

TECHNICAL SCIENCES

INTEGRATED SOLAR COLLECTORS AS AN ENERGY-EFFICIENT SOURCE OF ENERGY

Shapoval S.

Doctor of technical sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vodka R.

Master's degree, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ІНКОРПОРАТИВНІ СОНЯЧНІ КОЛЕКТОРИ, ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ

Шаповал С.П.

Доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна.

Водка Р.С.

Магістр, Національний університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21105840>

Abstract

The paper presents the results of experimental studies and mathematical modeling of combined integrated solar collectors with a triple-oriented absorber and a built-in storage tank. Based on a two-factor design of experiment matrix, the influence of geometric factors and spatial orientation of the unit's faces on its efficiency ratio was determined. The obtained empirical regularities allowed establishing the optimal structural proportions and tilt angles of the solar system components to ensure its maximum daily performance.

Анотація

У статті представлено результати експериментальних досліджень та математичного моделювання комбінованих інкорпоративних сонячних колекторів, конструкція яких передбачає потрібну орієнтацію теплопоглинач та вбудовану ємність для акумуляції тепла. На основі розробленої двофакторної матриці планування експерименту визначено характер впливу геометричних факторів та просторового розміщення граней установки на коефіцієнт її ефективності. Отримані емпіричні закономірності дозволили встановити оптимальні конструктивні пропорції та кути нахилу елементів геліосистеми, що забезпечують її максимальну добову продуктивність.

Keywords: integrated solar collector, combined solar heater, triple orientation.

Ключові слова: інкорпоративний сонячний колектор, комбінований геліонагрівник, потрібна орієнтація.

Показники річного теплового потенціалу сонячного випромінювання в межах України здатні досягати позначки 28 кВт·год/м². Як зазначається в сучасних дослідженнях, «використовуючи високоякісні установки для перероблення сонячного випромінювання у тепло, кожен має можливість покрити до 70 % щорічної потреби в гарячій воді. Для приватних будинків в літній період можлива повна відмова від котельні та перехід до екологічного обладнання» [1, с.38]. Аналіз кліматологічних даних останніх років показує, що інтенсивність прямої та розсіяної сонячної інсоляції в західних та центральних регіонах України має виражений сезонний характер, проте інтегральний річний рівень є цілком достатнім для забезпечення стабільної роботи низькотемпературних геліосистем. Головним стримуючим фактором для масового впровадження класичних плоских колекторів є їхня висока чутливість до кута падіння променів. Протягом дня кут сонячного каміння постійно змінюється, що призводить до значних оптичних втрат через відбиття світла від захисного скла у ранкові та вечірні години.

Розв'язання цієї проблеми шляхом встановлення механічних систем двовісного трекінгу (стеження за сонцем) суттєво здорожує проект, збільшує експлуатаційні витрати на електроенергію для приводів та знижує загальну надійність системи. Тому оптимізація геометрії самого теплопоглинач, яка дозволяє пасивно (без рухомих частин) вловлювати косі промені, є найбільш раціональним та економічно обґрунтованим шляхом розвитку інкорпоративних геліосистем гарячого водопостачання.

На сьогодні розроблено значну кількість модифікацій обладнання та комплексних інженерних рішень для систем геліотермального теплопостачання. Практичне впровадження таких комплексів забезпечує не лише відчутне зниження фінансових витрат, а й зменшує обсяги негативного екологічного навантаження на атмосферу, яке зазвичай утворюється під час спалювання традиційних видів палива для генерації теплоти.

Сучасні системи сонячного теплопостачання складаються із багатьох елементів, тому такі установки є досить дорогими і не знаходять широкого застосування. Важливим є використання комбінованих геліонагрівників, в яких теплопоглинач поєд-

нано із баком-акумулятором. Таке виконання дозволяє значно здешевити систему сонячного теплопостачання. Сучасний стан розвитку геліотермальної інженерії характеризується активним пошуком рішень, які дозволяють мінімізувати питомі металомісткість та вартість обладнання на одиницю генерованої теплової потужності. Традиційні розділені геліосистеми, попри їхню високу оптичну ефективність, мають суттєвий недолік — значну інерційність та високі гідравлічні втрати у з'єднувальних трубопроводах, що з'єднують даховий масив колекторів із внутрішнім баком-акумулятором. На противагу їм, системи класу ICSSWH (Integrated Collector-Storage Solar Water Heater) реалізують концепцію прямого поглинання та акумуляції в одному робочому об'ємі. У світовій практиці дослідження таких систем у єдиному моноблочі (ICSSWH) підтверджують їхню високу перспективність завдяки конструктивній простоті, низькій собівартості та зручності монтажу [2, с.1].

