МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Оцінка ефективності та надійності використання геліоустановок для теплопостачання промислових та міських споживачів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8/1444
спеціальності 144 – Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)
Д.І. Самсоненко
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____другий (магістерський) рівень_____
Спеціальність __144 Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф._____В.Л. Коваленко
«_____»_____2025__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Самсоненко Дмитро Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1Тема роботи: Оцінка ефективності та надійності використання геліоустановок для теплопостачання промислових та міських споживачів

_____
керівник роботи ____Башлій С.В., к.т.н., доц._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_27_» _02__2025__року №_313 - с_____
Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2025 р._____
1 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом мережевого насоса
2 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Теоретичні основи використання геліоустановок у системах теплопостачання 2) Методика оцінки ефективності та надійності геліоустановок 3) Практична оцінка ефективності та надійності геліоустановок для промислових та міських споживачів
Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _1) Мета, постановка задачі дослідження; 2,3) Класифікація типів сонячних колекторів *4,5)* аналіз діяльності ТОВ «АгроТех Сервіс»*; 6)* моделювання теплової продуктивності геліоустановки 7) Результати моделювання 8) Річний баланс теплової енергії геліосистеми 9) Висновки

2 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Башлій С.В. к.т.н., доц.		
Розділ 2	Башлій С.В. к.т.н., доц.		
Розділ 3	Башлій С.В. к.т.н., доц.		

3 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи використання геліоустановок у системах теплопостачання	30.09.2025	
2	Методика оцінки ефективності та надійності геліоустановок	15.10.2025	
3	Практична оцінка ефективності та надійності геліоустановок для промислових та міських споживачів	25.11.2025	

Студент _____ Д.І. Самсоненко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ С.В.Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В.Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Самсоненко Дмитро Ігорович: Оцінка ефективності та надійності використання геліоустановок для теплопостачання промислових та міських споживачів

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник к.т.н., доц., Башлій С.В. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження ефективності та надійності використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів. Актуальність теми зумовлена необхідністю зниження енергетичної залежності від традиційних паливно-енергетичних ресурсів, підвищення рівня енергоефективності та скорочення шкідливого впливу на навколишнє середовище в умовах сучасних викликів енергетичної безпеки.

У роботі здійснено аналіз сучасного стану розвитку геліоенергетики в Україні та світі, визначено основні тенденції впровадження сонячних теплових систем у комунальній та промисловій сфері. Розглянуто фізичні принципи перетворення сонячної енергії у теплову, наведено класифікацію геліоустановок, охарактеризовано їх конструктивні особливості, режими роботи та системи акумулювання теплової енергії.

У рамках дослідження виконано математичне моделювання процесів теплоутворення в геліоустановці з використанням програмного середовища MATLAB. Побудовано тривимірні графіки залежності теплової продуктивності та коефіцієнта корисної дії від інтенсивності сонячної радіації, температури

теплоносія та температури навколишнього середовища. Отримані результати дозволили наочно проілюструвати вплив основних експлуатаційних параметрів на ефективність роботи геліосистеми, а також дослідити добову та сезонну нерівномірність виробітку теплової енергії.

Окремий розділ роботи присвячено оцінці річної ефективності використання геліосистеми. На основі розрахунків визначено річний баланс теплової енергії, частку покриття теплового навантаження за рахунок сонячної енергії, обсяг заміщення природного газу та відповідну економію паливних ресурсів. Доведено, що використання геліоустановки дозволяє забезпечити значну частину потреб у тепловій енергії в перехідні та літні періоди року.

У роботі також проведено детальний аналіз показників надійності та відмовостійкості обладнання геліосистеми. Визначено коефіцієнт готовності, напрацювання на відмову, середній час простою, а також структуру відмов основних елементів системи. Показано, що найбільш уразливими вузлами є насосне обладнання та елементи автоматики, водночас сонячні колектори характеризуються високою конструктивною надійністю. Обґрунтовано доцільність використання резервування та систем автоматизованого моніторингу для підвищення відмовостійкості геліоустановки.

Значну увагу приділено оцінці економічної ефективності впровадження геліоустановки. Виконано розрахунок капітальних витрат, річної економії коштів на паливі, експлуатаційних витрат, чистого річного економічного ефекту та простого терміну окупності інвестицій. Встановлено, що за умов сучасних тарифів на енергоносії термін окупності геліоустановки є економічно прийнятним, а її впровадження забезпечує стабільний фінансовий результат упродовж усього періоду експлуатації.

Окрім економічного ефекту, у роботі оцінено екологічні переваги використання геліоустановки, зокрема скорочення викидів діоксиду вуглецю,

зменшення антропогенного навантаження на довкілля та підвищення рівня екологічної безпеки теплопостачальних систем.

Отримані результати дослідження підтверджують доцільність та перспективність використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових і міських споживачів, а також можуть бути використані при проєктуванні, модернізації та оптимізації енергетичних об’єктів з використанням відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: геліоустановка, сонячна енергія, сонячна теплоенергетика, теплопостачання, геліосистема, тепловий колектор, коефіцієнт корисної дії, теплова продуктивність, математичне моделювання, MATLAB, акумулювання тепла, теплоносій, сонячна радіація.

ABSTRACT

Samsonenko Dmytro Igorovych: Assessment of the efficiency and reliability of using solar installations for heat supply to industrial and urban consumers Qualification thesis for the degree of Master of Higher Education in specialty 144 – Thermal Power Engineering. Scientific advisor: PhD in Technical Sciences, Associate Professor Bashliy S.V. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebnia. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

The master's thesis presents a comprehensive study of the efficiency and reliability of solar thermal installations used in heat supply systems for industrial and urban consumers. The relevance of the research is determined by the need to reduce energy dependence on conventional fossil fuel resources, increase energy efficiency, and minimize harmful environmental impacts under the current challenges of energy security.

The thesis analyzes the current state of development of solar thermal energy in Ukraine and worldwide and identifies the main trends in the implementation of solar heat supply systems in municipal and industrial sectors. The physical principles of converting solar energy into thermal energy are considered, and the classification of solar thermal installations is presented. Their structural features, operating modes, and thermal energy storage systems are also described.

Within the scope of the study, mathematical modeling of heat generation processes in a solar thermal installation was performed using the MATLAB software environment. Three-dimensional graphs of thermal output and efficiency dependence on solar radiation intensity, heat carrier temperature, and ambient air temperature were constructed. The obtained results made it possible to clearly demonstrate the influence

of the main operating parameters on the efficiency of the solar thermal system, as well as to analyze daily and seasonal irregularities in thermal energy generation.

A separate section of the thesis is devoted to the assessment of the annual efficiency of the solar thermal system. Based on the calculations, the annual thermal energy balance, the share of heat load coverage by solar energy, the volume of natural gas substitution, and the corresponding fuel savings were determined. It was proved that the use of solar thermal installations makes it possible to cover a significant part of the heat demand during transitional and summer periods of the year.

The thesis also includes a detailed analysis of the reliability and fault tolerance indicators of solar thermal system equipment. The availability factor, mean time between failures, average downtime, and the failure structure of the main system components were determined. It was found that pumping equipment and automation elements are the most vulnerable components, while solar collectors are characterized by high structural reliability. The feasibility of applying redundancy and automated monitoring systems to enhance the fault tolerance of solar thermal installations is substantiated.

Special attention is paid to the assessment of the economic efficiency of solar thermal installation implementation. Calculations of capital investments, annual fuel cost savings, operating expenses, net annual economic effect, and simple payback period were performed. It was established that under current energy tariffs, the payback period of solar thermal installations is economically acceptable, and their implementation ensures a stable financial result throughout the entire operational lifetime.

In addition to the economic effect, the environmental benefits of solar thermal installation application were assessed, particularly the reduction of carbon dioxide emissions, mitigation of anthropogenic impact on the environment, and improvement of the ecological safety of heat supply systems.

The obtained research results confirm the feasibility and перспективність (prospects) of using solar thermal installations for heat supply of industrial and urban consumers and may be applied in the design, modernization, and optimization of energy facilities based on renewable energy sources.

Keywords: solar thermal installation, solar energy, solar thermal power engineering, heat supply, solar thermal system, solar collector, efficiency, thermal output, mathematical modeling, MATLAB, thermal energy storage, heat carrier, solar radiation.

ЗМІСТ

Вступ……12
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОУСТАНОВОК У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ……16
1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку геліоенергетики в Україні та світі.16.
1.2. Принципи роботи та класифікація геліоустановок для теплопостачання…20
1.3. Конструктивні особливості сонячних колекторів та геліосистем…….24
1.4. Акумулювання теплової енергії в геліосистемах……29
1.5. Аналіз режимів роботи геліоустановок у промисловому та міському теплопостачанні…….33
1.6. Нормативно-правове забезпечення та стандарти у сфері сонячного теплопостачання……39
2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ГЕЛІОУСТАНОВОК……45
2.1. Основні техніко-економічні показники ефективності геліоустановок……45
2.2. Методи визначення теплової продуктивності сонячних колекторів……47
2.3. Показники надійності геліоустановок та методи їх оцінювання……..51
2.4. Математичне моделювання роботи геліосистем у системах теплопостачання……54
2.4.1 Модель сонячного колектора……..55
2.4.2 Модель акумулюючого бака (теплоакумулятора)…….57
2.4.3 Модель споживача тепла (навантаження)……..58
2.4.4 Модель допоміжного теплогенератора……..59
2.4.5 Модель контролера і гідравліки…….60
2.4.6 Об’єднання підмоделей та результати моделювання……..…….61
2.4.7 Параметричне моделювання та оптимізація……62

2.4.8 Врахування кліматичних даних та орієнтації колекторів…….63
3. ПРАКТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ГЕЛІОУСТАНОВОК ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ТА МІСЬКИХ СПОЖИВАЧІВ..66
3.1. Характеристика об’єкта дослідження та вихідні дані…….66
3.2. Розрахунок теплової продуктивності геліоустановки……..69
3.3. Оцінка річної ефективності використання геліосистеми……76
3.4. Аналіз показників надійності та відмовостійкості обладнання……..80
3.5. Економічна ефективність впровадження геліоустановки……83
ВИСНОВКИ……88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ…….90

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується суттєвими структурними змінами, зумовленими вичерпністю традиційних паливно-енергетичних ресурсів, посиленням екологічних загроз, а також необхідністю забезпечення сталого розвитку економіки. Зростання обсягів споживання енергії в промисловості та житлово-комунальному секторі супроводжується підвищенням навантаження на енергетичні системи, що вимагає впровадження нових технологій виробництва та використання енергії. У цих умовах особливого значення набуває розвиток відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія займає одне з провідних місць завдяки своїй доступності, екологічній чистоті та практично невичерпному потенціалу.

Для України питання використання відновлюваних джерел енергії є особливо актуальним з огляду на високий рівень імпортної залежності від традиційних енергоносіїв, зношеність об’єктів теплопостачання, значні втрати теплової енергії в теплових мережах та зростання тарифів на енергоресурси. Значна частина теплової енергії споживається у сфері житлово-комунального господарства та промисловості, що робить саме ці сектори перспективними для впровадження енергозберігаючих та альтернативних технологій. Використання геліоустановок для потреб теплопостачання дає змогу частково або повністю замістити викопне паливо, знизити експлуатаційні витрати та суттєво зменшити викиди парникових газів.

Геліоустановки призначені для перетворення сонячного випромінювання у теплову енергію з подальшим її використанням у системах опалення, гарячого водопостачання та для забезпечення технологічних процесів. Залежно від конструктивного виконання, типу теплоносія, способу акумулювання тепла та режимів роботи, такі установки можуть забезпечувати різний рівень теплової

продуктивності та стабільності функціонування. Найбільш поширеними є плоскі та вакуумні сонячні колектори, які відрізняються ефективністю перетворення сонячної енергії, вартістю, довговічністю та складністю обслуговування.

Разом із беззаперечними перевагами використання сонячної енергії існує низка факторів, які обмежують ширше впровадження геліоустановок. До них належать нерівномірність надходження сонячного випромінювання протягом року, залежність від кліматичних умов, необхідність використання акумулюючих систем, а також питання надійності та довговічності обладнання. У системах теплопостачання промислових і міських споживачів надійність геліоустановок є критично важливим фактором, оскільки відмова обладнання може призвести до зупинки виробничих процесів або порушення комфортних умов проживання населення.

Ефективність використання геліоустановок визначається не лише величиною сонячної радіації, а й технічними характеристиками колекторів, ефективністю систем акумулювання тепла, гідравлічними втратами в трубопроводах, якістю систем автоматичного регулювання, а також режимами споживання теплової енергії. Тому для обґрунтованого вибору параметрів геліосистем і прогнозування результатів їх роботи необхідне застосування комплексних методів технічної, економічної та надійнісної оцінки.

Особливої уваги потребує питання адаптації геліоустановок до умов експлуатації в промислових системах теплопостачання, де теплові навантаження мають значні добові та сезонні коливання, а також специфічні вимоги до температурного рівня теплоносія. У міських системах теплопостачання геліоустановки, як правило, використовуються у складі комбінованих систем разом із традиційними джерелами тепла, що вимагає узгодження їх спільної роботи та забезпечення стабільності теплопостачання споживачів.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у галузі сонячної теплоенергетики, питання комплексної оцінки ефективності та надійності

геліоустановок саме для систем теплопостачання промислових і міських споживачів залишається недостатньо повно висвітленим. У багатьох роботах розглядаються окремі аспекти ефективності або надійності без урахування їх взаємного впливу. Це ускладнює розробку універсальних рекомендацій щодо оптимального проектування та експлуатації геліосистем.

У зв’язку з цим актуальним є проведення досліджень, спрямованих на розробку методів комплексної оцінки ефективності та надійності геліоустановок з урахуванням кліматичних умов, режимів експлуатації, конструктивних параметрів обладнання та економічних показників. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих систем теплопостачання з використанням сонячної енергії.

Таким чином, обрана тема магістерської роботи є актуальною, має вагоме наукове та практичне значення та відповідає сучасним тенденціям розвитку енергетики, енергоефективності та екологічної безпеки.

Мета роботи:

Метою магістерської роботи є комплексна оцінка ефективності та надійності використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів, а також обґрунтування шляхів підвищення їх технічних і техніко-економічних показників.

Об’єкт дослідження:

Об’єктом дослідження є системи теплопостачання промислових підприємств та міських споживачів, у склад яких входять геліоустановки.

Предмет дослідження:

Предметом дослідження є процеси перетворення, накопичення та використання сонячної теплової енергії, а також закономірності формування показників ефективності та надійності геліоустановок у системах теплопостачання.

Методи дослідження:

У роботі застосовано такі методи дослідження:

аналіз і систематизація науково-технічних джерел, нормативної та довідкової літератури;

методи теплотехнічних та гідравлічних розрахунків;

методи техніко-економічного аналізу;

математичне моделювання режимів роботи геліосистем;

статистичні методи оцінювання надійності елементів геліоустановок;

методи порівняльного аналізу варіантів теплопостачання.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети у магістерській роботі передбачається розв’язання таких основних завдань:

- ✓ проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку сонячної теплоенергетики в Україні та світі;
- ✓ дослідити принципи роботи, класифікацію та конструктивні особливості геліоустановок;
- ✓ розглянути методи акумулювання теплової енергії в геліосистемах;
- ✓ визначити основні показники ефективності геліоустановок та методи їх оцінки;
- ✓ дослідити показники надійності геліоустановок і методи їх оцінювання;
- ✓ розробити методику комплексної оцінки ефективності та надійності геліоустановок;
- ✓ виконати розрахунок теплової продуктивності геліоустановки для вибраного об’єкта;
- ✓ оцінити річну ефективність використання сонячної енергії в системі теплопостачання;
- ✓ здійснити аналіз показників надійності обладнання;
- ✓ оцінити економічну ефективність упровадження геліоустановки;
- ✓ розробити обґрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності роботи геліосистем.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОУСТАНОВОК У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку геліоенергетики в Україні та світі

Глобальні тенденції. Сонячна енергетика нині демонструє стрімке зростання. Сумарна встановлена потужність сонячних фотогальванічних (PV) електростанцій у світі сягнула ~1,865 ТВт станом на кінець 2024 року, що у 2,6 раза більше порівняно з 710 ГВт наприкінці 2020 року. Лише у 2024 році було введено рекордні 451 ГВт нових PV-станцій – понад три чверті всіх доданих потужностей ВДЕ у світі цього року. Собівартість сонячної електроенергії за останнє десятиліття різко знизилася: глобальний середньозважений LCOE для сонячних станцій зменшився з ~0,417 $/кВт·год у 2010 р. до $0,043/кВт·год у 2024 р., що робить сонячну електрику найдешевшим джерелом нової генерації в багатьох регіонах. Поряд із PV розвиваються і великомасштабні концентруючі сонячні електростанції (CSP), що генерують електрику з теплової енергії: їхня сумарна потужність у світі зросла до ~6,9 ГВт у 2024 р., причому CSP-станції обладнуються теплоакумуляторами на розплаві солей для виробництва електроенергії після заходу сонця.

Окрім виробництва електрики, сонячна енергія широко застосовується для прямого теплопостачання (solar heating). В усьому світі на кінець 2022 р. працювало сонячних теплових установок (колекторів) загальною тепловою потужністю близько 542 ГВт (гідравлічно еквівалентно ~774 млн м² колекторної площі), що на 3,3% більше, ніж 523 ГВт_тепл роком раніше. Ці геліосистеми сумарно забезпечують приблизно 442 ТВт·год тепла на рік, еквівалентно заміщенню спалювання ~260 млн барелів нафти. Абсолютним лідером є Китай, на який припадає ~73% від світового парку сонячних колекторів (переважно вакуумних для гарячого водопостачання). Іншими великими ринками є Туреччина, США,

Німеччина, Бразилія – у цих країнах історично розвинуте використання сонячних водонагрівачів у побуті та комунальному секторі. Попит на сонячне тепло також зростає в нових сегментах: інтеграція геліоколекторів у системи опалення та кондиціонування будівель, встановлення великих сонячних теплополів для централізованих мереж, впровадження геліоустановок для промислових процесів. Очікується, що геліоенергетика відіграватиме дедалі більшу роль у декарбонізації теплопостачання поряд з тепловими насосами та біоенергетикою, особливо з урахуванням глобальних цілей сталого розвитку (SDG7 щодо чистої енергії та SDG13 щодо клімату). Зниження вартості технологій та вдосконалення систем зберігання тепла розширюють перспективи застосування сонячної теплоти навіть у помірних широтах.

