом монтажу є варіант «Чорний-Чорний», при якому відбувається однобічне або двобічне омивання абсорберу повітрям.

Прозоре покриття із сотового полікарбонату Onduclair PCMW 4x1050x2000 мм встановлено над абсорберами, залишаючи в верхній частині корпусу отвір для забору повітря. В нижній частині змонтована панель з ламінованої ДВП, на якій розміщується два вентилятори BUB0512L 40x40 та блок живлення Compact IP20 (рис. 1).

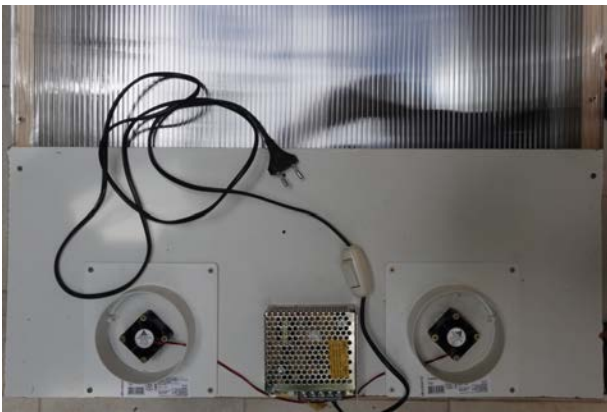


Рис. 1. Встановлення прозорого покриття і електричної системи

Остаточний вигляд експериментальної установки з каналами для повітря довжиною 500 мм з пластикових труб Plastivent 1010/1 наведений на рис. 2.



Рис. 2. Експериментальна установка після остаточного монтажу

Випробування експериментальної установки

Після остаточного монтажу установки були проведені випробування її дієздатності. Після

встановлення установки у вертикальному положенні з орієнтацією на Сонце були підключені вентилятори для створення циркуляції повітря в каналах. Швидкість потоку повітря на виході з установки визначалась за допомогою анемометра HoldPeak HP-866B/ D. В обох каналах вона встановила 1,194 м/с.

Потужність сонячного випромінювання на 1 м² вертикальної площадки і площадки, перпендикулярної до сонячних променів, під час випробувань вимірювали за допомогою пірметра SolData Instruments Hand Pyranometer 4890.20.

Вимірювання температури навколишнього середовища, на виході з одноканального та двоканального сонячного підігрівачів здійснювали за допомогою цифрового термометру опору. За результатами випробувань зафіксовано нагрів повітря в одноканальному підігрівачі на 7,9 °С, в двоканальному підігрівачі на 8,9 °С. Це свідчить про більшу ефективність двоканальної системи.

Створена експериментальна установка для дослідження ефективності сонячних підігрівачів повітря є працездатною і використовувалась для проведення експериментів.

Дослідження впливу прозорого покриття на ефективність роботи сонячного повітряного колектора

Матеріали, з яких виготовляються прозорі покриття для сонячних колекторів, мають задовольняти цілий низці вимог: висока пропускна та низька відзеркалююча спроможність, низьке поглинання випромінювання, механічна міцність, термічна стійкість, стійкість до впливу навколишнього середовища (пил, атмосферні опади та ін.), мінімальна вартість.

Виходячи з таких вимог, найбільш поширеними матеріалами є різні види скла та прозорі листи з полімерних матеріалів (полікарбонат, поліпропілен та ін.).

Для проведення експериментальних досліджень впливу прозорого покриття в роботі були використані три види матеріалів, які були доступні за ціною: високоякісне віконне скло товщиною 3 мм, прозорий сотовий полікарбонат товщиною 4 мм та текстурований прозорий полістирол товщиною 2,5 мм. Результати експериментального дослідження пропускної спроможності різних типів прозорого покриття та коефіцієнтів ефективності повітряного сонячного колектора наведені в таблиці 1. Номер експерименту відповідав номеру дня, за яким проводились дослідження.

ОБГОВОРЕННЯ

ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз результатів експериментів показав особливості у функціонуванні прозорого покриття в залежності від матеріалу. Так, для віконного скла пропускна спроможність майже не змінюється в залежності від співвідношення прямої і розсіяної радіації, зберігаючись на рівні 0,79-0,78 пропускної спроможності.