Проте необхідно детальніше проаналізувати конструктивні рішення комбінованих геліонагрівників для отримання максимальної їх ефективності при мінімальній вартості. Перспективним альтернативним підходом є застосування моноблочних комбінованих пристроїв, у структурі яких теплосприймальна поверхня конструктивно об'єднана з ємністю для акумуляції тепла. Таке технічне рішення дає змогу суттєво зменшити капіталовкладення в систему теплопостачання. Дієвим підходом до інтенсифікації роботи плоских інкорпоративних сонячних колекторів під початкової та фінальної фази світлового дня, є їхнє просторове розміщення за принципом потрібної орієнтації. Попередні аналізи та випробування аналогічних комплексів підтвердили здатність підвищувати продуктивність роботи геліосистем, що містять плоскі інкорпоративні сонячні колектори, саме в години з гострим кутом падіння сонячних променів.

Окрім цього, з метою оптимізації процесу вловлювання сонячного випромінювання впродовж усієї доби, в інженерній практиці застосовують абсорбери циліндричної форми. Безпосередню інтеграцію теплопоглинача з баком-акумулятором суттєво спрощує конструктивну структуру установок. Водночас виникає потреба у детальнішому вивченні та аналізі конкретних геометричних і конструктивних параметрів комбінованих

геліонагрівників для досягнення найкращих техніко-економічних показників. Математичне моделювання оптичних процесів у системах із потрібної орієнтацією базується на аналізі векторних характеристик сонячного випромінювання. Сумарний потік інсоляції, що падає на тригранний поглинач у довільний момент часу світлового дня, є суперпозицією трьох складових прямої радіації (для кожної з граней відповідно до їхніх азимутальних кутів) та загальної дифузної (розсіяної) компоненти навколишнього середовища.

Косинусний ефект, який обмежує роботу стандартних плоских геліоприймачів у ранкові (з 6:00 до 10:00) та вечірні (з 16:00 до 20:00) години, мінімізується завдяки тому, що бічні грані потрібної структури орієнтуються під оптимізованим кутом γ відносно центральної осі. Це дозволяє вловлювати сонячні промені під кутами, близькими до нормалі, саме в ті періоди, коли висота сонця над горизонтом є низькою. Крім того, тригранна геометрія створює додатковий ефект внутрішнього перевідбиття променів між суміжними поверхнями абсорбера (ефект оптичної пастки), що знижує загальний інтегральний коефіцієнт відбиття скляного покриття та збільшує частку поглиненої енергії

Поряд із оптимізацією форми, світові тенденції вдосконалення геліосистем вказують на важливу роль інноваційних теплоносіїв; зокрема, використання нанорідин у сонячних колекторах сьогодні вважається одним із вирішальних факторів для суттєвого підвищення генерації теплової енергії [3, с. 1].

Науково-дослідні випробування інкорпоративних сонячних колекторів виконувалися задля визначення їхніх найбільш раціональних та ефективних геометричних пропорцій. Процес експериментальних випробувань базувався на низці прийнятих умов та наукових спрощень: обсяг сонячної радіації, що надходила на геліоколектори, розраховувався у відносних частках від максимально потенційного рівня; обладнання було нерухомо зафіксоване в заздалегідь визначених оптимальних площинах зі стаціонарною (незмінною) орієнтацією; лінійні габарити сонячних колекторів залишалися постійними протягом усього процесу; для результатів проведеного експерименту та подальшої апроксимації даних встановлено довірчу ймовірність на рівні $\alpha = 0,95$.