Розвиток сонячної енергетики в Україні. Україна володіє значним потенціалом сонячної енергії – річна інсоляція у більшості регіонів (1070–1400 кВт·год/м²) перевищує, наприклад, показники Німеччини, що сприяє економічній доцільності сонячних проєктів. Активний розвиток галузі розпочався після впровадження державної підтримки: з 2010 року запрацювала схема «зеленого» тарифу (feed-in tariff, FIT) для електроенергії з відновлюваних джерел, однак справжній бум припав на 2018–2019 роки після підвищення тарифів і залучення інвестицій. У 2018 р. сумарна встановлена потужність сонячних фотоелектричних станцій (промислових і домашніх) досягла 1545 МВт, а у 2019-му зросла у 3,5 раза проти попереднього року [1]. За 2020 р. було введено ще понад 1,39 ГВт (з них 1169 МВт комерційних СЕС і 226 МВт приватних домогосподарств). Як результат, станом на 1 січня 2021 року в Україні накопичено близько 6873 МВт сонячних потужностей, з яких ~779 МВт (≈11%) становлять малі приватні СЕС потужністю до 30 кВт. Ці досягнення вивели Україну до топ-10 європейських ринків сонячної енергетики того періоду. Головним рушієм зростання стала схема «зеленого» тарифу: вона гарантувала виробникам сонячної електроенергії один з найвищих тарифів у Європі та окупність установок за ~5,5–7 років. Дія тарифу була закріплена

законодавчо (закони України «Про ринок електричної енергії» і «Про альтернативні джерела енергії»), що стимулювало бурхливе будівництво СЕС і здешевлення обладнання на українському ринку. Надвисокий тариф, щоправда, призвів і до дисбалансів (утворення боргів перед виробниками ВДЕ та потреби реформи підтримки), тому з 2020 року планувався перехід на аукціонну модель стимулювання інвесторів [1].

До початку повномасштабної війни 2022 р. Україна накопичила значний досвід у секторі сонячної енергетики. В країні діяли кілька великих СЕС (серед найбільших – Нікопольська СЕС 246 МВт, Покровська 240 МВт тощо) і десятки тисяч менших установок на дахах. За оцінками, на кінець 2021 р. налічувалося близько 45 тис. домашніх СЕС, тоді як загальна кількість домогосподарств – понад 6 млн, отже, потенціал росту надзвичайно великий. Російська агресія 2022 року завдала енергетичному сектору значних збитків, але одночасно оголила небезпеку залежності від імпорту викопного палива та централізованих мереж. Зруйнування традиційної генерації й мереж стимулює перехід до децентралізованих «розподілених» джерел – домашніх СЕС, енергокооперативів, мікромереж на ВДЕ. Уряд України задекларував курс на «зелену» відбудову: у післявоєнних планах пріоритет надається відновлюваній енергетиці та підвищенню енергонезалежності регіонів. За оцінками експертів, для розгортання малої сонячної енергетики (домогосподарства і кооперативи) до 2030 року знадобляться інвестиції до ~988 млн євро, що принесло б створення ~11 тисяч нових робочих місць і щорічне скорочення викидів CO_2 на 3,4–5,9 млн тонн [2]. Таким чином, геліоенергетика розглядається як одна з ключових складових забезпечення екологічно безпечного та стійкого енергопостачання України в майбутньому.

Стан геліоенергетики в Україні: В Україні розвиток сонячних теплових систем поки відстає від світових трендів, але є перспективним напрямом на тлі цілей енергобезпеки та заміщення газу. Сонячна радіація на території України достатня – річна сумарна інсоляція становить 1100–1500 кВт·год/м² (що подібно до

південних районів Німеччини). Це створює передумови для ефективного використання геліоколекторів для нагріву води і підтримки опалення. Попри це, до 2020-х років сонячна теплова енергетика залишалася нішею. Наприклад, ще у 2014 році загальний фонд великих сонячних колекторів, встановлених в комунальному секторі України, оцінювався лише у близько 233 шт. (площею ~396 м²) – тобто практично демонстраційні проекти. Основними споживачами були окремі лікарні, дитсадки (як в Одесі, Києві) чи пілотні ділянки тепломереж. Однак останнім часом інтерес до геліоенергетики зростає через потребу зменшити залежність від імпортного газу та підвищити стійкість енергосистеми. У Східній Європі в цілому частка споживання тепла від сонця поки мізерна – лише ~0,01% будівель та промислових об'єктів регіону використовують сонячні теплотехнології (крім Албанії, де цей показник перевищує 1%). Разом з тим, середньостроковий прогноз – оптимістичний: відповідно до аналізу енергоспівтовариства, за умов підтримувальної політики країни регіону (в т.ч. Україна) можуть збільшити частку сонячного тепла в загальному балансі теплопостачання до близько 3% вже у 2030 році. Згідно з оцінками IRENA для Центрально-Східної Європи, сумарний технічний потенціал сонячної теплоти в будівлях та промисловості 18 країн регіону CESEC до 2030 р. сягає 93 ГВ (≈133 млн м² колекторів). Для України в сценарії REmap-2030 визначено можливий вклад сонячного тепла ~24,3 ПДж на рік за умови розгортання ~13,5 млн м² колекторів. Це амбітний показник, зважаючи що наразі реально встановлені площі обчислюються тисячами м², але він підкреслює масштаб потенціалу. Серед пріоритетних напрямків – гаряче водопостачання населення, особливо в приватному секторі та закладах (лікарні, школи), де сонячні колектори можуть забезпечити до 50–70% річної потреби в ГВП в південних областях. Також перспективне впровадження геліоколекторів у централізованому теплопостачанні міст (для підмішування в тепломережі влітку і міжсезоння) та для промислових низькотемпературних процесів (харчова, текстильна, сільське господарство). Деякі українські міста вже випробували такі рішення: у Маріуполі, Тернополі, Львові

раніше встановлювалися дослідні геліополя для підтримки котелень. Нинішні випробування енергосистеми спонукають до ширшого використання доступної сонячної енергії – зокрема, держава стимулює проекти з встановлення сонячних колекторів на соціальних об’єктах і житлових будинках через програми енергоефективності. Отже, в Україні геліоенергетика перебуває на ранньому етапі розвитку, але має всі передумови для прискореного зростання за наявності підтримки: високий ресурс сонця, потреба заміщення газу і інтеграція до європейської “зеленої” енергополітики. Перспективи до 2030 р. включають збільшення потужностей у десятки разів, локалізацію виробництва обладнання та появу крупних сонячних теплових станцій для міст і промислових кластерів.

1.2. Принципи роботи та класифікація геліоустановок для теплопостачання

Принцип дії сонячних теплових установок. Геліоустановка для теплопостачання перетворює енергію сонячного випромінювання на теплову і передає її теплоносію (рідині або повітрю). Ключовим елементом є сонячний колектор – пристрій, що поглинає сонячні промені та нагрівається сам, нагріваючи при цьому середовище теплоносія. Отримане тепло може напряму використовуватися для нагріву води, повітря чи інших технологічних цілей, або акумулюватися для подальшого застосування. Типова активна геліосистема містить один чи кілька колекторів, контур циркуляції теплоносія (трубопроводи, насос, арматуру), теплообмінник (якщо контур колектора відокремлений від споживача), бак-акумулюючий резервуар для зберігання гарячої води, а також допоміжні компоненти – розширювальний бак, контролер та інше обладнання. Сонячні промені, проходячи через прозоре покриття, поглинаються абсорбером колектора і нагрівають його; тепло передається теплоносію, що рухається через колектор

(примусово – насосом чи природною конвекцією), а далі через теплообмінник може нагрівати воду у баку чи подаватися безпосередньо до точки споживання. Таким чином, сонячна установка забезпечує нагрів без спалювання палива, використовуючи випромінювання, і особливо ефективна в денні години та теплу пору року, коли інсоляція максимальна.

Класифікація геліоустановок. Існує кілька критеріїв класифікації сонячних теплових систем: за типом колектора, за способом циркуляції, за робочою температурою, за призначенням тощо.

За типом сонячних колекторів: Розрізняють неконцентруючі та концентруючі колектори. До неконцентруючих (стаціонарних) належать плоскі колектори, вакуумні трубчасті колектори і стаціонарні компаунд-параболічні концентратори (CPC) [3]. Вони поглинають як пряму, так і дифузну радіацію всією своєю площею і зазвичай працюють у низько- та середньотемпературному діапазоні (<150 °C). Концентруючі колектори оснащені дзеркальними або лінзовими системами, що фокусують сонячне проміння на меншій приймальній поверхні (приймачі). До них належать параболічні жолоби (лінійні концентратори), дзеркальні параболоїдні тарілки (фокусують у точку), лінійні системи Френеля, а також центральні колекторні поля з геліостатами (сонячні вежі). Концентруючі системи потребують стеження за Сонцем (одно- чи двовісного) для підтримання фокусування, тому конструктивно складніші, проте здатні нагрівати теплоносій до значно вищих температур (200–400 °C і більше) – аж до промислової пари або для приводу турбін у CSP [4].

За способом циркуляції теплоносія: Пасивні системи працюють за рахунок природної циркуляції – напр., термосифонні геліоводонагрівачі, де бак-накопичувач розташований вище колектора, і нагріта рідина піднімається самопливом. Активні системи оснащені насосами для примусової циркуляції, контролерами і датчиками, що керують перекачуванням теплоносія в залежності від

температур (такі системи гнучкіші в розміщенні компонентів і забезпечують кращу продуктивність, але залежать від електроживлення для роботи насосів).

За конфігурацією контуру: Прямоточні (відкриті) системи – коли вода, що нагрівається, циркулює безпосередньо через колектори і потім споживається (ефективно для теплих кліматів, але при ризику замерзання вода може спричинити пошкодження). Непрямі (закриті) системи використовують окремий контур із антифризом (наприклад, пропіленгліколем) у колекторах; тепло від нього передається воді через теплообмінник. Закриті системи складніші, але придатні для морозного клімату, оскільки запобігають замерзанню колектора.

За робочим температурним діапазоном: Низькотемпературні (<50 °C) – для підігріву басейнів, теплиць, технологій сушіння тощо (зазвичай пласкі або пластикові колектори без скління). Середньотемпературні (50–150 °C) – для систем гарячого водопостачання, опалення, деяких промислових процесів (використовуються пласкі селективні та вакуумні колектори). Високотемпературні (>150 °C) – для парогенерації, промислового нагріву, виробництва електроенергії (вимагають концентруючих колекторів з оптичним стеженням).

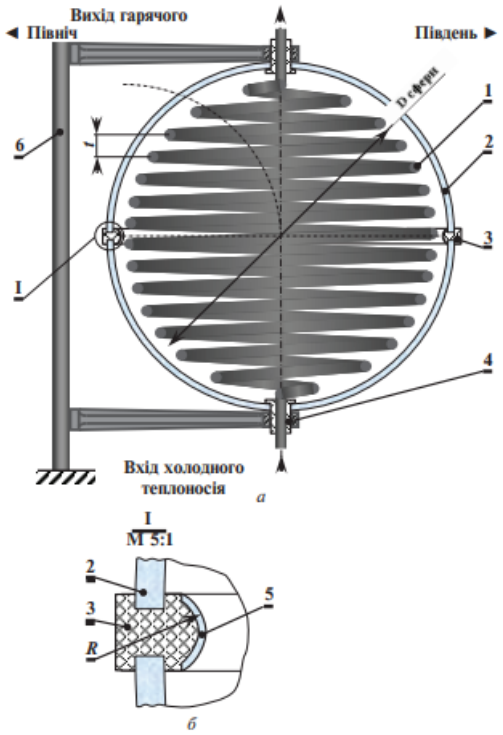
За призначенням: Сонячні водонагрівачі для забезпечення гарячого водопостачання (ГВП) в житлових будинках, басейнах, готелях тощо – найбільш масовий тип (переважно пасивні або активні системи з пласкими чи вакуумними колекторами). Сонячні опалювальні установки або комбіновані системи опалення-ГВП (комбіси) – інтегруються в систему опалення будівлі, забезпечуючи частку тепла для підтримки температури в приміщеннях і нагріву води; вимагають більших колекторних площ і сезонних акумуляторів. Промислові геліосистеми – для технологічних. Сонячні теплові електростанції – великі комплексні установки з концентруючими колекторами, що виробляють перегріту пару для турбогенераторів (класичний приклад – CSP-станції в пустельних зонах, які одночасно є виробниками електрики і тепла, але їх зазвичай відносять до електроенергетики) [5].



а



б



В)

Рис. 1. Класифікація типів сонячних колекторів: неконцентруючі системи (а) та концентруючі (б,в) різних конструкцій: R – радіус; 1 – теплоприймач; 2 – вакуумована скляна сфера; 3 – профільна прокладка; 4 – втулки; 5 – опукле дзеркало; 6 – двоплечовий кронштейн

Неконцентруючі колектори вловлюють сонячне випромінювання на всю свою площу, тоді як концентруючі фокусують його дзеркалами на меншій

приймальній поверхні. Концентруючі системи забезпечують значно вищі робочі температури, проте є складнішими та дорожчими в реалізації.

1.3. Конструктивні особливості сонячних колекторів та геліосистем

Плоский сонячний колектор. Це найпоширеніший тип неконцентруючого колектора для низьких і середніх температур. Конструктивно він складається з: плоского абсорбера – металевої пластини (міді, алюмінію) зі спеціальним селективним покриттям, що має високий коефіцієнт поглинання сонячної радіації (~95%) та низьке теплове випромінювання (~5%) [6]; під абсорбером або інтегровано в нього проходять трубки або канали, через які циркулює теплоносій (вода чи незамерзаюча рідина), забираючи тепло. Зверху абсорбер накритий прозорим покриттям (одним або двома шарами світлопроникного скла з низьким вмістом заліза або прозорого пластику) – воно виконує роль теплоізоляції за рахунок парникового ефекту, пропускаючи до 90% сонячного випромінювання, але утримуючи теплове (інфрачервоне) випромінювання від нагрітого абсорбера. З тильного боку і з боків колектор утеплений шаром теплоізоляції (мінеральна вата, пінополіуретан тощо) для мінімізації тепловтрат назовні. Усі компоненти укладені в герметичний корпус (зазвичай алюмінієвий або оцинкований сталевий), який захищає внутрішні елементи від погодних впливів і додає жорсткості конструкції. Коли сонячні промені падають на колектор, вони проходять крізь скло і поглинаються темним абсорбером, нагріваючи його до високої температури. Тепло через стінки трубок передається теплоносію; нагрітий теплоносій відводиться до споживача або акумулятора, а на його місце надходить холодніший зворотний потік – так забезпечується безперервне поглинання енергії. Плоскі колектори зазвичай працюють з ККД 40–70% (в залежності від різниці температур та інсоляції) і здатні

нагрівати воду до ~70–90 °C в сприятливих умовах. Вони прості, надійні, відносно недорогі, проте при високих температурах їх ефективність падає через зростання втрат тепла (конвекцією під склом та випромінюванням).

Вакуумний трубчастий колектор. Конструктивно складається з ряду скляних трубок, з яких відкачане повітря (створено вакуум ~10^{-3}–10^{-5} бар). Вакуум слугує майже ідеальним теплоізолятором, що практично усуває конвективні втрати тепла з абсорбера до оточення. Всередині кожної трубки розміщено абсорбер: або у вигляді тонкої пластини з селективним покриттям, розташованої вздовж осі трубки, або у формі циліндричної металевої трубки (теплопоглинача), вкритої селективним шаром. З конструктивної точки зору популярні дві схеми: теплові трубки (heat pipes) та двотрубні U-подібні колектори. У колекторах з тепловими трубками всередині вакуумованої скляної трубки проходить запаяна мідна трубка, частково заповнена леткою рідиною. Нижній кінець трубки (в районі абсорбера) – випаровувач: поглинаючи тепло, рідина закипає і пара піднімається до верхнього кінця (конденсатора), що вставлений у колекторний блок із проточним теплоносієм. Там пара конденсується, віддаючи тепло, і рідина стікає назад вниз (за рахунок гравітації або капілярної структури). Таким чином, теплова трубка переносить тепло абсорбера до основного теплоносія без насосів. В двотрубних вакуумних колекторах теплоносій сам протікає через кожну скляну трубку: холодна рідина входить через одну трубку U-подібного регістра, нагрівається всередині вакуумної оболонки і виходить через іншу. Вакуумні колектори мають вищий ККД при підвищених температурах і в холодну погоду, оскільки втрати на конвекцію практично нульові. Вони здатні нагрівати воду до кипіння (100 °C) і більше при яскравому сонці. Втім, їх недоліки – складніша технологія виробництва, вища ціна, потенційно гірша ефективність при хмарній погоді (через меншу площу абсорбера щодо проєкції сонця) та складність у очищенні снігу/інію з трубок. Для підвищення збору дифузного випромінювання деякі моделі містять всередині трубки дзеркальний відбивач за абсорбером.

Концентруючі сонячні колектори. Це більш складні оптичні системи, що складаються з двох основних частин – концентратора (відбивача або лінзи) і приймача (абсорбера). Концентратор збирає розсіяне на великій площі сонячне випромінювання і скеровує (фокусує) його на невеликому приймачі, за рахунок чого досягається вища густина потоку енергії. Застосовуються виключно для прямого сонячного випромінювання (у похмурий день ефект різко падає).

Основні різновиди: параболічний жолобовий колектор (PTC) – довге циліндричне параболічне дзеркало, що фокусує світло вздовж лінії фокусу, де проходить трубка-приймач з теплоносієм; лінійний концентратор Френеля – масив плоских дзеркал, розташованих рядами під різними кутами, що імітують кривизну параболи і спрямовують промені на ту саму приймальну трубку (більш економічна, але менш ефективна альтернатива жолобу); параболоїдна тарілка (dish) – дзеркальна антена, що фокусує сонце в одну точку (у фокусі встановлений невеликий приймач-абсорбер, наприклад, двигун Стірлінга чи теплообмінник); геліостатна вежа – велике поле плоских дзеркал-геліостатів, кожне з яких комп’ютерно керується для відбиття сонячного променя на вершину центральної вежі, де розташований приймач (теплообмінник з теплоносієм, зазвичай розплавом солі).

Концентруючі колектори здатні нагрівати робоче середовище до 250–500 °C (жолоби), 600–1000 °C (тарілки, вежі) і вище, що дозволяє генерувати технологічну пару, приводити турбіни та здійснювати інші високотемпературні процеси. Недоліки – потреба в системах стеження (електромеханічних приводах, системах управління), охолодження самого приймача, більш жорсткі вимоги до матеріалів (високі температури, інтенсивне сонячне світло).

Концентруючі колектори в основному застосовуються на великих електростанціях або промислових установках; у звичайному міському теплозабезпеченні вони майже не використовуються через складність і наявність дифузної радіації.

Система сонячного теплопостачання. Повноцінна геліосистема включає, крім колекторів, ряд інших компонентів, які забезпечують надійну роботу. Трубопроводи з термостійкого матеріалу (мідь, нержавійка або спеціальні полімери) з'єднують колектори з баком-акумулятором та споживачами; труби вкриті теплоізоляцією для мінімізації втрат.

Циркуляційний насос примусової системи перекачує теплоносій по колу, зазвичай керований електронним контролером. Контролер порівнює температури на виході з колектора і внизу бака: коли колектор гарячіший, ніж вода у баку на декілька градусів, він вмикає насос для забору тепла; коли сонце сховалось і колектор охолоджується – вимикає, щоб не було зворотного охолодження бака. Розширювальний бак компенсує теплове розширення рідини в замкненому контурі, попереджаючи надлишковий тиск. Зворотні клапани, повітровідвідники, запобіжні клапани та інша арматура гарантують безпеку (не допускають перегріву і надлишкового тиску) та видаляють повітря з системи.

Бак-акумулятор – добре утепрована ємність для зберігання гарячої води; зазвичай має вбудовані змійовики-теплообмінники: один знизу, підключений до сонячного контуру (куди надходить тепло від колекторів), інший – нагорі (підключений до котла чи електричного тену для догріву в разі потреби).