Результати для полікарбонату погіршуються разом із погодою: більша доля розсіяного випромінювання

Таблиця 1. Пропускна спроможність прозорого покриття та коефіцієнт ефективності повітряного сонячного колектора за результатами експериментів

Тип прозорого покриття	№ експерименту	Загальна інтенсивність сонячного випромінювання до покриття, Вт/м ²	Розсіяне випромінювання, Вт/м ²	Загальна інтенсивність сонячного випромінювання після покриття, Вт/м ²	Пропускна спроможність	ККД колектора
Полістирол прозорий текстурований 2,5 мм, TOMO Design	1	1080	124	832	0,77	0,72
	2	690	256	545	0,79	0,74
	3	542	302	439	0,79	0,75
Скло віконне 3 мм	1	1074	129	848	0,79	0,74
	2	690	253	538	0,78	0,73
	3	568	321	443	0,78	0,73
Полікарбонат сотовий прозорий, Onduclair PCMW	1	1080	122	842	0,78	0,73
	2	688	255	530	0,77	0,72
	3	556	318	411	0,74	0,69

призводить до чутливої зміни у пропускній спроможності від 0,78 у ясні дні до 0,74 у помірково похмурі дні.

Звертає на себе увагу факт зростання пропускної спроможності текстурованого прозорого листа полістиролу у відповідності до зростання долі розсіяного випромінювання у сонячній радіації з 0,74 до 0,81. Відповідно до зовнішнього вигляду лист, мав одну поліровану поверхню, а друга була текстурована мікровізерунками так, щоб виглядати матовою. Матова поверхня сприяла проникненню світла у зону абсорбера сонячного колектора. Це явище потребує подальшого дослідження, зокрема, порівняння структурованого полістиролу матеріалом тієї ж фірми з глянсовими поверхнями або зі структурованими поверхнями з іншим видом мікровізерунка. В подальшому необхідно створення нової конструкції повітряного колектора, яка б дозволяла паралельний монтаж двох різних прозорих покриттів на два існуючих каналу, або створення ще одного-двох ідентичних повітряних колекторів для забезпечення порівняння ефективності і інших характеристик в однакових умовах випромінювання.

Результати експериментів дозволили визначити, що значення ККД в створеній установці сонячного повітряного колектору змінюється від 0,69 до 0,76 в залежності від прозорого покриття.

ВИСНОВКИ

Застосування сонячних повітряних колекторів у гібридних системах теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії є технічно та економічно доцільним рішенням, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи, знизити споживання традиційних енергоресурсів та сприяють сталому розвитку енергетики.

Загальна інтенсивність сонячного випромінювання після скла майже не змінюються в залежності від співвідношення прямої і розсіяної радіації, зберігаючись на рівні 0,79–0,78 пропускної спроможності. Результати для полікарбонату погіршуються разом із погодою: більша доля розсіяного випромінювання призводить до чутливої зміни у пропускній спроможності від 0,77–0,79 (загальна інтенсивність сонячного випромінювання 1080–1074 Вт/м²) у ясні дні до 0,74 у помірково похмурі дні (загальна інтенсивність сонячного випромінювання 556 Вт/м²).

Пропускна спроможність текстурованого прозорого листа полістиролу Onduclair PCMW зростає у відповідності до зростання долі розсіяного випромінювання у сонячній радіації з 0,74 до 0,81.

Значення ККД в випробуваному сонячному повітряному колекторі змінюється від 0,69 для полікарбонату сотового до 0,76 для полістиролу TOMO Design.