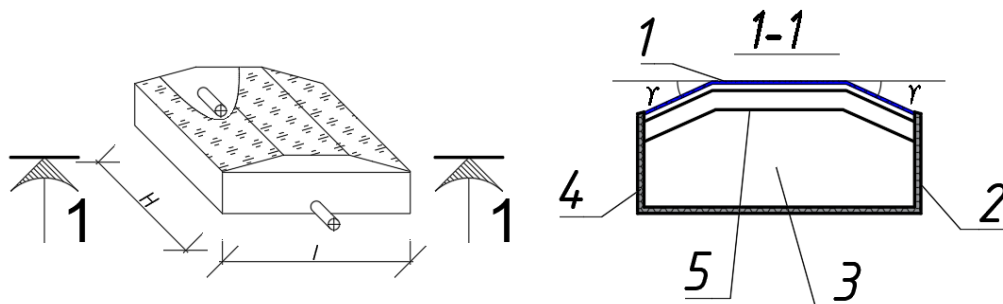


Рис.1. Схема комбінованого геліонагрівника
1. Прозоре покриття; 2. Корпус; 3. Внутрішній об'єм;
4. Теплоізоляція; 5. Перегородка.

Для фіксації інтенсивності сумарного та розсіяного випромінювання застосовували стаціонарний альбедометр 3 x 3, підключений у парі з гальванометром ГСА - 1. Моніторинг температури теплоносія всередині комбінованих геліонагрівників забезпечували термоперетворювачі опору 50М, які функціонували в комплексі з регулятором-вимірювачем типу РТ-0102. Значення температури та швидкості руху зовнішніх повітряних мас визначали за допомогою термоелектроанометра TESTO 405 – V1.

Конструктивні особливості комбінованого геліонагрівника з потрібно-орієнтованим теплопоглиначем та циркулюючою перегородкою наведені на рис. 1. Загальну схему дослідного стенда, що об'єднує 4 комбіновані геліонагрівники з різним виконанням конструкції, представлено на рис. 3.

Математичну модель дослідження побудовано на основі двофакторної матриці планування з урахуванням взаємодії факторів. Роль змінних факторів виконували азимутальний кут нахилу бічних граней γ - X_1 також відношення довжини до висоти за периметром основи геліонагрівника l/h - X_2 .

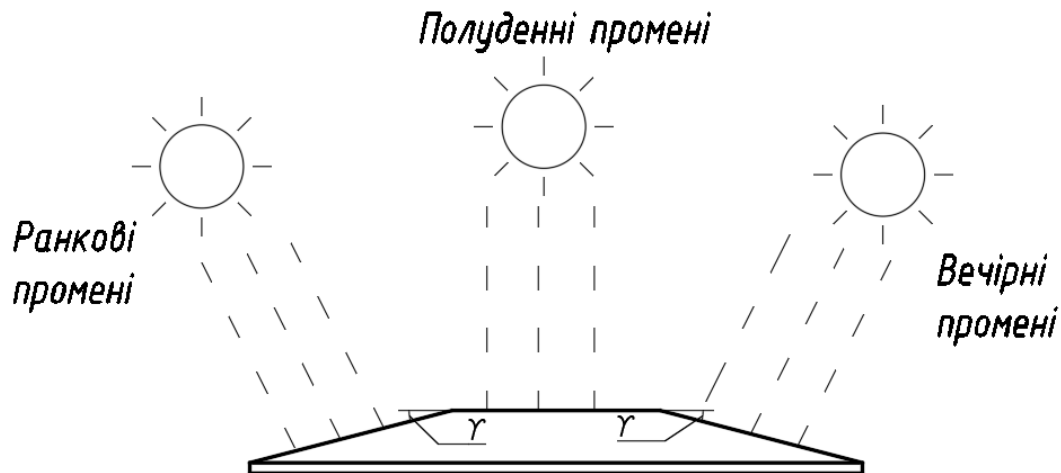


Рис.2. Порівняльна схема роботи плоского та потрійного абсорбера протягом дня, ефективність захоплення сонячних променів у ранкові, полуденні та вечірні години

Таблиця 2.