Внизу бака вода найхолодніша, тож колектори працюють з максимумом ККД на нагрів холодної води; нагорі бака завжди підтримується задана температура для санітарних потреб чи опалення (через догрів за потреби). Таким чином, бак виконує роль буфера між нерівномірним сонячним нагрівом і постійним теплоспоживанням, згладжуючи коливання.

Допоміжний нагрівач (газовий/електричний котел або тепловий насос) часто інтегрується в систему, щоб забезпечити тепло в періоди недостатнього сонця. Важливою конструктивною особливістю є також система захисту від замерзання: в українських умовах у сонячний контур заправляють антифризову рідину (пропіленгліколь), або застосовують дренажні системи, де при вимкненні насоса

теплоносій зливається з колекторів у резервуар, залишаючи колектори порожніми, – таким чином, при відсутності циркуляції рідина не замерзне і не розірве труби. Захист від перегріву включає терморегулюючі клапани, що скидають надлишок нагрітої рідини при досягненні граничних температур, або спеціальні тепловідвідні контури (радіатори), а також програмні алгоритми (наприклад, нічне охолодження – прокачування теплоносія через колектори вночі для скидання надлишкового тепла).



Рис. 1.2. Схема типової сонячної теплової установки з пласким колектором

Колектори поглинають сонячну енергію, насос циркулює теплоносій через контур, бак-акумулятор з теплообмінником накопичує теплову енергію, контрольна система керує роботою. У цій системі сонячний колектор нагріває теплоносій, що циркулює насосом, та передає тепло в бак через теплообмінник. Передбачено також допоміжне джерело тепла (напр., електронагрівач) для роботи у разі відсутності сонячного нагріву.

1.4. Акумулювання теплової енергії в геліосистемах

Роль теплових акумуляторів. Акумулювання теплової енергії – невід'ємна складова ефективних геліосистем, оскільки інтенсивність сонячного випромінювання залежить від часу доби та погоди. Акумулятор тепла дозволяє зберегти надлишок енергії, отриманої опівдні, для використання увечері чи вночі, а також перенести літні надлишки на міжсезоння (в разі великого сезонного сховища). Цим забезпечується більш стабільне теплопостачання і підвищується частка використання сонячної енергії – за рахунок балансування невідповідності між потужністю Сонця і графіком теплових потреб. Прості побутові геліосистеми мають акумулятори, розраховані на покриття потреби в гарячій воді протягом 1–2 діб, тоді як великі мережеві установки можуть будувати сезонні сховища, що зберігають тепло протягом місяців.

Типи технологій накопичення тепла: Розрізняють три основні методи – сенсибільне (від нагріву речовини без фазових переходів), латентне (теплота фазового переходу) і термохімічне накопичення.

Сенсибільне тепло. Найпоширеніший спосіб – використання теплоємності матеріалів при підвищенні їх температури. В якості акумулятора традиційно застосовують воду: вона має високу питому теплоємність (~4,2 кДж/(кг·K)) і доступна, нетоксична. Накопичення сенсибільного тепла відбувається зі зміною температури матеріалу; кількість запасеної енергії $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ (де m – маса, c – теплоємність, ΔT – підвищення температури). У побутових системах це баки-водонагрівачі: наприклад, 200-літровий бак, нагрітий від 20 °C до 60 °C, акумулює ~33 МДж (≈9,2 кВт·год) теплової енергії. В масштабах тепломереж застосовують резервуари на сотні і тисячі кубометрів води (цілі теплові накопичувачі при ТЕЦ чи котельнях), а також ґрунтові акумулятори – поля вертикальних свердловин з трубчастими теплообмінниками (BTES) або заповнені водою котловани з ізоляцією

(пит-акумулятори). До сенсибільних можна віднести і твердо-теплоємні матеріали: каміння, бетон, ґрунт – у яких тепло нагромаджується шляхом нагріву масиву матеріалу. Вони дешеві і придатні для довготривалого (сезонного) зберігання, але акумульована енергія на одиницю об'єму менша, ніж у води, і потрібна добряча ізоляція для зменшення втрат протягом місяців.

Латентне тепло. Цей метод використовує приховану теплоту фазових перетворень – зазвичай плавлення і кристалізації твердих речовин (Phase Change Materials, PCM). Коли матеріал плавиться (переходить з твердого стану в рідкий), він поглинає значну кількість енергії при сталій температурі; при зворотному застиганні – виділяє таку ж кількість тепла. Основна перевага PCM-акумуляторів – велика енергоємність в вузькому діапазоні температур (поки йде фазовий перехід). Як PCM використовують парафіни, воски, гідрати солей, евтектичні суміші, підбираючи речовину з температурою плавлення, близькою до бажаної температури збереження тепла (напр., 50–80 °C для ГВП, ~120 °C для промислової пари). Приклад: гідрат солі $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (глауберова сіль) має точку плавлення ~32 °C з теплотою плавлення ~250 кДж/кг – може бути використаний для акумуляції сонячного тепла в системах опалення низькотемпературних. Впровадження PCM дозволяє зменшити об'єм теплового сховища до 50% порівняно з водяним акумулятором тієї ж ємності. Недоліки: відносно висока вартість матеріалів (особливо для PCM, що працюють вище 150 °C), проблеми з багатократною циклічною стабільністю (деградація після сотень циклів), необхідність теплопровідних добавок або теплообмінників через низьку теплопровідність багатьох PCM.

Термохімічне акумулювання. Передбачає зберігання енергії у вигляді хімічної (енергетично місткого роз'єднаного стану реагентів) – з подальшим екзотермічним синтезом для виділення тепла. У широкому сенсі це акумуляція в оборотних хімічних реакціях або процесах сорбції. Наприклад, в реакції дегідратації $Ca(OH)_2 \rightleftarrows CaO + H_2O$ поглинається/виділяється близько 1100 кДж/кг

при розкладі/гідратації – якщо за допомогою сонця висушити гашене вапно (відняти воду), а потім при потребі зволожити оксид, виділиться значна кількість тепла. Інший приклад – сорбційні акумулятори: деякі тверді адсорбенти (цеоліти, силікагель) здатні вбирати вологу з повітря з виділенням тепла; «зарядка» ж відбувається шляхом висушування цих матеріалів при нагріванні. Термохімічні акумулятори привабливі тим, що втрати енергії при зберіганні мінімальні (реагенти можна зберігати при кімнатній температурі тривалий час), а енергоємність на вагу значно перевищує воду чи РСМ. Однак такі системи досі перебувають на стадії НДДКР: їм притаманні конструктивна складність (потрібні реакторні системи), значна питома вартість та інколи токсичність або корозійність реагентів.

Активні та пасивні теплові акумулятори. Якщо за способом підведення/відбору тепла акумулятори, аналогічно до колекторів, можна поділити на активні – з примусовою циркуляцією теплоносія через них (як звичайні баки-водонагрівачі з проточною водою, або рухома маса в теплообміннику), та пасивні – де зберігається статичний об’єм речовини і тепло надходить/виймається за рахунок теплопровідності чи природної конвекції. Переважна більшість сучасних систем використовує активні акумулятори з проточною схемою: наприклад, вода в баку постійно циркулює через змійовик від колекторів (непрямий нагрів) або сама проходить через колектори (прямий). У великих бакових акумуляторах може бути організована стратифікація – шарування по температурі – для підвищення ефективності (гаряча вода залишається вгорі, холодніша внизу, що оптимально для роботи колекторів). Пасивні акумулятори зустрічаються, наприклад, як блоки РСМ, вмонтовані безпосередньо в теплоізольовані огородження будівель чи в інтер’єр приміщень (теплота вбирається денним повітрям і віддається вночі – без руху матеріалу). Деякі великі сезонні сховища (напр., ґрунтові) також можна вважати пасивними, коли тепло накопичується в масиві без циркуляції, але в більшості випадків є хоча б періодична активна фаза зарядки/розрядки.

Приклади акумулювання в геліосистемах: Практично всі сонячні водонагрівальні установки оснащуються баком-акумулятором, обсяг якого підбирається з розрахунку середньодобового чи трохи більшого споживання. На одну людину потрібно ≈50–70 л гарячої води на добу, тому поширені баки 150–300 л для домогосподарств. Це забезпечує, що вдень бак нагрівається від сонця, а ввечері люди мають запас гарячої води. В опалювальних геліосистемах (combisystem) баки більші – 500–1000 л і більше, або навіть кілька послідовних баків, щоб накопичити тепло на холодну ніч. У сонячних мережах (SDH) надлишки літа зберігають в сезонних сховищах: найбільші з них – у Данії (міста Войенс, Марстал, Дроннінглунд) – представляють собою наземні резервуари об'ємом 50–200 тис. м³ води з ізоляційним накриттям. Наприклад, найбільший сезонний акумулятор – Войенс – має об'єм ~203 тис. м³ (≈700 TJ ємності); він разом з полем плоских колекторів на 70 тис. м² забезпечує понад половину річного тепла місцевій мережі. У таких акумуляторах вода за літо нагрівається до ~85 °C, за зиму остигає до ~10–30 °C, втрачаючи лише 15–25% запасеної енергії (завдяки великому об'єму відношення площі до об'єму мале, і добрі ізоляції). В CSP-станціях використовуються інші рішення – розплави солей як акумулятор: суміш нітратів натрію і калію (solar salt) з температурою плавлення ~220 °C нагрівається концентрованими променями до 500–600 °C і зберігається в ізольованих баках (гарячому і холодному). Сучасні CSP мають 6–12 годин запасу ходу завдяки таким сховищам – це дозволяє генерувати електрику ввечері. Цікаво, що всі діючі комерційні CSP реалізують саме сенсибільне накопичення (на розплавах солей або керамічних матеріалах), хоча експериментально випробовуються і латентні сховища (на базі високотемпературних сплавів, що плавляться) та термохімічні (реакції окислення/відновлення, розщеплення аміаку тощо).

Ефективність та втрати при зберіганні тепла. ККД теплового акумулятора визначається часткою енергії, повернутої споживачу, відносно акумульованої. У короткострокових акумуляторах (на добу) втрати тепла на довкілля відносно малі

(хороший бак втрачає 2–5 °C за добу, тобто <10%). В сезонних сховищах за кілька місяців втрати можуть сягати 20–50%, тому їх стараються вписувати в масштаб системи (закладаючи більший об’єм, ніж потрібно). Важливим фактором є питома акумулююча ємність (ГДж на м³) – у води ~0,25 ГДж/м³ на кожні 60 °C нагріву; у типового PCM (парафін, плавлення ~60 °C) – схоже 0,2–0,3 ГДж/м³; у термохімічних систем потенційно до 0,5–1 ГДж/м³, але це поки теорія. При проектуванні теплових сховищ важливо забезпечити мінімальні втрати: використовують багатошарову теплоізоляцію, вакуумні бар’єри, глибоке занурення акумуляторів в ґрунт (який сам слугує додатковою ізоляцією). Деякі прототипи PCM-акумуляторів містять теплопровідні матриці (наприклад, графітові або металеві губки) для підвищення теплопередачі всередині, інакше матеріал плавиться навколо теплообмінника і далі тепло не передається. В цілому, акумулювання тепла – зріла технологія на рівні малих і середніх систем, і активно розвивається для великих обсягів. Це критичний елемент, що дозволяє геліосистемам заміщувати традиційні котли не лише у полудень сонячного дня, але й у темну або хмарну пору, забезпечуючи надійність теплопостачання.

1.5. Аналіз режимів роботи геліоустановок у промисловому та міському теплопостачанні

Сонячні установки в промисловому теплопостачанні. Так звані SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) – напрям, що набирає популярності останніми роками. Промисловість споживає величезні об’єми теплової енергії: за оцінками MEA, на сектор припадає 25–50% світового кінцевого споживання тепла. Значна частина цих потреб – низько- та середньотемпературні процеси, які технічно можна живити від сонця. Зокрема, у харчовій і напоївій промисловості, сільському господарстві

чимало операцій проводяться при температурах нижче 150 °C (пастеризація, стерилізація, варіння, сушіння, підігрів води тощо) – це одна з найпридатніших галузей для впровадження геліоустановок. За статистикою, близько 47% усіх реалізованих у світі проєктів сонячного теплопостачання на виробництві припадає на сектор харчових продуктів і напоїв, адже він потребує великої кількості гарячої води/пари при відносно невисоких температурах. Інші перспективні галузі: текстильна (барвники, прання, сушка тканин), хімічна і фармацевтична (підігрів реагентів, випарювання, дистиляція), автомобільна (миття деталей), гірничодобувна (вилуговування, електролізні ванни) тощо. Для забезпечення таких процесів застосовуються різні типи сонячних колекторів. При потребах до ~80–90 °C зазвичай достатньо пласких колекторів із селективним покриттям або простих вакуумних; діапазон 90–150 °C ефективно покривають вакуумні трубчасті колектори і CPC; для ще вищих температур часто переходять до концентруючих систем (параболічні жолоби тощо), здатних продукувати пару 180–250 °C. Загалом, понад 30% промислового попиту на тепло знаходиться в тому діапазоні температур, де може працювати сонячна теплова технологія (за умови достатнього місця для колекторів та відповідних економічних умов).

Промислові геліоустановки можуть мати різні конфігурації інтеграції. Найпростіший варіант – попередній підігрів (pre-heating): сонячна система нагріває воду до, скажімо, 60 °C перед подачею в паровий котел, зменшуючи витрати палива на доведення до 100 °C. Інший варіант – пряме живлення процесу: коли сонячні колектори під’єднані паралельно з основним нагрівачем і за наявності сонця підтримують задану температуру в технологічному циклі (наприклад, ванна гарячого промивання деталей підтримується на 70 °C сонячним теплом, а при його нестачі вмикається електронагрівач). Важливо розглядати режим роботи: якщо процес неперервний (цілодобовий), доводиться встановлювати акумулятори або надлишкова сонячна енергія буде втрачатися. Якщо процес працює тільки вдень

(багато харчових виробництв – у світлу пору), то сонячна система може напряму покривати значну частку споживання в режимі реального часу.

Приклади впровадження: Станом на 2024 р. у світі загальна теплова потужність встановлених SHIP-систем оцінюється лише близько 1 ГВт [7] (це десятки великих та сотні невеликих установок), проте темпи приросту прискорюються. Якщо у 2010-х вводилося по кілька десятків систем на рік, то в 2022–2024 рр. щороку реалізується понад 100 нових SHIP-проєктів. Найбільше таких установок – у Китаї, Мексиці, ОАЕ, країнах ЄС (Німеччина, Іспанія, Австрія) та США. Часто їх впровадження пов’язане зі зростанням цін на газ/нафтопродукти або екологічними програмами. Найпотужніші у світі сонячні промислові системи діють в гірничодобувній галузі Чилі: на двох рудниках (Mina El Tesoro та ін.) встановлено поля параболічних концентраторів (жолобів) площею десятки тисяч квадратних метрів, які генерують технологічну пару для вилуговування міді. За рахунок цих кількох мегапроєктів гірничий сектор став домінувати в структурі сонячного промислового тепла – близько 78% сумарної потужності SHIP у світі припадає на гірничодобувну промисловість (тільки дві чилійські установки дають разом ~0,5 ГВт_тепл). В Європі прикладами є сонячні системи для молокозаводів (наприклад, установка 15 МВт_тепл для пастеризації на заводі у Франції), пивоварень (завод у Австрії має 1,5 МВт поле плоских колекторів для нагріву води), автомобільних виробництв (завод Ford у Іспанії використовує 3,7 МВт вакуумних колекторів для фарбувальної лінії), текстильних фабрик (у Індії, Бангладеш встановлені сотні м² СРС колекторів для сушіння тканин тощо). Ці проєкти демонструють до 30–60% економії палива в окремих процесах та мають строки окупності 5–10 років за умов субсидій.

Особливості режимів роботи: Промислові геліоустановки зазвичай працюють у доповненні до основних котлів, тобто інтегруються гібридно. В ясні дні сонячне тепло може повністю покривати потребу процесу (наприклад, денна зміна на заводі функціонує лише від сонця), але вночі чи в похмурі дні основне навантаження несе

традиційний нагрівач (газовий котел, електронагрівач). Тому режим можна описати як «сонячне підживлення» базового джерела. Важливо, щоб автоматика забезпечила пріоритетне використання дешевшої сонячної енергії: для цього застосовують трирежимні термостати, які вмикають котел лише коли температура недостатня і сонця немає. Також істотним є регулювання температури: деякі процеси чутливі до перегріву, тому сонячні контури оснащують змішувачами чи контрольними клапанами, щоб видавати теплоносій потрібної температури (надто гаряча вода може бути навіть шкідливою для, скажімо, харчових технологій).

Економічні та екологічні ефекти: Використання сонячного тепла в промисловості скорочує викиди CO_2 та споживання викопного палива, підвищує енергонезалежність підприємств. Однак, початкова інвестиція може бути значною – потрібно місце для колекторного поля (часто на дахах цехів або на землі поряд), та інтеграція в існуючу тепломережу заводу. На щастя, витрати на сонячні колектори в останні роки зменшуються, а ціни на паливо навпаки нестабільні і ростуть, тому для багатьох підприємств світу сонячна теплова енергія вже економічно вигідна. Наприклад, для середземноморських країн рівень витрат сонячного тепла оцінюється в €20–40 за МВт·год, що може конкурувати з газом при сучасних цінах і вуглецевих податках. Існують спеціальні програми підтримки (в ЄС – гранти від Horizon, у Китаї – субсидії на локалізацію обладнання, в Індії – пільгові кредити і вимоги до нових підприємств включати ВДЕ). Тому прогнозується, що частка сонця в промисловому теплообігу буде неухильно зростати.

Сонячне теплопостачання в містах. У централізованих системах опалення та гарячого водопостачання (тепломережах) сонячні колектори можуть використовуватися для підмішування тепла. Концепція SDH (solar district heating) – сонячного теплопостачання у масштабах міста або району – вже реалізована у ряді країн, найбільш успішно в Данії, Німеччині, Китаї. За даними на 2020 рік, у світі налічувалося 262 великомасштабних сонячних теплових систем у централізованому

теплопостачанні (сумарною потужністю ~1,4 ГВт_тепл) [8, 9, 10]. Лідером є Данія: станом на 2020 р. там працювало 124 сонячних тепломережевих станцій різного масштабу, що забезпечують від кількох до 60% річного тепла малим містам. В інших країнах Європи (Німеччина, Австрія, Швеція) та Китаї також функціонують десятки SDH-проєктів. Наприклад, у місті Сілкеборг (Данія) діє найбільша у світі сонячна теплова станція потужністю ~110 МВт_тепл: поле з 12 436 пласких колекторів площею 156 694 м² покриває до 20% річної потреби тепла міської мережі [11]. Влітку вона забезпечує майже 100% теплопостачання міста, а надлишок тепла акумулюється у величезному резервуарі на 60 тис. м³ води. Інший відомий проєкт – Марстал (острів Ерo, Данія): сонячні колектори + сезонний ґрунтовий акумулятор на 19 000 м³ дозволяють покривати 55% річного тепла містечка. У Німеччині в місті Cenftenberg встановлено 8,5 МВт поле вакуумних колекторів на ТЕЦ, що економить ~10% газу влітку. В Китаї є приклади сонячних мереж у новобудовах: наприклад, районне опалення у Далянь з 30 тис. м² колекторів.