REFERENCES

- [1] Ifrim, V.-C., Milici, L.-D., & Bejenar, C. (2022). Review on solar air heater hybrid systems thermal performances. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1254(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1254/1/012013>.
- [2] Tsilingiridis, G., & Martinopoulos, G. (2010). Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece – energy and environmental benefits–future perspectives. *Renewable Energy*, 35(2), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.001>.
- [3] Saxena, A., Agarwal, N., & Cuce, E. (2020). Thermal performance evaluation of a solar air heater integrated with helical tubes carrying phase change material. *Journal of Energy Storage*, 30, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101406>.
- [4] Buyukzeren, R., & Kahraman, A. (2024). A comparative study on the application of solar thermal collector and photovoltaic combinations to assist an air source heat pump. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13475-z>.
- [5] Yan, Q. H., & Li, N. (2012). Comparative Studies on Solar Combisystem by Different Auxiliary Heat Sources. *Applied Mechanics and Materials*, 178-181, 76–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.178-181.76>
- [6] Roselli, C., Sasso, M., & Tariello, F. (2017). Integration between electric heat pump and PV system to increase self-consumption of an office application. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, 28. <https://doi.org/10.1051/rees/2017038>
- [7] Vengadesan, E., Bharathwaj, D., Sathish Kumar, B., & Senthil, R. (2022). Experimental study on heat storage integrated flat plate solar collector for combined water and air heating in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 119105. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119105>
- [8] Köhl, M., Meir, M. G., Papillon, P., Wallner, G. M., & Saile, S. (2012). *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>
- [9] Raman, R., Mantell, S., Davidson, J., Wu, C., & Jorgensen, G. (2000). A Review of Polymer Materials for Solar Water Heating Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 122(2), 92–100. <https://doi.org/10.1115/1.1288214>.
- [10] Chen, G., Doroshenko, A., Koltun, P., & Shestopalov, K. (2015). Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors. *Solar Energy*, 115, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.021>.
- [11] Piznak, B., Zhelykh, V. (2011). Polimeri soniachni kolektory v systemakh teplopостачання. [Polymer solar collectors in heating systems]. *Heodeziia, arkhitektura ta budivnytstvo: materialy IV Mizhnarodnoi konferentsii molodykh vchenykh GAC-2011, 24–26 lystopada 2011 r., Ukraina, Lviv*, 160–161. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/19390>. [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ifrim, V.-C., Milici, L.-D., & Bejenar, C. (2022). Review on solar air heater hybrid systems thermal performances. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1254(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1254/1/012013>.
- [2] Tsilingiridis, G., & Martinopoulos, G. (2010). Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece – energy and environmental benefits–future perspectives. *Renewable Energy*, 35(2), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.001>.
- [3] Saxena, A., Agarwal, N., & Cuce, E. (2020). Thermal performance evaluation of a solar air heater integrated with helical tubes carrying phase change material. *Journal of Energy Storage*, 30, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101406>.
- [4] Buyukzeren, R., & Kahraman, A. (2024). A comparative study on the application of solar thermal collector and photovoltaic combinations to assist an air source heat pump. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13475-z>.
- [5] Yan, Q. H., & Li, N. (2012). Comparative Studies on Solar Combisystem by Different Auxiliary Heat Sources. *Applied Mechanics and Materials*, 178-181, 76–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.178-181.76>
- [6] Roselli, C., Sasso, M., & Tariello, F. (2017). Integration between electric heat pump and PV system to increase self-consumption of an office application. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, 28. <https://doi.org/10.1051/rees/2017038>
- [7] Vengadesan, E., Bharathwaj, D., Sathish Kumar, B., & Senthil, R. (2022). Experimental study on heat storage integrated flat plate solar collector for combined water and air heating in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 119105. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119105>
- [8] Köhl, M., Meir, M. G., Papillon, P., Wallner, G. M., & Saile, S. (2012). *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>
- [9] Raman, R., Mantell, S., Davidson, J., Wu, C., & Jorgensen, G. (2000). A Review of Polymer Materials for Solar Water Heating Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 122(2), 92–100. <https://doi.org/10.1115/1.1288214>.
- [10] Chen, G., Doroshenko, A., Koltun, P., & Shestopalov, K. (2015). Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors. *Solar Energy*, 115, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.021>.
- [11] Пізнак, Б., Желих, В. (2011). Полімерні сонячні колектори в системах теплопостачання. *Геодезія, архітектура та будівництво: матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених GAC-2011, 24–26 листопада 2011 р., Україна, Львів*, 160–161. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/19390>.

© Єрохін Д. М.

Дата першого надходження статті до видання: 08.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)