Рівні факторів та інтервали варіювання

Назва фактора	Кодове позначення	Δx_i		Інтервал варіювання
		-	+	
Азимутальний кут повороту граней геліонагрівника, γ°	X_1	0	15	15
Відношення висоти до довжини, l/h	X_2	0	15	15

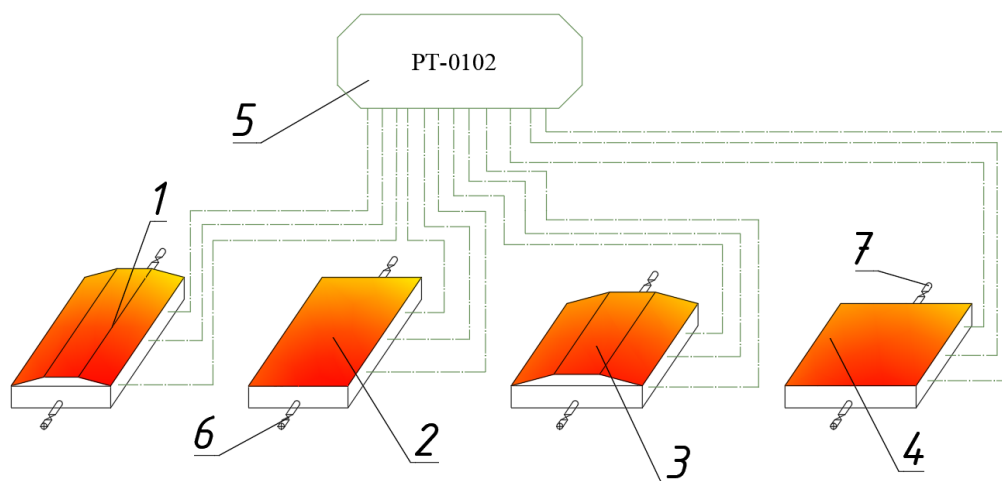


Рис. 3. Схема експериментальної установки:

1. ПОГ з $l/h = 0,5$ та $\gamma=150$; 2. ПГ з $l/h = 0,5$ та $\gamma=00$;
3. ПОГ з $l/h = 1,5$ та $\gamma=150$; 4. ПГ з $l/h = 1,5$ та $\gamma=00$;
5. Вимірювач температури типу РТ-0102; 6. Зливний трубопровід;
7. Трубопровід заливки теплоносія.

Як параметр оптимізації було визначено коефіцієнт ефективності $K_{\text{еф}}$, який відображає ступінь розбіжності між обсягами теплової енергії, згенерованої за добу плоским геліонагрівником (ПГ) та потрійноорієнтованим геліонагрівником (ПОГ).

$$K_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{см}}}{Q_i} \cdot 100, \quad (1)$$

де $Q_{\text{см}}$ – тепла енергія отримана протягом дня від плоского інкорпоративного геліонагрівника ($\gamma=0$ і з $l/h = 1,5$); Q_i – отримана за день тепла енергія від інших варіантів інкорпоративних геліонагрівників (при інших значеннях γ і l/h).

Таблиця 2.

Матриця планування експерименту

№	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$K_{\text{еф}}$
1	+	+	+	+	1,07
2	+	-	+	-	1
3	+	+	-	-	1,16
4	+	-	-	+	1,04

На основі даних таблиці 2 отримується рівняння регресії:

$$K_{\text{еф}} = 1,07 + 0,05x_1 - 0,03x_2 - 0,01x_{12} \quad (2)$$

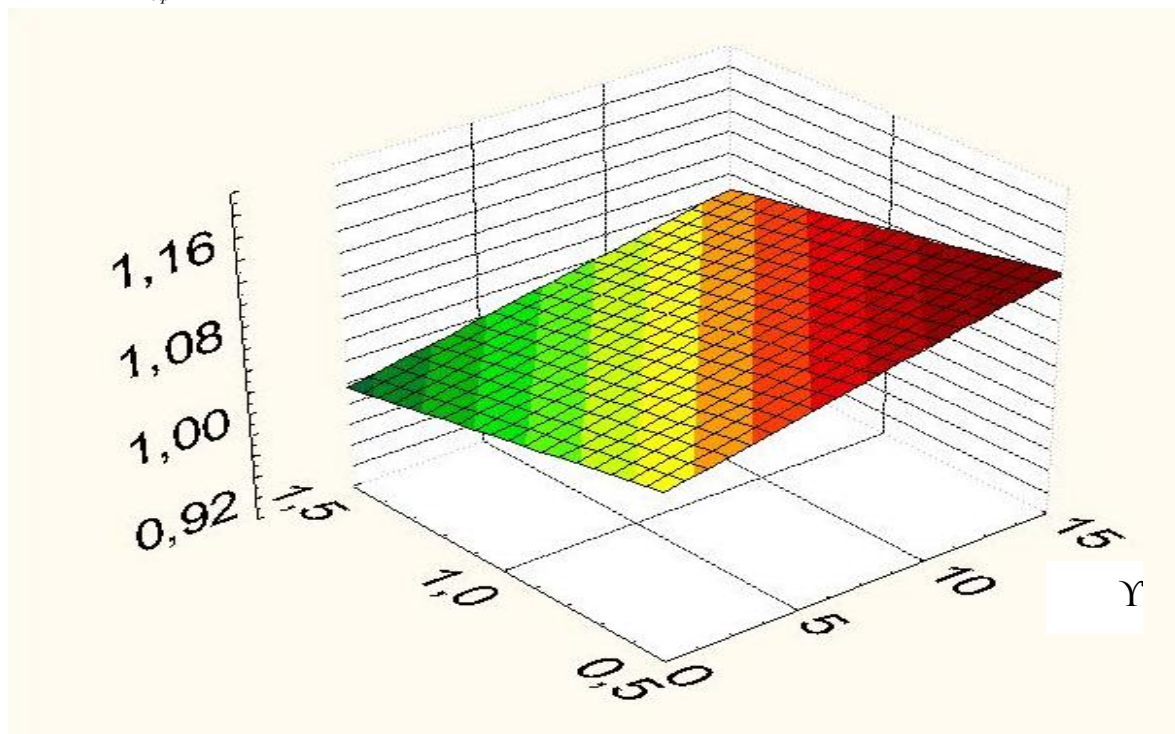


Рис. 4. Результати експериментальних досліджень

З рис. 4. видно, що найефективніше працює протягом дня комбінований геліонагрівник із параметрами $l/h = 0,5$ та $\gamma = 150$.

Методом найменших квадратів отримана емпірична формула:

$$K_{\text{еф}} = 1,085 + 0,0063 \cdot \gamma + 0,065 \cdot l/h \quad (3)$$

Аналіз отриманої математичної моделі (3) показує, що коефіцієнти при керованих факторах γ та l/h мають позитивні знаки, що підтверджує наявність стійкої тенденції до зростання загальної теплопродуктивності при збільшенні просторового розвороту бічних граней у межах досліджуваного діапазону. Статистична оцінка значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента та перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера підтвердили правомірність використання отриманого рівняння з довірчою ймовірністю 95%.

Фізичний механізм максимальної ефективності зразка з параметрами $l/h = 0,5$ та $\gamma = 15^\circ$ (який показав приріст у 16%) пояснюється зміною гідродинамічних режимів у внутрішньому циркуляційному контурі. За такого співвідношення геометричних розмірів висота термосифонного стовпа рідини є найбільшою, що суттєво збільшує швидкість природної конвекції вздовж абсорбера. Як наслідок, інтенсифікується знімання тепла з внутрішньої поверхні металу, знижується середній температурний напір між абсорбером та рідиною, що автоматично веде до зниження радіаційних втрат у навколишнє середовище через заклену поверхню.

Список літератури:

1. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Миронов А. М., Ільченко М. В., Перемот К. В. Розрахунок

надійності застосування сонячних колекторів // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2025. – № 2. – С. 38–52.

2. Recent developments in solar water heaters and solar collectors: A review on experimental and neu-

ral network analyses / R. Naveenkumar, R. Venkateshkumar, V. Mohanavel [et al.] // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – Art. 104394.

3. Review of classical and nonlocal nanofluid models for solar collectors / L. Feng, I. W. Turner, V. V. Anh, F. Liu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 212. – Art. 115382.