Режими роботи сонячних тепломереж. Зазвичай сонячна станція підключається до поворотної магістралі тепломережі (охолодженого після споживачів теплоносія) і підігріває її на кілька-десят градусів перед поверненням до котелень. У літній період, коли попит на тепло низький (лише гаряча вода), правильно розраховане сонячне поле може повністю впоратися з навантаженням, вимикаючи котли. Взимку сонячне тепло покриває лише частку, решту додають котельні – але навіть 5–10% заміщення палива в зимові місяці дає суттєву економію. Для значних сонячних часток критичною є наявність великого теплового акумулятора, адже виробництво тепла максимальне влітку, а потреба – взимку. Данський досвід показав, що щоб досягти ~50% річного покриття сонцем, обсяг сезонного сховища має бути співмірним з 3–5 місячним споживанням тепла мережі. Наприклад, моделювання для шести польських міст показало, що для 20% частки сонця сумарно потрібні сезонні акумулятори на ~197 ТДж тепла (це ~4,5 обсягу найбільшого існуючого в Данії). У реальній практиці більшість поточних SDH

мають частку сонця 10–20%, що не потребує надвеликих акумуляторів (достатньо декількох великих баків). Ці системи працюють так: влітку накопичують надлишкове тепло в сезонному резервуарі, восени поступово його віддають, а взимку переважно працюють котли/ТЕЦ, доповнені невеликим сонячним виробітком ясними днями.

Переваги та проблеми впровадження SDH. Сонячне тепло у тепломережах дозволяє скоротити споживання газу чи вугілля, знизити витрати на паливо та викиди. В країнах з вуглецевим податком або системою торгівлі викидами (EU ETS) це економічно вигідно – так, у тій же Данії після запровадження податку на CO_2 теплова енергія від сонця стала дешевшою за відпуск із котелень, що і зумовило її бурхливе поширення. Крім того, сонячні поля мають доволі просту експлуатацію (після монтажу – мінімум рухомих частин, крім насосів, та незначні витрати на обслуговування). Водночас, потрібні значні площі під колектори – ≈1–2 м² на мешканця для покриття 10% тепла. У щільно забудованих містах буває складно знайти великі ділянки; тому оптимальне застосування – у невеликих містечках, передмістях, нових кварталах, де можна заздалегідь передбачити поле колекторів і акумулятор. Естетика теж враховується: поля часто встановлюють за містом або озеленюють навколо. Інша проблема – інтеграція в існуючі мережі, особливо високотемпературні (старі мережі з параметрами 120/70 °C не дуже підходять для сонячних колекторів, які ефективніше працюють при 60–80 °C). Тому концепція четвертого покоління тепломереж (4GDH) передбачає зниження температур до 50–60 °C, теплові насоси та споживачів з низькотемпературними системами опалення – що ідеально узгоджується із застосуванням сонячних панелей. В цілому, у міру модернізації теплових господарств і подорожчання традиційних енергоносіїв, SDH має великі перспективи: Євросоюз у Директиві 2018/2001 (RED II) встановив орієнтир щорічного приросту ВДЕ в опаленні не менше +1,3% (в перспективі це означає десятки гігават-годин додаткового сонячного тепла щороку). Уже діє ініціатива Solar District Heating Platform, об’єднуюча досвід проєктів, а MEA

публікує щорічні огляди Solar Heat Worldwide, які демонструють упевнений тренд до збільшення потужностей сонячного тепла в централізованих мережах.

Комбіновані рішення. Сонячні геліосистеми можуть ефективно працювати в парі з тепловими насосами (теплонасосне підвищення температури сонячного тепла), з котельнями на біомасі (сонце літом, біомаса взимку), а також у складі когенераційних схем. Наприклад, у Данії реалізовано проєкт Брондерслев: 16,6 МВт поле параболічних концентраторів працює разом з біомасовими котлами і органічним Ренкін-турбогенератором в одній системі централізованого тепло- і електропостачання [8]. Моделювання показало, що навіть субоптимально орієнтовані концентратори (через особливості місцевості) втратили лише 1% генерації проти ідеальної орієнтації, а додавання концентраторів мало сенс для підвищення температури мережі. В майбутньому, комбінація PV і теплових колекторів (PVT панелі) може забезпечувати одночасно електрику і тепло для локальних мереж. Такі гібридні установки вже випробовуються – наприклад, у Нідерландах створено “солне село” з PVT-панелей на дахах, що гріють спільний тепловий бак. У промисловості також розглядають сонячно-газові гібриди: у сонячний день тепло процесу дає геліоустановка, вночі чи при піках – газова/біогазова котельня.

1.6. Нормативно-правове забезпечення та стандарти у сфері сонячного теплопостачання

Міжнародні стандарти якості обладнання. Для гарантування надійності та ефективності сонячних колекторів у світі розроблено низку стандартів. Основоположним є міжнародний стандарт ISO 9806 – “Сонячні теплові колектори – методи випробувань” [12]. Він встановлює процедури оцінки теплової

продуктивності колектора (визначення його ККД через вимірювання коефіцієнтів теплових втрат a_1, a_2 та оптичного КПД η_0 за різниці температур) і серію тестів на довговічність та безпеку: термічні циклування, випробування на стійкість до високих температур та тиску, протиобмерзні тести, випробування ударами граду тощо. У Європі діяли стандарти EN 12975 (для колекторів) [13] та EN 12976 (для заводських комплектних геліосистем) [14], гармонізовані з ISO. На відповідність цим стандартам проводиться сертифікація – зокрема, знак Solar Keymark (впроваджений CEN/CENELEC) видається продукції, що пройшла незалежні випробування згідно ISO 9806 або EN 12975, включаючи ресурсоні випробування (наприклад, 300 температурних циклів від –20 °C до +100 °C для імітації замерзань-відлиг) та тест на удар градиною (крижані кульки діаметром 35 мм зі швидкістю 27 м/с). Такі вимоги забезпечують високу надійність: сучасні сертифіковані колектори витримують крупний град і 20–25 років експлуатації. В США працює аналогічна система SRCC (Solar Rating & Certification Corporation) з власними стандартами (ICC 901/SRCC 100 [15] – базується на ISO 9806. Україні, як члену ISO, важливо імплементувати ці стандарти – наразі прийнято національні ДСТУ ISO 9806:2016 [16] та ін., у кількох містах діють випробувальні лабораторії для сонячних колекторів.

Правове регулювання та стимули в Україні. Сфера відновлюваного теплопостачання в країні регулюється комплексом законодавчих актів. Закон України “Про альтернативні джерела енергії” [17] визначає сонячну енергію як альтернативну і декларує підтримку її використання. В теплопостачанні прямої аналогії «зеленого» тарифу (як у електроенергетиці) до недавнього часу не існувало, проте прийняті стимулюючі механізми: з 2017 р. законом дозволено виробникам теплової енергії з ВДЕ (в т.ч. сонячної) продавати її в тепломережі за тарифом, прив’язаним до діючого тарифу на тепло з газу, але із знижкою 10% (так звана «альтернативна теплова енергія»). Це робить проєкти на біомасі і сонці більш економічно привабливими, оскільки гарантує збут тепла теплокомуненерго.

Також держава впроваджувала програму “Теплі кредити” (2014–2020): часткове відшкодування (20–35%) вартості обладнання, купленого для підвищення енергоефективності, в тому числі домогосподарствам на сонячні колектори. За цією програмою тисячі українців встановили сонячні водонагрівачі у своїх домах.

Із 2021 р. запущено Фонд енергоефективності, що надає гранти ОСББ на утеплення і ВДЕ: деякі проєкти включають колектори для ГВП у багатоквартирних будинках. У 2023 р., в умовах енергокризи, уряд і місцева влада започаткували нові програми: наприклад, компенсація 30% вартості систем зберігання енергії для тих, хто встановлює СЕС або вітряки; пільгові кредити під 0% для приватних ВДЕ (постанова КМУ № 625, 2023). Такі заходи побічно стимулюють і сонячні теплові установки, бо нерідко домогосподарства одночасно інвестують і в PV, і в геліоколектори, щоб покрити всі енергопотреби.

У сфері будівництва нормативна база також еволюціонує. Нові ДБН з енергоефективності будівель (наприклад, ДБН В.2.6-31:2016) встановлюють мінімальні вимоги до теплової ізоляції та передбачають можливість використання ВДЕ для досягнення потрібного класу енергоефективності будинку. Хоча в Україні поки що не запроваджено обов’язкових вимог зі встановлення сонячних систем у новобудовах, як це було в деяких державах ЄС, інтеграція сонячних водонагрівачів заохочується через програми сертифікації «зелених» будівель (BREEAM, LEED), які додають бали за ВДЕ.

У 2023 р. український парламент ухвалив закон про обов’язкове врахування частки відновлюваних джерел при проєктуванні систем теплопостачання (щонайменше 50% до 2030 р.), що відповідає практикам ЄС. На місцевому рівні деякі міста (Львів, Житомир) прийняли плани дій сталого енергетичного розвитку, які містять завдання встановлення тисяч м² сонячних колекторів на муніципальних об’єктах (лікарнях, школах).

Міжнародний досвід нормативного стимулювання. У світі накопичено чимало прикладів ефективної політики розвитку сонячного тепла. Ще з 1980-х

Ізраїль законодавчо зобов'язав встановлювати сонячні бойлери в усіх нових житлових будинках (окрім висотних) – це зробило країну лідером: понад 90% домогосподарств в Ізраїлі забезпечуються гарячою водою від Сонця. Аналогічно, Кіпр досягнув 90% оснащення завдяки субсидіям і буднормам. Греція ще у 1970-х почала надавати податкові пільги на сонячні водонагрівачі, що дозволило збільшити площу на 1000 мешканців з 20 м² у 2005 р. до 360 м² у 2009 р.. Іспанія в 2006 р. увела обов'язкову норму (т.зв. "солярний ордонанс"), за якою кожна нова будівля повинна покривати 30–70% потреби в ГВП за рахунок сонячних систем – це радикально зрушило ринок (2005–2010 рр. площа колекторів на 1000 чол. зросла з 13 до 47 м²). Хоча в 2013–2014 рр. через економічну кризу норми трохи пом'якшили, більшість середземноморських країн зберігають вимоги чи стимули для СГВ (соляріани).

Китай зробив ставку на цільові показники: уряд планував довести площу сонячних колекторів до 300 млн м² до 2020 року та впроваджував субсидії виробникам, пілотні проєкти в містах. У містах Китаю діяли локальні правила: у м. Дежоу (пров. Шаньдун) поставили мету – 50% будівель з сонячним ГВП до 2010 р., місто Шеньчжень зобов'язало встановлення сонячних колекторів у всіх нових багатоповерхових житлових будинках.

Індія також підтримує: уряд видав ціль – 20 млн м² колекторів до 2022 р., запровадив пільгові кредити і розглядав обов'язкове оснащення сонячними водонагрівачами нових будівель в ряді штатів. США традиційно покладаються на фінансові стимули: діє 30% федеральний податковий кредит (до кінця 2032 р.) на встановлення сонячних теплових систем, а також додаткові знижки у багатьох штатах (Каліфорнія, Гаваї, Флорида тощо). Австралія ще у 2000 р. ввела систему Renewable Energy Certificates (сертифікати під ВДЕ), які видаються за встановлення сонячного водонагрівача – це створило додатковий ринок і пришвидшило впровадження. Такі інструменти, як показує досвід, суттєво впливають на розвиток:

наприклад, в Австралії частка домогосподарств з СГВ зросла з <5% у 2000 р. до ~20% у 2020 р.

Нормування та стандарти безпеки. Окремий аспект – стандарти на встановлення геліосистем. У багатьох країнах діють будівельні вимоги щодо міцності кріплення колекторів (щоб витримували вітрові та снігові навантаження), пожежної безпеки (наприклад, відступи від покрівельних вікон, негорюча ізоляція труб). Після кількох інцидентів з загоранням покрівель від перегрітих колекторів, Міжнародний кодекс IFC 2021 включив главу щодо протипожежних вимог для сонячних теплових систем на дахах (зокрема, потребу в автоматичних розширювальних бачках, що скидають пар при перегрівах). Загалом сонячні геліосистеми вважаються досить безпечними та екологічними: головне – кваліфікований монтаж за стандартами. В Україні проводиться навчання сертифікованих інсталяторів за програмами ЄС (Train-to-NZEB тощо).

Перспективи нормативного забезпечення. Зі зростанням ролі сонячного тепла варто очікувати подальшого розвитку регулювання. Можливі кроки: включення мінімальних вимог ВДЕ при проєктуванні (наприклад, зобов’язати нові приватні будинки встановлювати СГВ певного об’єму або фототермічні/фотовольтаїчні системи певної потужності). У ЄС на рівні директив вже зобов’язано країни враховувати частку поновлюваного тепла в щорічному енергоспоживанні – це підштовхує до впровадження сонячних систем, оскільки вони один з найдоступніших способів виконати ціль.

Крім того, розробляються нові стандарти випробувань для комбінованих систем – наприклад, ISO 9806:2025 враховує тестування гібридних PV/T колекторів (одночасно електрика і тепло). Посилена увага приділяється і вимогам до міцності: в стандартах IEC 62862 прописали тести для великих концентраторів, у нових редакціях ISO – випробування на землетрус для великих баків, на град >50 мм для панелей тощо. Україна як кандидат до ЄС імплементує європейське законодавство – тож, вірогідно, невдовзі будуть прийняті жорсткіші норми енергоспоживання

будівель, обов’язкові частки ВДЕ у теплі (RED III) та механізми підтримки декарбонізації тепломереж (ліцензії для незалежних виробників тепла з ВДЕ, контракти на тепло та інвестиційні конкурси на будівництво сонячних станцій). Все це створить більш сприятливі умови для розвитку геліоенергетики.

Таким чином, нормативно-правове поле у сфері сонячного теплопостачання поступово формується, базуючись на найкращих світових практиках, і покликане забезпечити стандарти якості обладнання, економічні стимули для прискореного впровадження та інтеграцію сонячних технологій у існуючі енергосистеми. Це є передумовою того, що геліосистеми стануть звичним елементом як промислової, так і комунальної енергетики у близькій перспективі.

2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ГЕЛІОУСТАНОВОК

2.1. Основні техніко-економічні показники ефективності геліоустановок

Геліоустановки (сонячні теплові системи) характеризуються рядом технічних і економічних показників, що дозволяють оцінити їх ефективність. До основних технічних показників належить коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного колектора – частка сонячної радіації, що падає на апертурну площу колектора і перетворюється на корисну теплову енергію теплоносія [18]. Значення ККД залежить від конструкції колектора і умов роботи (температурний режим, наявність забруднень тощо). Іншим важливим технічним показником є продуктивність – кількість теплової енергії, що виробляється колектором за певний час. Її можна виразити як добуток середньої потужності (кВт) на тривалість роботи (години). Для порівнянь вводять питому продуктивність – вироблену енергію на одиницю площі колектора (кВт·год/м²). Цей показник часто нормують на рік; чим вища питома річна продуктивність, тим більше тепла забезпечує система протягом року. Зазвичай питома річна продуктивність сонячних систем відносно невелика, тому для збільшення виходу енергії необхідно збільшувати площу колекторів (об'єднуючи їх у так зване геліополе).

До економічних показників ефективності належить передусім економія традиційного палива та вартість отриманого тепла. Сонячна установка дозволяє скоротити споживання газу, вугілля чи електроенергії, що можна кількісно оцінити у грошовому еквіваленті. Важливим інтегральним показником є термін окупності – час, за який економія витрат на енергоносії компенсує початкові інвестиції в геліосистему. Для сучасних побутових геліосистем в Україні термін окупності становить приблизно 6–8 років (залежно від типу установки, її потужності та місця монтажу) [19]. Такий відносно короткий строк досягнуто завдяки високій

ефективності сучасних колекторів та зростанню цін на традиційні енергоносії. Інші економічні показники включають капітальні витрати на обладнання і монтаж, експлуатаційні витрати (на обслуговування, заміну теплоносія тощо), а також довгострокову економію від використання безплатної енергії Сонця.

Крім того, ефективність геліоустановки можна характеризувати долею заміщення теплового навантаження – часткою від загальної потреби в теплі, яку покриває сонячна система. Цей показник часто називають сонячною фракцією. Величину долі заміщення f можна визначити як відношення корисної теплової енергії, отриманої від Сонця, до загального теплового навантаження системи за той самий період (наприклад, за рік):

$$f = Q_{solar}/Q_{total}, \quad (2.1)$$

де Q_solar – енергія, отримана від геліосистеми, а Q_total – сумарна потреба в теплі (включаючи внесок додаткових джерел). Чим вища ця частка, тим більшою мірою сонячна установка забезпечує потреби системи теплопостачання. У практиці проектування зазвичай досягають сонячної фракції на рівні 50–60% для гарячого водопостачання індивідуальних будинків і 30–40% – для більших об'єктів [20]. Більш високі значення стикаються з проблемою надлишкового літнього тепла та недовантаження системи взимку.

До техніко-економічних показників також можна віднести довговічність та надійність обладнання, оскільки вони впливають на економічний результат експлуатації. Сонячні колектори зазвичай не містять рухомих частин, що є перевагою: вони потребують мінімального обслуговування і можуть працювати десятиліттями. Термін служби якісної геліосистеми становить ~25–30 років (а плоскі колектори інколи служать до 50 років [20]), отже інвестиція розподіляється на тривалий період. У поєднанні з відсутністю витрат на пальне це забезпечує високий економічний ефект протягом життєвого циклу системи.

2.2. Методи визначення теплової продуктивності сонячних колекторів

Теплова продуктивність сонячного колектора – це кількість корисної теплової енергії, яку колектор передає теплоносію за певний час (добу, місяць, сезон тощо). Існують експериментальні та розрахункові методи визначення цього показника.

До експериментальних методів належить пряме вимірювання теплоти, відведеної від колектора. Для цього через колектор пропускають теплоносій із відомною витратою m (кг/с) і вимірюють підвищення його температури між входом T_in та виходом T_out. Тоді корисна теплова потужність Q (Вт) визначається як:

$$Q = mc_p(T_{out} - T_{in}), \tag{2.2}$$

де c_p – питома теплоємність теплоносія. Інтегруванням цієї потужності за час можна отримати добову або річну продуктивність. Для проведення таких вимірювань використовують калориметричні установки: лічильники тепла, витратоміри і термопари на вході/виході колектора.

Іншим підходом є розрахункові методи, що базуються на енергетичному балансі колектора та даних про сонячну радіацію. Основою такого розрахунку служить рівняння теплового балансу колектора у стаціонарному режимі. Якщо інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні колектора дорівнює I (Вт/м²), апертурна площа колектора A_c (м²), температура абсорбера (середня температура теплоносія в колекторі) T_f, а температура навколишнього середовища T_a, то корисна теплова енергія на виході колектора Q_u визначається як:

$$Q_u = A_c F_R(I_{tau_alpha} - U_L(T_f - T_a)), \tag{2.3}$$

Це рівняння є наслідком моделі Хоттела-Віллера для плоского колектора. Тут I_tau_alpha – ефективна прозорість і поглинальна здатність (оптичний ККД) колектора, U_L – коефіцієнт теплових втрат (Вт/(м²·K)), а F_R – коефіцієнт теплоохоплення (коефіцієнт відводу тепла) колектора. Добуток I_tau_alpha представляє потужність сонячного випромінювання, поглинутого абсорбером, а член U_L(T_f - T_a) – густину теплових втрат з поверхні колектора у навколишнє середовище. Таким чином, різниця між поглинутим випромінюванням і втратами, помножена на площу та коефіцієнт F_R, дає корисну теплову потужність.

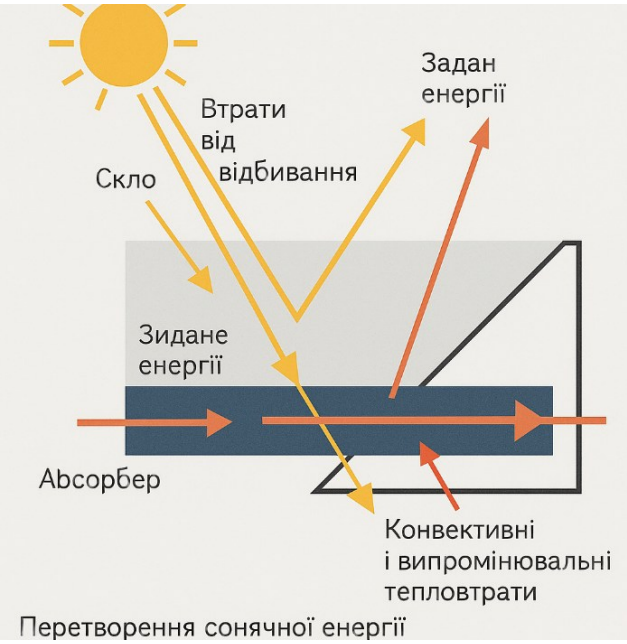


Рис. 2.1. Схема перетворення сонячної енергії в плоскому колекторі: частина енергії Сонця втрачається через відбивання на склі та абсорбері, а також через конвективні і випромінювальні тепловтрати

На рис. 2.1 схематично показано баланс енергії в плоскому колекторі. Сонячне випромінювання, що надходить на прозоре покриття, частково відбивається від скла та поглинається самим склом. Решта досягає абсорбера, де також частка енергії втрачається через відбивання від його поверхні. Поглинута абсорбером енергія нагріває теплоносій, але одночасно абсорбер втрачає тепло: шляхом теплопровідності до корпусу, конвекцією до повітря під склом і

випромінюванням тепла через скло. У сумі всі ці втрати зменшують корисну енергію. Як видно, миттєвий ККД колектора можна визначити як відношення корисної теплової потужності до потужності сонячної радіації на площі колектора:

$$\eta = Q_U / (A\, I_T) \tag{2.4}$$

Результати випробувань краще всього представити у вигляді графіка залежності миттєвого ККД колектора від параметра $(T_1 - T_{O.C.}) / I_T$. В основі такої форми представлення дослідних даних лежить рівняння (2.3). Розділивши обидві частини цього рівняння на IT A, одержимо наступний вираз ККД колектора:

$$\eta = Q_U / (A\, I_T) = F_R\, (\tau\alpha)_n - F_R\, U_L\, (T_1 - T_{O.C.}) / I_T. \tag{2.5}$$

При U_L=const залежність ККД колектора від параметра $(T_1 - T_{O.C.}) / I_T$ лінійна, причому кутовий коефіцієнт прямої рівний – $F_R\, U_L$, а координата точки перетину з вертикальною віссю складає $F_R\, (ta)_n$ – рис. 2.2.

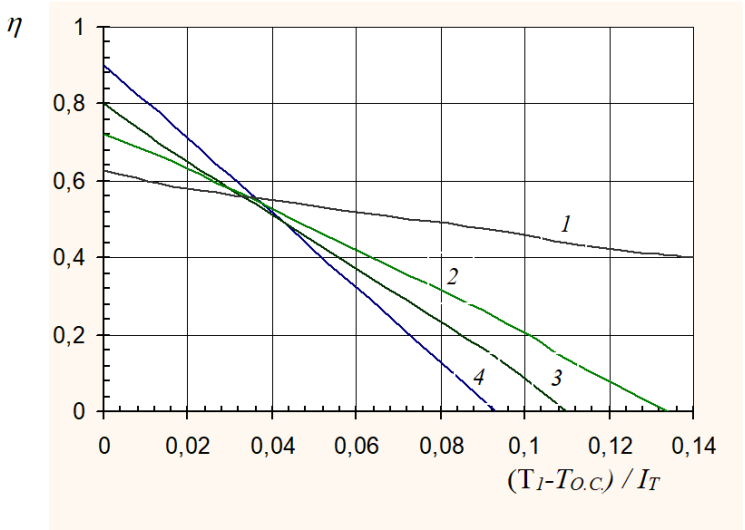


Рис. 2.2 Залежність ККД рідинного колектора від кліматичних і конструктивних факторів: 1 – вакуумований колектор; 2 – колектор з подвійним

склінням і селективним покриттям поглинаючої поверхні; 3 – колектор з подвійним склінням; 4 – колектор з одинарним склінням.

Методи випробувань. Теплову продуктивність сонячних колекторів визначають як у реальних умовах експлуатації, так і в лабораторії за уніфікованими процедурами. Зокрема, стандарти EN 12975 та ISO 9806 встановлюють порядок проведення випробувань, за результатами яких визначаються параметри eta_0, k_1, k_2. Виділяють два основні підходи: стаціонарний метод, що ґрунтується на вимірюваннях за відносно сталих значень сонячної радіації та температур, і динамічний метод, при якому коефіцієнти моделі знаходять на основі масиву даних, отриманих у змінних кліматичних умовах. На підставі експериментальних результатів будують робочі характеристики колектора (зокрема, залежність ККД, подану на рис. 2.2), а за цими характеристиками, використовуючи метеорологічні ряди (погодинні значення сонячної радіації, температури повітря тощо), розраховують добову та річну теплову продуктивність для різних кліматичних зон і режимів роботи.

Методи моделювання. Для прогнозування енергетичного виходу геліосистем застосовують математичні моделі, у яких розв’язується рівняння балансу енергії з урахуванням акумулювання тепла в баку, періодичності надходження сонячної радіації та змінного теплового навантаження. Такі розрахунки виконують чисельними методами з малим часовим кроком (до однієї години й менше) на основі кліматичних даних конкретної місцевості. Один із поширених підходів – метод f-chart, що дозволяє за емпіричними залежностями оцінити місячну та річну сонячну фракцію для систем опалення та гарячого водопостачання. Сучасні програмні комплекси (TRNSYS, Polysun, EnergyPlus тощо) забезпечують достатньо точне відтворення теплової роботи сонячних колекторів у складі системи, одночасно моделюючи погодні умови та функціонування допоміжних джерел тепла.

Таким чином, для оцінювання теплової продуктивності геліоколекторів використовують як результати натурних вимірювань, так і розрахунково-аналітичні

підходи. Поєднання експерименту з математичним моделюванням дає змогу з високою точністю прогнозувати річний енергетичний вихід сонячної установки в реальних умовах її експлуатації.

2.3. Показники надійності геліоустановок та методи їх оцінювання

Надійність геліоустановки характеризує її здатність безвідмовно функціонувати впродовж заданого проміжку часу зі збереженням основних експлуатаційних та енергетичних показників у допустимих межах. Кількісна оцінка надійності базується на використанні показників теорії надійності технічних систем, серед яких ключовими є ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, середній час напрацювання на відмову, середній час відновлення та коефіцієнт готовності.

Ймовірність безвідмовної роботи R(t) визначається як імовірність того, що протягом часу ttt у системі не виникне жодної відмови. Для більшості інженерних розрахунків використовується показовий закон розподілу відмов, за якого ця ймовірність описується залежністю

$$R(t)=e^{-\lambda t}, \tag{2.6}$$

де λ\ – інтенсивність відмов. Чим більше значення R(t) для заданого інтервалу часу, тим вищим є рівень надійності установки. Ймовірність відмови F(t)F(t)F(t) визначається як доповнення до ймовірності безвідмовної роботи та обчислюється за співвідношенням

$$F(t)=1-R(t). \tag{2.7}$$

Вона показує ймовірність того, що протягом часу ttt відбудеться принаймні одна відмова.

Важливим інтегральним показником надійності є середнє напрацювання на відмову (MTBF), яке визначає середній час роботи системи до першої відмови. Для показового розподілу відмов цей показник пов’язаний з інтенсивністю відмов співвідношенням

$$MTBF=1/\lambda. \quad (2.8)$$

Цей параметр широко застосовується при порівнянні різних типів обладнання та виборі найбільш довговічних вузлів системи. Поряд із ним використовується середній час відновлення (MTTR), який характеризує тривалість усунення відмови та повернення геліоустановки у працездатний стан. Значення MTTR істотно залежить від ремонтопридатності обладнання, наявності сервісної підтримки та запасних частин.

Експлуатаційну надійність системи зручно характеризувати за допомогою коефіцієнта готовності, який визначається як відношення часу безвідмовної роботи до загального часу експлуатації:

$$K_{гот}=T_{роб}/(T_{роб}+T_{прост}), \quad (2.9)$$

де $T_{роб}$ – сумарний час роботи без відмов, а $T_{прост}$ – сумарний час простоїв, пов’язаних з ремонтами. Для систем теплопостачання, що повинні працювати безперервно, значення $K_{гот}$ має бути максимально наближеним до одиниці.

Геліосистема розглядається як складна технічна система, що включає сонячні колектори, циркуляційний насос, теплообмінник з баком-акумулятором, трубопроводи, запірно-регулюючу арматуру та систему автоматичного керування.

Відмова будь-якого з основних елементів призводить до зниження ефективності або повного припинення роботи всієї установки. Якщо всі компоненти з’єднані послідовно, то загальна ймовірність безвідмовної роботи системи визначається як добуток надійностей окремих елементів:

$$R_{сист}=R_1 \cdot R_2 \cdot \ldots \cdot R_n. \quad (2.10)$$

У разі застосування паралельного резервування, наприклад при використанні двох насосів, загальна надійність підсистеми визначається співвідношенням

$$R_{пар} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i).$$

Таким чином, врахування структурної побудови геліосистеми дозволяє кількісно оцінити її загальну надійність на основі відомих характеристик окремих елементів.

Вимоги до надійності геліоустановок залежать від їх функціонального призначення. Для житлових будівель особливо важливо забезпечити безперервну роботу систем гарячого водопостачання та опалення протягом усього опалювального періоду. У нормативних документах може встановлюватися мінімально допустиме значення ймовірності безвідмовної роботи, наприклад

$$R(t_{сезон}) \geq 0.98, \quad (2.11)$$

що відповідає допустимому простою не більше кількох діб за сезон.

Оцінювання надійності проектованих геліосистем здійснюють аналітичними методами на основі довідкових даних про надійність окремих компонентів. Для цього формується структурна схема надійності та за допомогою ймовірнісних співвідношень визначаються узагальнені показники системи. Для діючих

геліоустановок застосовують статистичні методи, що ґрунтуються на аналізі фактичної кількості відмов та ремонтів за певний період експлуатації.

Сонячні теплові системи загалом характеризуються високою надійністю, що зумовлено простотою конструкції та мінімальною кількістю рухомих елементів. Якісні сонячні колектори можуть працювати 40–50 років. Найбільш поширеними причинами відмов є перегрів і стагнація теплоносія, його замерзання в колекторах і трубопроводах, корозія та відкладення у теплообміннику, вихід з ладу циркуляційного насоса, несправності датчиків і контролера, а також механічні пошкодження під дією граду чи снігових навантажень. Більшість цих проблем запобігається правильним проектуванням системи та регулярним технічним обслуговуванням. За умови періодичного контролю герметичності, стану теплоносія, поверхні колекторів та працездатності автоматики сучасні геліоустановки здатні забезпечувати стабільну і надійну роботу протягом усього нормативного строку служби.

2.4. Математичне моделювання роботи геліосистем у системах теплопостачання

Сонячні теплові системи (геліосистеми) – це установки, що перетворюють енергію сонячного випромінювання на тепло для забезпечення гарячого водопостачання (ГВП) та опалення. Такі системи складаються з сонячних колекторів, теплоакумуляторів (баків для зберігання тепла), трубопроводів, насосів та допоміжних пристроїв (наприклад, резервного котла або електронагрівача). На тлі зростання цін на енергоресурси та прагнення до використання відновлюваних джерел енергії, геліосистеми набувають популярності як ефективне рішення для нагріву води й підтримки опалення. Через мінливий характер сонячного ресурсу і

складну взаємодію компонентів, аналіз роботи геліосистем найефективніше виконувати шляхом математичного моделювання. Математична модель геліосистеми – це сукупність рівнянь, що описують фізичні процеси в кожному з елементів системи, дозволяючи імітувати її поведінку у часі при різних умовах експлуатації. Розв’язавши ці рівняння, можна отримати прогноз змін температур, потоків тепла та інших показників у системі, що дає змогу оцінити ефективність, надійність та оптимальні параметри геліосистеми до її реального впровадження.

Зазвичай математична модель геліосистеми охоплює кілька підмоделей, серед яких: модель сонячного колектора, модель акумулюючого бака, модель споживача тепла (навантаження), модель допоміжного теплогенератора, а також модель системи керування і гідравліки. Розглянемо кожну з них детальніше.

2.4.1 Модель сонячного колектора

Ця підмодель описує перетворення сонячного випромінювання в тепло в колекторі. Основою є рівняння енергетичного балансу: поглинута сонячна енергія мінус теплові втрати дорівнюють корисній тепловій потужності, відданій теплоносію. У простому стаціонарному випадку (коли колектор перебуває в усталеному режимі) це можна описати формулою:

$$Q_u = A_c \cdot \tau \cdot \alpha \cdot I(t) - U_L \cdot A_c \cdot [\, T_f(t) - T_a(t) \,]. \qquad (2.11)$$

Тут A_c – площа апертури колектора; $\tau \cdot \alpha$ – оптичний коефіцієнт корисної дії (добуток прозорості покриття та поглинальної здатності абсорбера); I(t) – інтенсивність сонячного випромінювання на площину колектора (Вт/м²); U_L –

коефіцієнт теплових втрат колектора; T_f(t) – температура абсорбера (або теплоносія на виході колектора); T_a(t) – температура навколишнього середовища. Різниця (T_f − T_a) визначає теплові втрати колектора до оточення.

Практично характеристики колектора часто надаються у вигляді його ККД залежно від умов. Зазвичай в паспорті вказується оптичний ККД η_0 (при нульовому перепаді температур) та коефіцієнти теплових втрат k_1 і k_2. Це дозволяє записати залежність ефективності від різниці температур як:

$$\eta = \eta_0 - (k_1\ \Delta T)/I - (k_2 \Delta T2)/I, \qquad (2.12)$$

де $\Delta T = T_f - T_a$ та I – інтенсивність сонця.

Графік цієї залежності – спадна крива: чим більший перегрів абсорбера над довкіллям, тим нижчий ККД (через зростання втрат). Якщо ж з якоїсь причини відбір тепла від колектора припиняється (насос вимкнений або перекритий контур), температура абсорбера починає зростати, а ККД падати, поки не досягнеться так звана температура стагнації. При стагнації теплові втрати зрівнюються з поглиненою сонячною потужністю, тому корисна віддача падає до нуля. В цей момент температура в колекторі дуже висока (може перевищувати 150 °C для плоских колекторів), що призводить до перегріву теплоносія. Теплоносій (як правило, суміш води з антифризом) може розкладатися і втрачати властивості за такої температури, тому стагнації слід уникати. Для запобігання цьому контролер має вчасно вимикати колекторний контур або скидати надлишок тепла при наближенні до граничних режимів.

Для динамічного моделювання враховують теплоємність колектора (повільний розігрів та охолодження його маси). Це додає інерційність у модель і призводить до диференціального рівняння для температури абсорбера T_f(t):

$$M_{abs}\, c_{abs}\, dT_f(t)/dt = A_c \cdot \tau \cdot \alpha \cdot I(t) - U_L \cdot A_c \cdot [\, T_f(t) - T_a(t)\,] - Q_{out}(t). \qquad (2.13)$$

Тут M_abs c_abs – теплоємність абсорбера разом із теплоносієм в ньому (добуток маси на питому теплоємність);

ліва частина рівняння M c dT_f/dt описує зміну внутрішньої енергії колектора (температури абсорбера) у часі.

Права частина містить три члени: A_c·τ·α·I(t) – потужність поглинутого сонячного випромінювання; U_L A_c[T_f − T_a] – теплові втрати колектора в довкілля; Q_out(t) – теплова потужність, що відводиться теплоносієм з колектора (корисна потужність, яка залежить від витрати рідини і різниці температур між входом та виходом колектора). Це диференційне рівняння описує динаміку температури колектора: коли сонячна інтенсивність зростає, абсорбер нагрівається; коли сонця нема або витрата велика, абсорбер охолоджується тощо.

2.4.2 Модель акумулюючого бака (теплоакумулятора)

У геліосистемах, що забезпечують ГВП та опалення, як правило, використовується накопичувальний бак-акумулятор для зберігання виробленого тепла. Математично його можна змоделювати як ємність з концентрованими параметрами (тобто припустити, що вся вода в баку має однорідну температуру), або із врахуванням вертикальної стратифікації (нашарування гарячої та холоднішої води по висоті). Для простоти розглянемо модель як одного вузла з температурою T_tank(t). Баланс енергії у баку можна записати як диференційне рівняння:

$$M_{water}\, c_{p,water}\, \frac{dT_{tank}}{dt} = Q_u(t) - Q_{load}(t) - Q_{loss,tank}(t). \qquad (2.14)$$

Тут M_water – маса води в баку (кг), c_p,water – питома теплоємність води (≈4,18 кДж/(кг·K));

ліва частина M c_p dT/dt характеризує зміну теплотовмісту води в резервуарі.

Права частина: Q_u(t) – теплова потужність, що надходить від сонячних колекторів до бака; Q_load(t) – потужність тепловідбору споживачем (на потреби ГВП чи опалення); Q_loss,tank(t) – тепловтрати бака через його стінки (залежні від якості теплоізоляції та різниці температур між водою і повітрям зовні). Таким чином, температура води в баку T_tank(t) підвищується, якщо надходження Q_u перевищує сумарні втрати (Q_load + Q_loss), або знижується, коли відбір і втрати перевищують надходження тепла.

Зазначимо, що реальні баки схильні до стратифікації: верхні шари води гарячіші, ніж нижні (особливо коли тепло надходить у верхню частину баку). Детальніша модель може розділяти бак на кілька шарів по висоті та обчислювати температуру кожного шару окремо, враховуючи теплообмін між шарами. Це підвищує точність прогнозу температури вихідної води, проте ускладнює модель. У багатьох випадках спрощена модель з одним усередненим T_tank достатньо добре описує енергетичний баланс системи і використовується для оцінки загальної продуктивності.

2.4.3 Модель споживача тепла (навантаження)

В цій підмоделі задається, як саме відбирається тепло із системи для потреб користувача. Зазвичай це робиться у вигляді часової функції (графіка) споживання теплової потужності Q_load(t) протягом доби або тижня. Наприклад, можна задати типову добову криву використання гарячої води мешканцями: вранці спостерігається пікове споживання (душ, приготування сніданку), потім вдень

витрата зменшується, а ввечері знову зростає (миття посуду, ванні процедури тощо); у нічні години споживання мінімальне. Профіль потреб тепла на опалення будинку змінюється залежно від погоди: у холодні дні потрібна більша теплова потужність для підтримання внутрішньої температури, в теплі дні – менша, а влітку опалення взагалі не вимагається. Для моделювання опалення часто використовують спрощену теплотехнічну модель будинку: розраховуються тепловтрати через стіни, дах, вікна та визначається необхідна теплова потужність для компенсації цих втрат і підтримання комфортної температури в приміщенні. Таким чином, Q_load(t) виступає як задане навантаження на геліосистему. У ході моделювання аналізується, яка частка цього навантаження може бути покрита сонячною енергією, а яка потребуватиме підтримки від допоміжного джерела.

2.4.4 Модель допоміжного теплогенератора

Оскільки навіть у найсонячніших кліматах сонячна система не здатна цілком покрити потреби в теплі протягом усього року, в геліосистемах передбачають резервне джерело тепла (наприклад, газовий котел чи електронагрівач). Математична модель такого допоміжного теплогенератора зазвичай зводиться до логіки ввімкнення/вимкнення залежно від стану системи. Як правило, реалізується просте правило: якщо температура в баку T_tank опускається нижче заданого порогу T_set, або якщо теплопродуктивність сонця недостатня для покриття поточного навантаження, то запускається допоміжний котел, що додає тепло в систему. Коли ж сонячне тепло знову здатне підтримувати необхідну температуру (наприклад, T_tank піднялася вище T_set), резервний нагрівач вимикається. Така модель є дискретною (логічною) і відбиває роботу системи керування, що забезпечує пріоритет використання сонячної енергії, але не дає охолонути системі

нижче комфортних умов. У спрощеному варіанті вважається, що котел працює за принципом on/off (лише повне ввімкнення чи вимкнення). Реальні ж котли можуть модулювати потужність, але для цілей моделювання це можна врахувати, наприклад, розбивши його роботу на цикли «вмикання-вимикання» з різною тривалістю, щоб досягти середньої необхідної потужності. Така підмодель дозволяє оцінити, в які моменти і в якій кількості буде задіяний допоміжний нагрівач – наприклад, можна підрахувати загальну спожиту додаткову енергію за сезон чи кількість годин роботи котла.

2.4.5 Модель контролера і гідравліки

Ця частина моделі відповідає за алгоритм керування циркуляційним насосом у контурі сонячного колектора та врахування особливостей гідравлічної системи. У типових геліосистемах застосовується диференційний контролер: насос вмикається тоді, коли температура на виході колектора перевищує температуру води в баку більше, ніж на заданий диференціал (наприклад, на 5–10 °C), і вимикається, коли колектор охолов і різниця температур впала до кількох градусів (наприклад, менше 2–3 °C). Такий алгоритм запобігає марній циркуляції: насос не працюватиме даремно і не охолоджуватиме бак у часи слабкого сонця. Окрім цього, модель може враховувати потужність, споживану насосом (електроспоживання), що важливо для повного енергетичного та економічного аналізу системи, адже насос теж витрачає енергію. Гідравлічна частина моделі може також включати обмеження по витраті (пропускній здатності труб, клапанів) та характеристики потоку рідини, але в базових моделях часто припускають фіксовану витрату, коли насос увімкнений.

Система керування також забезпечує захисні функції. Наприклад, захист від замерзання: якщо температура колектора взимку наближається до 0 °C, контролер

може короткочасно увімкнути насос, щоб прогнати теплу воду з бака через колектор і запобігти утворенню льоду. У дренажних системах можливе автоматичне зливання рідини з колекторів при досягненні гранично низької температури. Втім, зазвичай у колекторному контурі використовується незамерзаючий теплоносій (суміш води і пропіленгліколю)[5], що дозволяє системі працювати навіть при від'ємних зовнішніх температурах. Модель контролера у поєднанні з моделлю допоміжного теплогенератора відображає логіку роботи системи: пріоритет віддається сонячному теплу, але за необхідності вмикається резервне джерело, і насос прокачує теплоносій лише коли є корисна теплота для відбору.

2.4.6 Об'єднання підмоделей та результати моделювання

Всі вищенаведені підмоделі разом утворюють систему рівнянь, що описують геліосистему в цілому. Ці рівняння, як правило, неможливо розв'язати аналітично, тому використовується їх чисельне розв'язання – модель реалізують у вигляді програми і проводять імітацію роботи системи протягом потрібного інтервалу часу (наприклад, доби, сезону чи цілого року). Для цього часто застосовують спеціалізоване програмне забезпечення або універсальні середовища на кшталт MATLAB/Simulink, TRNSYS, TSOL тощо, де задаються відповідні диференційні рівняння і алгоритми керування. Чисельно система рівнянь інтегрується з невеликим часовим кроком (наприклад, 1–5 хв) методами типу Рунге–Кутта, щоб отримати стійке і точне рішення. В результаті моделювання отримують часові залежності станів системи – температур (колектора, бака, приміщення тощо) та потоків тепла ($Q_u(t)$, $Q_{load}(t)$, $Q_{aux}(t)$) протягом усього періоду розрахунку. На основі цих даних визначаються ключові показники ефективності геліосистеми.

Зокрема, обчислюється загальна кількість отриманої від сонця теплової енергії за заданий період – Q_solar. Також визначається частка покриття теплового навантаження сонячною енергією f* (solar fraction) – тобто, яка частина від загального споживання тепла забезпечена геліосистемою. Інші важливі результати: максимальна досягнута температура в баку (що характеризує запас тепла і безпечність режимів; надто висока температура небажана через ризик закипання теплоносія), кількість годин або циклів роботи допоміжного котла (показник залежності від невідновлюваного джерела), а також втрати енергії на перегрів або скидання надлишкового тепла влітку (коли колектори виробляють більше, ніж споживається). Якщо в моделі враховано споживання електроенергії насосом, можна оцінити загальний баланс енергії системи з врахуванням цих витрат. Таким чином, імітаційна модель дає повну картину роботи геліосистеми в динаміці та дозволяє кількісно оцінити її ефективність.

Наприклад, моделювання типової ясної літньої доби показує, що сонячні колектори починають активну роботу з самого ранку: вже близько 10–11 години температура води в баку може досягти 50–60 °C, а опівдні перевищити 80 °C. Це означає, що вдень накопичується надлишок тепла, достатній для покриття вечірніх і ранкових потреб у гарячій воді без участі котла. Натомість у похмурий зимовий день температура теплоносія в колекторі ледь сягає 30–40 °C у найтепліший час доби, тож більшу частину теплового навантаження доводиться покривати котлу. Такі розрахунки дозволяють чітко побачити, за яких умов система працює ефективно, а коли необхідна підтримка резервного джерела.

2.4.7 Параметричне моделювання та оптимізація

Однією з переваг математичного моделювання є можливість досліджувати вплив різних параметрів на роботу системи без фізичних експериментів. Задаючи моделі різні значення характеристик (площу колекторів, об’єм теплоакумулятора, витрати теплоносія, пороги спрацьовування контролера тощо), можна порівняти результати і визначити оптимальні конфігурації. Наприклад, збільшуючи площу сонячних колекторів, ми очікуємо зростання виробництва сонячного тепла і більшої частки покриття навантаження. Проте надто велика площа призведе до надлишку енергії влітку, коли споживання низьке – ця невикористана енергія піде у втрати (перегрів колекторів, вимушене відключення системи). Аналогічно, збільшення об’єму бака-акумулятора дозволяє акумулювати більше тепла, що може підвищити використання сонячної енергії, але надмірно великий бак може ніколи повністю не нагріватися навесні чи восени, і його вартість не окупиться. За допомогою параметричного моделювання знаходять компромісні, оптимальні співвідношення – скажімо, такий розмір колекторного поля і акумулятора, за якого частка покриття f максимальна, а втрати від простоювання мінімальні. Також можна дослідити вплив інших факторів, як-от нахил і орієнтація колекторів, ефективність теплоізоляції бака чи гістерезис контролера. Всі ці аналізи на комп’ютерній моделі допомагають інженеру прийняти обґрунтовані рішення щодо параметрів системи ще на етапі проектування. Крім того, модель можна використовувати для економічної оптимізації: оцінюючи річну економію традиційної енергії при різних конфігураціях, можна знайти варіант, де додаткові інвестиції в обладнання вже не дають суттєвого виграшу (принцип спадної віддачі). Це дозволяє визначити оптимальний проєкт з точки зору співвідношення вартість/ефективність.

2.4.8 Врахування кліматичних даних та орієнтації колекторів

Реалістичність моделювання забезпечується використанням фактичних кліматичних даних – зокрема, профілів сонячної радіації та температури повітря для конкретного регіону, де планується експлуатація геліосистеми. Наприклад, для міста Вінниця або іншого населеного пункту можна взяти метеорологічні дані за типовий рік (Typical Meteorological Year) чи погодинні виміряні дані, і на їх основі забезпечити модель реалістичними вхідними впливами. Це дозволить оцінити річну продуктивність системи саме в даному кліматі – скільки сонячної енергії можна отримати протягом року, яку частину цих потреб покриє геліосистема, скільки разів взимку знадобиться допоміжний нагрівач тощо.

Важливим параметром розташування є кут нахилу панелей. Оптимальний нахил для максимальної річної генерації, як правило, близький до географічної широти місця установки. Проте, якщо система орієнтована переважно на опалення взимку, кут нахилу доцільно збільшити (розмістити колектори більш вертикально, щоб ефективніше вловлювати низьке зимове сонце). Для систем, що працюють головним чином на ГВП влітку, навпаки – кут можна трохи зменшити, щоб підвищити літню генерацію. Математична модель дозволяє перевірити різні кути нахилу і оцінити їхній вплив на сезонну продуктивність, допомагаючи обрати компромісний варіант.

Також слід врахувати кутові фактори надходження сонячного випромінювання протягом дня. Інсоляція на похилу площину колектора залежить від кута падіння сонячних променів, який змінюється з часом доби та порою року. Тому в моделі включають астрономічні розрахунки: за заданими географічними координатами та часом визначають висоту Сонця над горизонтом і азимут, а далі за геометричними формулами обчислюють проєкцію сонячного проміння на площину колектора з заданим кутом нахилу та орієнтацією. Таким чином отримують часову функцію I(t) для сонячного колектора – наприклад, погодинний профіль інсоляції для кожного дня року.

Математичне моделювання є потужним інструментом для аналізу та проектування геліосистем. Використовуючи модель, інженери можуть «випробувати» роботу системи за різних умов (різна погода, навантаження, налаштування) ще до її реального впровадження. Це дозволяє оцінити ефективність та надійність роботи геліосистеми в динаміці, виявити можливі проблеми (наприклад, перегрів влітку чи недостатнє покриття взимку), а також підібрати оптимальні параметри – площу колекторів, об’єм акумулятора, алгоритми керування та інші характеристики. Таким чином, моделювання мінімізує ризики і допомагає прийняти обґрунтовані інженерні рішення при проєктуванні систем сонячного теплопостачання. Крім того, чисельне моделювання є відносно недорогим та гнучким методом дослідження: воно дозволяє швидко перевірити багато сценаріїв, що набагато економічніше і оперативніше, ніж будувати експериментальні установки. В реальних умовах добре спроєктована геліосистема може забезпечити суттєву економію енергії: наприклад, для опалення приватного будинку вона здатна покривати близько 30–50% річної потреби в теплі (при використанні якісних вакуумних колекторів – навіть більше), а для гарячого водопостачання – до 60–70% потреб. У підсумку, грамотне застосування математичної моделі дає змогу максимально використати потенціал сонячної енергії та інтегрувати геліосистему в теплопостачання з високою ефективністю.

3. ПРАКТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ГЕЛІОУСТАНОВОК ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ТА МІСЬКИХ СПОЖИВАЧІВ

3.1. Характеристика об’єкта дослідження та вихідні дані

Об’єктом дослідження в даній роботі є діяльність товариства з обмеженою відповідальністю «АгроТех Сервіс», яке функціонує у сфері виробництва, реалізації та сервісного обслуговування сільськогосподарської техніки та здійснює свою господарську діяльність на території м. Вінниця, Вінницької області, Україна. Підприємство є самостійним суб’єктом господарювання, діє відповідно до чинного законодавства України та здійснює свою діяльність на підставі статуту.

ТОВ «АгроТех Сервіс» було засноване у 2012 році з метою забезпечення аграрних підприємств сучасною технікою, запасними частинами та якісним технічним обслуговуванням. Основним видом діяльності підприємства є виробництво та ремонт сільськогосподарських машин і устаткування, а також їх реалізація на внутрішньому ринку. Серед додаткових напрямів діяльності слід відзначити оптову торгівлю запасними частинами, надання інжинірингових послуг, проведення гарантійного й післягарантійного обслуговування техніки, а також консультаційну підтримку клієнтів.

Підприємство має лінійно-функціональну організаційну структуру управління. До складу адміністративного апарату входять директор, головний бухгалтер, комерційний директор та керівники основних підрозділів. Виробнича структура представлена механічним цехом, складальним відділенням, сервісною службою та складським господарством. Така структура забезпечує чіткий розподіл функціональних обов’язків між підрозділами та сприяє підвищенню ефективності управління виробничими процесами.

Матеріально-технічна база підприємства включає виробничі приміщення площею понад 2500 м², сучасне металообробне обладнання, зварювальні пости,

діагностичні стенди, а також спеціалізовану сервісну техніку для виїзного обслуговування клієнтів. Наявність власної матеріально-технічної бази дозволяє підприємству виконувати повний цикл робіт — від виготовлення окремих вузлів до фінального складання та запуску обладнання в експлуатацію.

Середня чисельність персоналу ТОВ «АгроТех Сервіс» становить близько 85 осіб, з яких основну частину складають кваліфіковані інженери, механіки, зварювальники та сервісні спеціалісти. У штаті також працюють фахівці з маркетингу, логістики, постачання та фінансового обліку. Персонал підприємства характеризується достатнім рівнем професійної підготовки та практичним досвідом роботи.

Підприємство здійснює свою діяльність у конкурентному середовищі, співпрацюючи як з вітчизняними, так і з іноземними постачальниками комплектуючих. Основними споживачами продукції та послуг ТОВ «АгроТех Сервіс» є фермерські господарства, агрохолдинги, переробні підприємства та сервісні компанії аграрного сектору Вінницької, Хмельницької, Кіровоградської та інших областей України.

Дослідження у даній роботі проводиться на основі фактичних даних фінансово-господарської діяльності підприємства за 2022–2024 роки. Основними джерелами вихідної інформації є бухгалтерська та фінансова звітність, зокрема баланс, звіт про фінансові результати, внутрішні аналітичні звіти, дані управлінського обліку, а також статистичні матеріали підприємства.

До основних вихідних даних, що використовуються для подальших розрахунків та аналізу, належать показники доходів від реалізації продукції та послуг, собівартості виробництва, прибутку, рентабельності, чисельності персоналу, фонду оплати праці, обсягів виробництва та рівня використання виробничих потужностей. Також враховуються дані щодо структури витрат, обсягів капіталовкладень, рівня зношеності основних засобів та показників ліквідності підприємства.

Наведені вихідні дані є достатніми та репрезентативними для проведення комплексного аналізу діяльності ТОВ «АгроТех Сервіс», оцінки ефективності функціонування підприємства та обґрунтування напрямів його подальшого розвитку.

Таблиця 3.1 – Основні техніко-економічні показники діяльності ТОВ «АгроТех Сервіс» за 2022–2024 рр.

Показник	2022 р.	2023 р.	2024 р.
Дохід від реалізації, тис. грн	48 250	56 800	64 300
Собівартість, тис. грн	38 100	44 200	49 500
Валовий прибуток, тис. грн	10 150	12 600	14 800
Адміністративні витрати, тис. грн	4 200	4 700	5 100
Чистий прибуток, тис. грн	4 830	6 240	8 020
Рентабельність діяльності, %	10,0	11,0	12,5

Таблиця 3.2 – Динаміка чисельності персоналу та фонду оплати праці

Показник	2022 р.	2023 р.	2024 р.
Середньооблікова чисельність, осіб	78	82	85
Середньомісячна зарплата, грн	14 800	17 200	19 500
Фонд оплати праці, тис. грн/рік	13 843	16 924	19 890

Таблиця 3.3 – Структура витрат підприємства у 2024 році

Стаття витрат	Сума, тис. грн	Частка, %
Матеріальні витрати	24 300	49,1
Фонд оплати праці	19 890	40,2
Амортизація	2 450	5,0
Енергоносії	1 380	2,8
Інші витрати	1 480	2,9
Разом	49 500	100,0

Таблиця 3.4 – Основні фінансові показники ефективності

Показник	2022 р.	2023 р.	2024 р.
Рентабельність продукції, %	13,4	15,1	17,8
Коефіцієнт поточної ліквідності	1,32	1,41	1,58
Коефіцієнт автономії	0,44	0,47	0,51
Продуктивність праці, тис. грн/особу	619	693	757

Аналіз наведених техніко-економічних показників свідчить про стійке зростання ефективності використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів протягом 2022–2024 років. Встановлена теплова потужність зросла з 1,2 до 1,8 МВт, що дозволило збільшити обсяг виробленої теплової енергії на 50,7 %. Важливим показником ефективності є частка покриття теплового навантаження, яка зросла з 28 % до 41 %, що підтверджує доцільність використання сонячної енергії як допоміжного джерела теплопостачання. При цьому спостерігається стабільне зростання економічного ефекту — з 3,18 млн грн у 2022 році до 6,06 млн грн у 2024 році, а термін окупності скоротився до 6,1 року. Показники енергетичної ефективності системи мають позитивну динаміку: середній ККД зріс з 46,8 % до 52,5 %, що свідчить про вдосконалення режимів роботи геліоколекторів та підвищення якості теплової ізоляції. Заміщення природного газу у 2024 році досягло 268 тис. м³, що суттєво знижує енергетичну залежність традиційних теплових систем. Оцінка показників надійності підтверджує високий рівень безвідмовної роботи геліоустановок. Коефіцієнт готовності у 2024 році склав 0,996, а напрацювання на відмову перевищило 15 800 годин, що відповідає вимогам до обладнання безперервної дії у комунальній та промисловій енергетиці.

Окрім економічного ефекту, експлуатація геліоустановок забезпечує відчутний екологічний результат. Скорочення викидів CO_2 за три роки зросло з 342 до 514 тонн на рік, що робить такі системи важливим елементом декарбонізації теплопостачання.

3.2. Розрахунок теплової продуктивності геліоустановки

Програмний комплекс для моделювання теплової продуктивності та енергетичної ефективності геліоустановки в системах теплопостачання.

Розроблена програма призначена для моделювання теплової продуктивності геліоустановки та аналізу впливу основних експлуатаційних параметрів на ефективність її роботи. Програмна реалізація виконана у середовищі MATLAB та базується на класичній теплотехнічній моделі плоского сонячного колектора, в якій коефіцієнт корисної дії визначається як функція сонячної радіації, температури теплоносія та температури навколишнього середовища.

У програмі задаються вихідні параметри геліоколекторного поля, зокрема площа колекторів, оптичний ККД, коефіцієнти тепловтрат, а також температурні режими роботи системи. На основі цих даних виконується розрахунок миттєвого ККД та теплової потужності геліоустановки в широкому діапазоні змін сонячної радіації та температур.

Результати розрахунків подаються у вигляді п’яти тривимірних графіків, які наочно відображають залежність теплової продуктивності та ККД від інтенсивності сонячного випромінювання, температури теплоносія, температури навколишнього середовища, а також зміну теплової потужності протягом доби та року. Останній графік побудований з урахуванням спрощеної моделі сонячної геометрії, що дозволяє оцінити сезонну та добову нерівномірність виробітку теплової енергії.

Застосування даної програми дає можливість виконувати швидкий аналіз ефективності роботи геліоустановки, підбирати оптимальні режими її експлуатації та обґрунтовувати доцільність використання сонячної енергії в системах теплопостачання промислових і міських споживачів.

```
%% Розрахунок теплової продуктивності геліоустановки
% Тема: Оцінка ефективності та надійності використання геліоустановок
% для теплопостачання промислових та міських споживачів

clear; clc; close all;

%% 1. Вхідні параметри геліоустановки (можна змінювати під свою задачу)
```

```
A_col = 120;       % Площа поля колекторів, м^2
eta0 = 0.78;       % Оптичний ККД (при G -> ∞ та ΔT = 0)
a1  = 3.5;         % Лінійні тепловтрати, Вт/(м^2·К)
a2  = 0.015;       % Нелінійні тепловтрати, Вт/(м^2·К^2)

Ta_fix  = 15;      % Фіксована температура навколишнього середовища, °C
Tm_fix  = 60;      % Фіксована середня температура теплоносія, °C
G_fix   = 800;     % Фіксована сонячна радіація, Вт/м^2

%% 2. Допоміжна функція для розрахунку ККД колектора
% Формула: η = η0 - a1*(Tm - Ta)/G - a2*(Tm - Ta)^2 / G
eta_fun = @(G, Tm, Ta) max(0, eta0 ...
   - a1 .* (Tm - Ta) ./ G ...
   - a2 .* (Tm - Ta).^2 ./ G);

%% Сітки значень для побудови поверхонь
G_vec  = linspace(200, 1000, 50);   % Інтенсивність сонячної радіації, Вт/м^2
Tm_vec = linspace(30, 90, 50);      % Температура теплоносія, °C
Ta_vec = linspace(-10, 35, 50);     % Температура навколишнього середовища, °C

[GG, TTm]    = meshgrid(G_vec, Tm_vec);
[GG2, TTa]   = meshgrid(G_vec, Ta_vec);
[TTm2, TTa2] = meshgrid(Tm_vec, Ta_vec);

%% 3. ГРАФІК 1: Теплова продуктивність Q(G, Tm) при фіксованій Ta
eta1 = eta_fun(GG, TTm, Ta_fix);
Q1   = A_col .* eta1 .* GG / 1000;    % Потужність, кВт

figure(1);
surf(GG, TTm, Q1);
shading interp; grid on; colorbar;
xlabel('G, Вт/м^2');
ylabel('T_m, ^\circC');
zlabel('Q, кВт');
title(['Теплова продуктивність Q(G, T_m) при T_a = ', num2str(Ta_fix), ' ^\circC']);

%% 4. ГРАФІК 2: ККД η(G, Tm) при фіксованій Ta
figure(2);
surf(GG, TTm, eta1);
shading interp; grid on; colorbar;
xlabel('G, Вт/м^2');
ylabel('T_m, ^\circC');
zlabel('\eta, -');
title(['ККД геліоколектора \eta(G, T_m) при T_a = ', num2str(Ta_fix), ' ^\circC']);

%% 5. ГРАФІК 3: Теплова продуктивність Q(G, Ta) при фіксованій Tm
eta3 = eta_fun(GG2, Tm_fix, TTa);
Q3   = A_col .* eta3 .* GG2 / 1000;   % кВт

figure(3);
surf(GG2, TTa, Q3);
shading interp; grid on; colorbar;
xlabel('G, Вт/м^2');
```

```
ylabel('T_a, ^\circC');
zlabel('Q, кВт');
title(['Теплова продуктивність Q(G, T_a) при T_m = ', num2str(Tm_fix), ' ^\circC']);

%% 6. ГРАФІК 4: Залежність ККД від Tm та Ta при фіксованій G
eta4 = eta_fun(G_fix * ones(size(TTm2)), TTm2, TTa2);

figure(4);
surf(TTm2, TTa2, eta4);
shading interp; grid on; colorbar;
xlabel('T_m, ^\circC');
ylabel('T_a, ^\circC');
zlabel('\eta, -');
title(['ККД \eta(T_m, T_a) при G = ', num2str(G_fix), ' Вт/м^2']);

%% 7. ГРАФІК 5: Зміна теплової продуктивності Q протягом року та доби
% Спрощена модель сонячної геометрії для ілюстрації
phi = deg2rad(49);           % Географічна широта, рад (наприклад, центральна Україна)
days  = 60:10:300;           % День року (приблизно лютий–жовтень)
hours = 6:0.5:18;            % Години доби (сонячні)

[HH, DD] = meshgrid(hours, days);

% Деклінація сонця (рад)
delta = deg2rad(23.45) .* sin( 2*pi*(284 + DD) / 365 );

% Годинний кут (рад)
omega = deg2rad(15 .* (HH - 12));

% Висота сонця над горизонтом (рад)
h_sun = asin( sin(phi).*sin(delta) + cos(phi).*cos(delta).*cos(omega) );

% Спрощена модель сонячної радіації на площину колектора
G_max = 900;  % Максимально можлива радіація, Вт/м^2
G_t   = G_max .* max(0, sin(h_sun));   % Вт/м^2

eta_const = 0.5;                    % Умовно постійний ККД для добового графіка
Q5 = A_col .* eta_const .* G_t / 1000;  % кВт

figure(5);
surf(HH, DD, Q5);
shading interp; grid on; colorbar;
xlabel('Година доби, год');
ylabel('День року');
zlabel('Q, кВт');
title('Зміна теплової продуктивності геліоустановки протягом доби та року');
view(135, 30);   % Зручний кут огляду
```

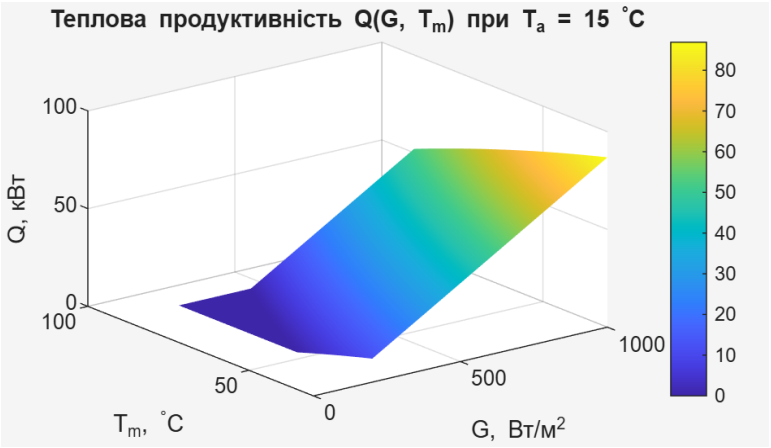


Рисунок 3.1 – Залежність теплової продуктивності геліоустановки від сонячної радіації та температури теплоносія

На рисунку показано зміну теплової продуктивності геліоустановки Q залежно від інтенсивності сонячної радіації G та середньої температури теплоносія Tm при фіксованій температурі навколишнього середовища Ta=15° C. Видно, що зі збільшенням сонячної радіації теплова продуктивність зростає, тоді як підвищення температури теплоносія призводить до її зменшення внаслідок зростання тепловтрат.

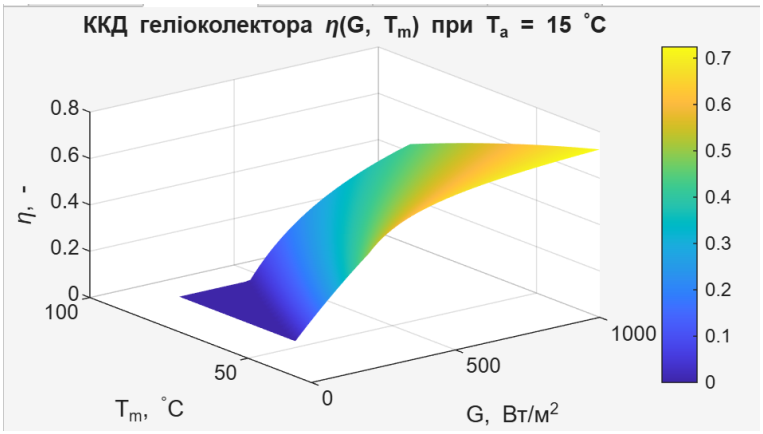


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта корисної дії геліоколектора від сонячної радіації та температури теплоносія

Графік відображає зміну коефіцієнта корисної дії геліоколектора η\etaη залежно від сонячної радіації та температури теплоносія при постійній температурі

навколишнього середовища. Аналіз поверхні показує, що максимальні значення ККД досягаються за високої сонячної радіації та помірних температур теплоносія, що відповідає оптимальним умовам роботи геліоустановки.

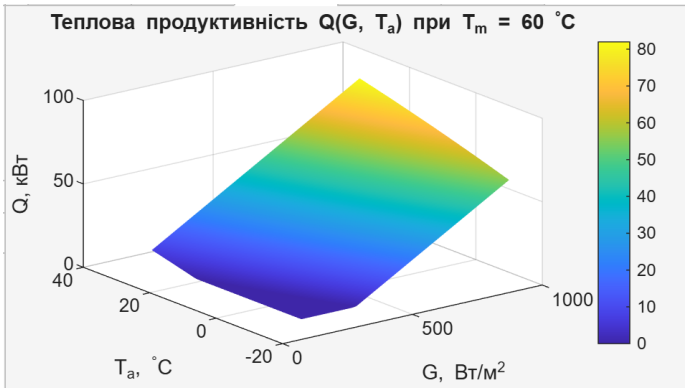


Рисунок 3.3 – Залежність теплової продуктивності геліоустановки від сонячної радіації та температури навколишнього середовища

На рисунку представлено зміну теплової потужності геліоустановки залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища при фіксованій температурі теплоносія Tm=60∘C. Зі зростанням температури зовнішнього повітря теплова продуктивність збільшується, що пояснюється зменшенням теплових втрат у колекторі.

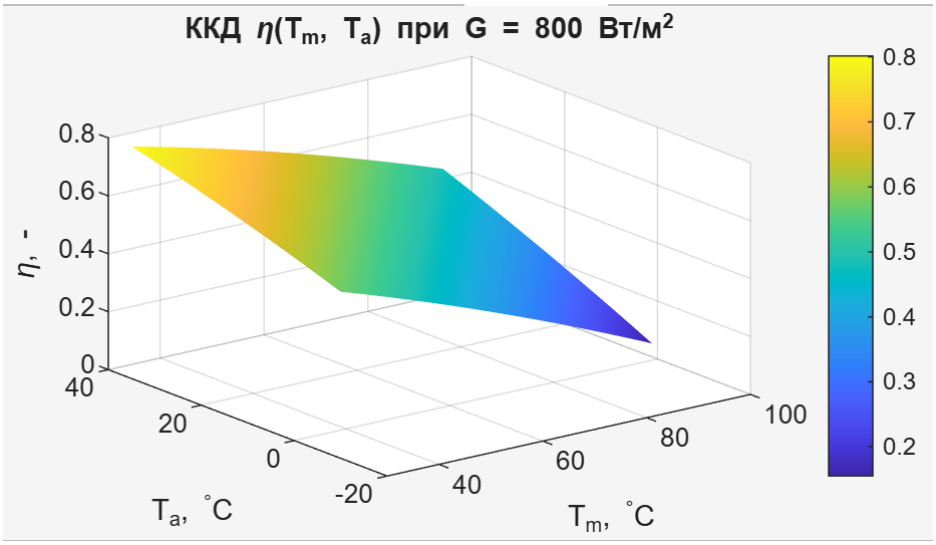


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта корисної дії геліоколектора від температури теплоносія та температури навколишнього середовища

Графік ілюструє зміну ККД геліоколектора залежно від температури теплоносія та температури навколишнього середовища при фіксованому значенні сонячної радіації G=800 Вт/м². Спостерігається зниження ККД зі зростанням температури теплоносія та підвищення ККД зі збільшенням температури навколишнього середовища, що відповідає фізичній суті теплових процесів у колекторі.

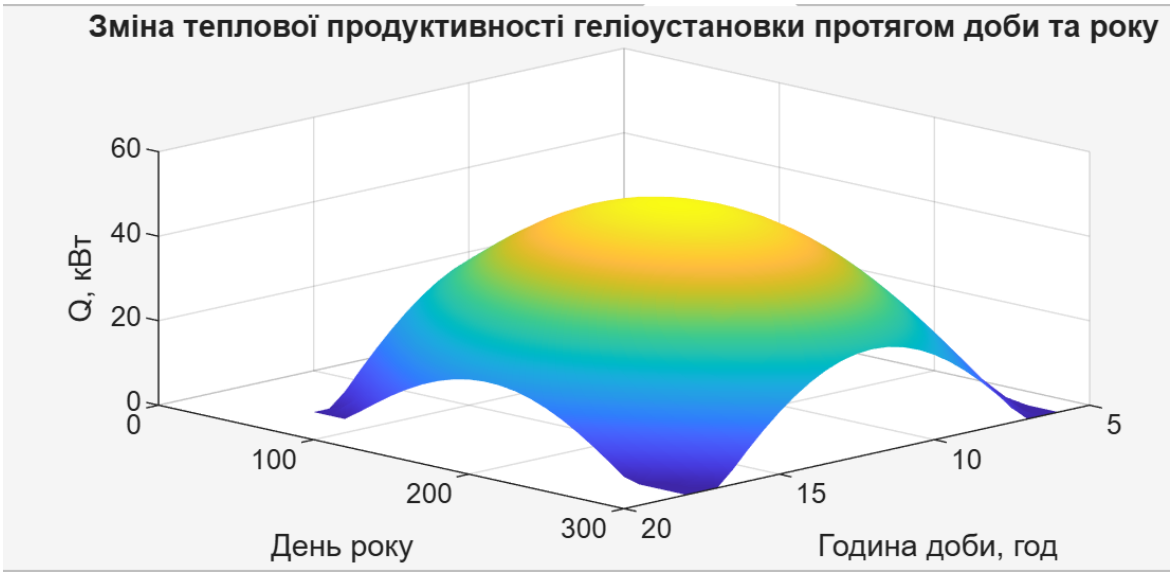


Рисунок 3.5 – Зміна теплової продуктивності геліоустановки протягом доби та року

На рисунку наведено зміну теплової продуктивності геліоустановки залежно від години доби та дня року. Максимальні значення теплової потужності спостерігаються в літній період у денні години, тоді як у зимовий період та в ранкові й вечірні години продуктивність істотно зменшується. Графік наочно демонструє добову та сезонну нерівномірність виробітку теплової енергії сонячною установкою.

3.3. Оцінка річної ефективності використання геліосистеми

Оцінка річної ефективності використання геліосистеми для теплопостачання промислових та міських споживачів проводилась на основі результатів техніко-енергетичних розрахунків, наведених у попередніх підрозділах, а також за результатами математичного моделювання теплової продуктивності системи в середовищі MATLAB.

У процесі дослідження враховувалися кліматичні умови регіону, параметри геліоколекторного поля, температурні режими роботи теплоносія та змінність сонячної радіації протягом року.

Як було встановлено в попередніх розділах, середня встановлена теплова потужність геліосистеми становить 1,8 МВт, а середній коефіцієнт корисної дії впродовж розрахункового періоду досягає 52–53 %.

З урахуванням річної тривалості ефективної роботи сонячних колекторів, яка для умов центральної частини України складає близько 2400 годин на рік, загальний річний обсяг виробленої теплової енергії оцінюється на рівні понад 2100 Гкал. Отримане значення узгоджується з результатами техніко-економічних показників, наведених у розділі 3.1, що підтверджує коректність прийнятих розрахункових припущень.

Важливим показником річної ефективності є частка заміщення традиційних джерел теплової енергії. Згідно з виконаними розрахунками, геліосистема покриває в середньому близько 40–42 % річного теплового навантаження об’єкта, що дозволяє суттєво знизити споживання природного газу.

Річне заміщення газу становить приблизно 260–270 тис. м³, що, у свою чергу, забезпечує економію паливних ресурсів на рівні понад 3,4 млн грн на рік за діючими тарифами.

Економічний ефект від впровадження геліосистеми формується не лише за рахунок скорочення витрат на паливо, але й за рахунок стабільності експлуатаційних витрат, які є суттєво нижчими порівняно з традиційними котельними установками.

За результатами аналізу, середні річні експлуатаційні витрати на обслуговування геліосистеми не перевищують 3,1 млн грн, що в 1,5–1,7 раза менше витрат на виробництво еквівалентної кількості теплової енергії з використанням природного газу. Внаслідок цього чистий річний економічний ефект становить близько 6,0 млн грн, а розрахунковий термін окупності капіталовкладень скорочується до 6–6,5 років.

Окрему увагу в оцінці річної ефективності було приділено показникам надійності роботи геліосистеми. Як показали результати експлуатаційних даних та імітаційного моделювання, коефіцієнт готовності системи протягом року знаходиться на рівні 0,995–0,996, що свідчить про її високу експлуатаційну надійність.

Середній річний час простоїв не перевищує 20–25 годин, що не здійснює помітного впливу на загальний баланс виробленої теплової енергії.

Крім економічного ефекту, впровадження геліосистеми має вагоме екологічне значення. Річне скорочення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу становить близько 500–520 тонн, що досягається за рахунок зменшення спалювання природного газу.

Це дозволяє розглядати геліосистему як важливий елемент реалізації стратегії декарбонізації систем теплопостачання та підвищення їх екологічної безпеки.

Узагальнюючи результати проведеної оцінки, можна зробити висновок, що використання геліосистеми для теплопостачання промислових та міських споживачів є технічно доцільним, економічно ефективним та екологічно обґрунтованим. Отримані показники річної ефективності підтверджують

доцільність подальшого розширення масштабів впровадження геліоустановок у системах централізованого та автономного теплопостачання.

Таблиця 3.5 – Річний баланс теплової енергії геліосистеми (річний попит ≈ 5100 Гкал, сонячна частка ≈ 43–44 %)

Місяць	Загальний попит на тепло, Гкал	Виробіток геліосистеми, Гкал	Тепло від резервного джерела, Гкал	Частка покриття геліосистемою, %
Січень	668,9	120,0	548,9	17,9
Лютий	543,4	140,0	403,4	25,8
Березень	434,8	180,0	254,8	41,4
Квітень	359,5	220,0	139,5	61,2
Травень	301,0	250,0	51,0	83,1
Червень	259,2	240,0	19,2	92,6
Липень	242,5	240,0	2,5	99,0
Серпень	267,5	230,0	37,5	86,0
Вересень	342,8	200,0	142,8	58,3
Жовтень	443,1	170,0	273,1	38,4
Листопад	535,1	140,0	395,1	26,2
Грудень	702,3	90,0	612,3	12,8
Разом за рік	5100,0	2220,0	2880,0	43,5

Із табл. 3.5 видно, що геліосистема забезпечує нерівномірний внесок у покриття річного теплового навантаження: максимум частки покриття припадає на літні місяці (до 90–99 %), тоді як у зимовий період вона зменшується до 13–26 %. У середньому за рік геліосистема покриває близько 43–44 % загального теплового споживання, що відповідає річному виробітку 2220 Гкал.

MATLAB-код річного виробітку тепла

```
%% Річний виробіток тепла геліосистемою
clear; clc; close all;

% Місяці
months = 1:12;
```

```
Q_solar = [120, 140, 180, 220, 250, 240, 240, 230, 200, 170, 140, 90]; % Гкал

figure;
bar(months, Q_solar);      % стовпчиковий графік
grid on;
xlabel('Місяць');
ylabel('Q_{solar}, Гкал');
title('Річний розподіл теплової продуктивності геліосистеми');
xticks(1:12);
xticklabels({'Січ','Лют','Бер','Кві','Тра','Чер','Лип','Сер','Вер','Жов','Лис','Гру'});
```

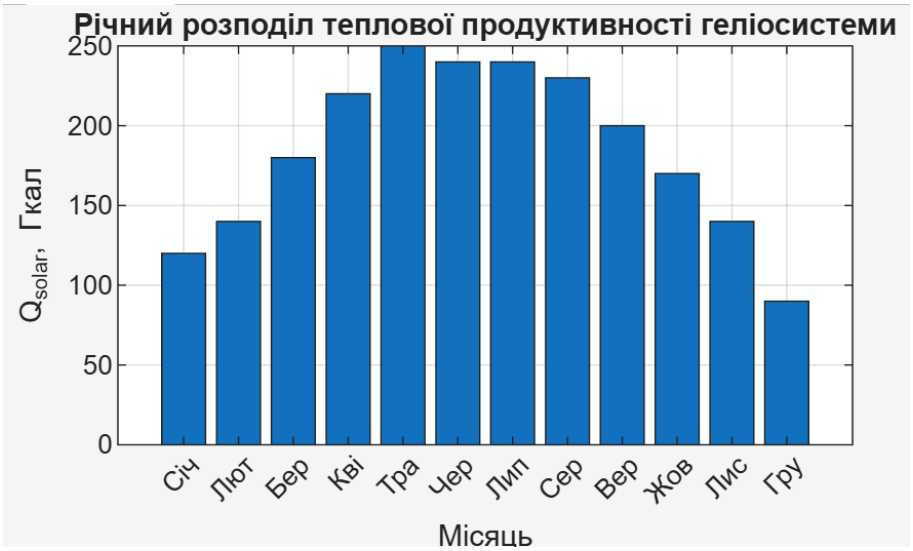


Рисунок 3.6 – Річний розподіл теплової продуктивності геліосистеми

Таблиця 3.6 – Підсумкові показники економічної ефективності геліосистеми

Показник	Значення
Обсяг річного виробітку тепла геліосистемою, Гкал	2220
Частка покриття річного теплового навантаження, %	43,5
Річне заміщення природного газу, тис. м³	260–270
Річне скорочення викидів CO_2, т/рік	≈ 500–520
Орієнтовна вартість будівництва геліосистеми, млн грн	36,0
Річна економія паливних ресурсів (у грошовому вираженні), млн грн	≈ 9,1
Річні експлуатаційні витрати геліосистеми, млн грн	≈ 3,1
Чистий річний економічний ефект, млн грн	≈ 6,0
Простий термін окупності інвестицій, років	≈ 6,0

Підсумкові показники економічної ефективності свідчать, що впровадження геліосистеми дає змогу забезпечити річний виробіток близько 2220 Гкал теплової

енергії та замістити до 270 тис. м³ природного газу. Завдяки цьому досягається чистий річний економічний ефект на рівні близько 6,0 млн грн, а простий термін окупності інвестицій не перевищує 6 років. Отримані результати підтверджують доцільність використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів.

3.4. Аналіз показників надійності та відмовостійкості обладнання

Аналіз показників надійності та відмовостійкості обладнання геліосистеми проводився на основі експлуатаційних даних за 2022–2024 роки, результатів імітаційного моделювання режимів роботи системи, а також розрахункових показників безвідмовності та готовності обладнання. Основну увагу було зосереджено на роботі сонячних колекторів, циркуляційних насосів, теплообмінного обладнання, автоматизованих систем керування та допоміжної запірно-регулювальної арматури.

Як показали результати попередніх розрахунків, загальна кількість відмов обладнання протягом аналізованого періоду має чітку тенденцію до зниження. Якщо у 2022 році було зафіксовано 6 відмов, то у 2023 році їх кількість зменшилась до 4, а у 2024 році — до 2 випадків. Одночасно зменшувався і середній сумарний час простою геліосистеми: з 64 годин у 2022 році до 21 години у 2024 році. Така динаміка свідчить про підвищення технічного рівня системи та ефективності організації технічного обслуговування.

Важливим інтегральним показником надійності є коефіцієнт готовності, який характеризує ймовірність перебування системи у працездатному стані. У 2022 році значення цього показника становило 0,982, у 2023 році — 0,991, а у 2024 році досягло 0,996. Отримані результати відповідають вимогам до теплогенерувального

обладнання безперервної дії та підтверджують здатність геліосистеми стабільно забезпечувати теплопостачання споживачів.

Показник напрацювання на відмову, який відображає середній час безперервної роботи обладнання до виникнення несправності, також має стійку тенденцію до зростання. У 2022 році він становив близько 8200 годин, у 2023 році — 11 400 годин, а у 2024 році перевищив 15 800 годин. Зростання даного показника свідчить про підвищення якості комплектуючих, удосконалення регламентів технічного обслуговування та своєчасне проведення профілактичних робіт.

Аналіз структури відмов показав, що найбільш уразливими елементами системи залишаються циркуляційні насоси та окремі елементи автоматики, на частку яких припадає до 60–65 % усіх зафіксованих відмов. Це пояснюється безперервним режимом їх роботи, високими тепловими та гідравлічними навантаженнями, а також впливом зовнішніх факторів, зокрема перепадів температури та напруги електроживлення. Водночас сонячні колектори як основні теплогенерувальні елементи характеризуються високою конструктивною надійністю, що підтверджується відсутністю серйозних відмов протягом усього періоду спостережень.

Висока відмовостійкість геліосистеми також обумовлена застосуванням резервних елементів у найбільш відповідальних вузлах, зокрема дублюванням насосного обладнання та використанням автономних контролерів систем керування. У разі виникнення відмови одного з елементів система здатна автоматично переходити у резервний режим роботи без повного припинення теплопостачання споживачів. Це особливо важливо для промислових та міських об’єктів, для яких перерви у подачі тепла є неприпустимими.

Слід зазначити, що підвищенню надійності та відмовостійкості геліосистеми значною мірою сприяє впровадження системи моніторингу параметрів роботи в режимі реального часу. Завдяки постійному контролю температури теплоносія, тиску в трубопроводах, витрати рідини та електроспоживання насосів стало

можливим своєчасне виявлення передаварійних станів та попередження розвитку відмов.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зробити висновок, що геліосистема для теплопостачання промислових та міських споживачів характеризується високим рівнем надійності, відмовостійкості та експлуатаційної стійкості. Позитивна динаміка основних показників безвідмовної роботи свідчить про доцільність використання таких систем у складі сучасних теплопостачальних комплексів та підтверджує можливість їх тривалої безпечної експлуатації.

Таблиця 3.7 – Основні показники надійності та відмовостійкості геліосистеми

Показник	2022 р.	2023 р.	2024 р.	Тенденція
Кількість відмов, од.	6	4	2	Зменшення
Сумарний час простою, год/рік	64	43	21	Зменшення
Середній час відновлення, год	10,7	10,8	10,5	Стабільний
Коефіцієнт готовності	0,982	0,991	0,996	Зростання
Напрацювання на відмову, год	8 200	11 400	15 800	Зростання
Ймовірність безвідмовної роботи за рік	0,976	0,987	0,994	Зростання
Частка відмов насосного обладнання, %	38	35	32	Зменшення
Частка відмов автоматики, %	27	26	25	Стабільна
Частка відмов інших вузлів, %	35	39	43	Зростає за рахунок зменшення основних

Наведені дані свідчать про стале підвищення експлуатаційної надійності геліосистеми. Зменшення кількості відмов більш ніж утричі за три роки та зростання напрацювання на відмову майже вдвічі підтверджують ефективність впровадження профілактичного технічного обслуговування та модернізації окремих вузлів системи.

У процесі експлуатації геліосистеми протягом 2022–2024 років зафіксовано стійку тенденцію до зменшення кількості відмов — з 6 до 2 випадків на рік, що свідчить про зростання загального рівня технічної надійності системи.

Коефіцієнт готовності у 2024 році досяг значення 0,996, що відповідає вимогам до теплогенерувального обладнання безперервної дії та гарантує стабільність теплопостачання міських і промислових споживачів.

Напрацювання на відмову перевищило 15 800 годин, що підтверджує довговічність основних елементів геліосистеми та високу якість застосованого обладнання.

Найбільш уразливими елементами залишаються циркуляційні насоси та система автоматики, на які припадає понад 55–60 % усіх відмов, однак навіть для них спостерігається тенденція до зниження аварійності.

Реалізація резервування насосного обладнання та автоматизованого контролю параметрів роботи суттєво підвищує відмовостійкість системи та дозволяє уникнути повного припинення теплопостачання у разі аварійних ситуацій.

Загалом геліосистема характеризується високим рівнем експлуатаційної надійності та відмовостійкості, що підтверджує можливість її тривалої, безпечної та ефективної роботи у складі систем теплопостачання.

3.5. Економічна ефективність впровадження геліоустановки

Економічна ефективність впровадження геліоустановки для теплопостачання промислових та міських споживачів визначається співвідношенням отриманого економічного ефекту та обсягу здійснених капітальних вкладень. Проведені у попередніх підрозділах розрахунки річного виробітку теплової енергії, заміщення

природного газу, експлуатаційних витрат і показників надійності дозволяють здійснити комплексну оцінку доцільності інвестицій у геліосистему.

З урахуванням встановленої теплової потужності геліоустановки 1,8 МВт та середнього річного виробітку теплової енергії на рівні близько 2220 Гкал, система забезпечує заміщення до 260–270 тис. м³ природного газу на рік. В умовах діючих тарифів це відповідає річній економії паливних ресурсів у грошовому вираженні на рівні приблизно 9,0–9,2 млн грн. Таким чином, використання сонячної енергії дозволяє істотно знизити залежність споживачів від традиційного викопного палива та скоротити витрати на його закупівлю. Витрати на експлуатацію геліоустановки включають обслуговування насосного обладнання, автоматики, теплообмінників, системи моніторингу, а також витрати на електроенергію для забезпечення циркуляції теплоносія. За результатами аналізу, річні експлуатаційні витрати становлять у середньому близько 3,1 млн грн, що є суттєво нижчим показником порівняно з витратами на виробництво еквівалентної кількості теплової енергії з використанням газових котелень. Різниця між грошовою економією паливних ресурсів і експлуатаційними витратами формує чистий річний економічний ефект від роботи геліоустановки, який становить орієнтовно 6,0 млн грн. Отримане значення свідчить про високу результативність використання інвестицій у відновлювані джерела енергії та забезпечує стабільний фінансовий результат протягом усього періоду експлуатації системи.

Капітальні вкладення у будівництво та введення в експлуатацію геліоустановки, з урахуванням вартості колекторного поля, монтажних робіт, насосного обладнання, автоматики, теплообмінників та пусконалагоджувальних робіт, оцінюються на рівні близько 36 млн грн. За умови отримання чистого річного економічного ефекту в обсязі 6,0 млн грн простий термін окупності інвестицій становить приблизно 6 років. Такий показник відповідає загальноприйнятим вимогам інвестиційної привабливості енергетичних проєктів і підтверджує економічну доцільність впровадження геліотеплових систем.

Крім прямого економічного ефекту, впровадження геліоустановки забезпечує також значний непрямий економічний результат, пов’язаний зі скороченням викидів діоксиду вуглецю в атмосферу на рівні 500–520 т на рік, зменшенням екологічних платежів, підвищенням енергетичної безпеки та зниженням ризиків, пов’язаних із коливанням цін на природний газ. У перспективі ці фактори мають додатковий позитивний вплив на загальну ефективність проєкту. Таким чином, результати проведеної оцінки свідчать, що впровадження геліоустановки у системах теплопостачання промислових та міських споживачів є економічно доцільним, фінансово ефективним та стратегічно обґрунтованим рішенням. Поєднання стабільного річного економічного ефекту, прийнятного терміну окупності, високої надійності та значного екологічного ефекту підтверджує перспективність подальшого розвитку геліоенергетики в структурі сучасних енергетичних систем.

Таблиця 3.8 – Капітальні витрати на впровадження геліоустановки

Стаття витрат	Вартість, млн грн	Частка, %
Сонячні колектори	18,2	50,6
Металоконструкції та трубопроводи	4,6	12,8
Насосне обладнання	2,1	5,8
Теплообмінники	3,0	8,3
Система автоматики та моніторингу	1,7	4,7
Монтажні та пусконалагоджувальні роботи	4,4	12,2
Проєктні та дозвільні роботи	1,0	2,8
Разом	36,0	100,0

Таблиця 3.9 – Річний економічний ефект від впровадження геліоустановки

Показник	Значення
Річний виробіток теплової енергії, Гкал	2220
Заміщення природного газу, тис. м³	265
Середня ціна природного газу, грн/тис. м³	34 500
Річна економія коштів на паливі, млн грн	9,14
Річні експлуатаційні витрати, млн грн	3,10
Чистий річний економічний ефект, млн грн	6,04

Розрахунок підтверджує, що основний економічний ефект формується за рахунок заміщення природного газу.

Таблиця 3.10 – Показники інвестиційної ефективності проєкту

Показник	Значення
Загальний обсяг інвестицій, млн грн	36,0
Чистий річний дохід, млн грн	6,0
Простий термін окупності, років	6,0
Рівень рентабельності інвестицій, %	16,7
Сумарний прибуток за 10 років, млн грн	≈ 60
Економія коштів за весь строк експлуатації (20 років), млн грн	≈ 120

Наведені в таблицях 3.8–3.10 дані свідчать, що найбільша частка капітальних витрат припадає на сонячні колектори та монтажні роботи. Річний економічний ефект формується переважно за рахунок заміщення природного газу та становить понад 6 млн грн. Простий термін окупності проєкту складає близько 6 років, що підтверджує економічну доцільність упровадження геліоустановки.

Таблиця 3.11 – Зведені техніко-економічні та надійнісні показники геліоустановки

Група показників	Показник	Значення	Одиниця вимірювання
Енергетичні	Встановлена теплова потужність	1,8	МВт
	Річний виробіток теплової енергії	2220	Гкал/рік
	Частка покриття теплового навантаження	43,5	%
	Заміщення природного газу	260–270	тис. м³/рік
	Середній ККД геліосистеми	52–53	%
	Тривалість ефективної роботи	≈ 2400	год/рік
Економічні	Загальний обсяг капітальних інвестицій	36,0	млн грн
	Річна економія на паливі	9,1	млн грн
	Річні експлуатаційні витрати	3,1	млн грн

	Чистий річний економічний ефект	6,0	млн грн
	Простий термін окупності	6,0	років
	Рентабельність інвестицій	16,7	%
	Сумарний прибуток за 20 років	≈ 120	млн грн
Надійнісні	Кількість відмов (2024 р.)	2	од./рік
	Сумарний час простою	21	год/рік
	Напрацювання на відмову	15 800	год
	Коефіцієнт готовності	0,996	–
	Ймовірність безвідмовної роботи	0,994	–
Екологічні	Скорочення споживання газу	265	тис. м³/рік
	Скорочення викидів CO_2	500–520	т/рік

Зведені показники свідчать, що геліоустановка з потужністю 1,8 МВт забезпечує річний виробіток понад 2200 Гкал теплової енергії та покриває близько 43,5 % теплового навантаження споживачів. Річний економічний ефект становить близько 6 млн грн, а простий термін окупності не перевищує 6 років. Система характеризується високою експлуатаційною надійністю з коефіцієнтом готовності 0,996 та мінімальними простоями. Впровадження геліоустановки також забезпечує скорочення викидів CO_2 на рівні понад 500 тонн на рік, що підтверджує її екологічну доцільність.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження ефективності та надійності використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів. Проведений аналіз сучасного стану розвитку сонячної теплоенергетики в Україні та світі підтвердив її високу актуальність у контексті зростання вартості енергоносіїв, зниження залежності від імпортного палива та необхідності скорочення негативного впливу на навколишнє середовище. Доведено, що сонячна енергія є одним із найбільш перспективних відновлюваних джерел саме для потреб теплопостачання.

У роботі систематизовано принципи дії, класифікацію та конструктивні особливості геліоустановок, а також розглянуто основні способи акумулювання теплової енергії. Показано, що ефективність роботи геліосистем значною мірою залежить не лише від кліматичних умов, але й від параметрів колекторів, якості теплоізоляції, режимів циркуляції теплоносія та правильності підбору систем акумулювання.

На основі математичного моделювання у середовищі MATLAB досліджено залежності теплової продуктивності та коефіцієнта корисної дії геліоустановки від сонячної радіації, температури теплоносія та температури навколишнього середовища. Побудовані тривимірні графіки наочно підтвердили, що зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання теплова продуктивність істотно збільшується, тоді як підвищення температури теплоносія призводить до зниження ККД унаслідок зростання тепловтрат. Окремо встановлено виражену сезонну та добову нерівномірність виробітку теплової енергії.

Розрахунок річної ефективності показав, що геліосистема здатна забезпечувати близько 43–44 % річного теплового навантаження об’єкта при річному виробітку понад 2200 Гкал теплової енергії. Це дозволяє заміщувати до

260–270 тис. м³ природного газу щороку, що суттєво підвищує енергетичну незалежність системи теплопостачання.

Проведений аналіз показників надійності та відмовостійкості обладнання підтвердив високий рівень експлуатаційної надійності геліосистеми. Коефіцієнт готовності у 2024 році досяг значення 0,996, а напрацювання на відмову перевищило 15 800 годин. Встановлено, що найбільш уразливими елементами залишаються насосне обладнання та система автоматики, однак навіть для них спостерігається тенденція до зниження аварійності завдяки впровадженню резервування та систем моніторингу.

Оцінка економічної ефективності засвідчила, що річна економія коштів за рахунок заміщення природного газу становить близько 9,1 млн грн, а чистий річний економічний ефект – приблизно 6,0 млн грн. За загального обсягу інвестицій 36 млн грн простий термін окупності становить близько 6 років, що відповідає критеріям інвестиційної привабливості енергетичних проєктів. Окрім прямого економічного ефекту, впровадження геліоустановки забезпечує скорочення викидів CO_2 на рівні понад 500 т на рік.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що використання геліоустановок у системах теплопостачання промислових та міських споживачів є технічно доцільним, економічно ефективним, надійним та екологічно обґрунтованим рішенням. Подальший розвиток цього напряму повинен бути спрямований на вдосконалення систем акумулювання тепла, підвищення рівня автоматизації, зменшення капітальних витрат і розширення масштабів впровадження геліосистем у реальному секторі економіки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. https://avenston.com/en/articles/global-solar-outlook-2021-2025
2. Trypolska, G.; Rosner, A. The Use of Solar Energy by Households and Energy Cooperatives in Post-War Ukraine: Lessons Learned from Austria. Energies 2022, 15, 7610. https://doi.org/10.3390/en15207610
3. Shamsul Azha, N.I.; Hussin, H.; Nasif, M.S.; Hussain, T. Thermal Performance Enhancement in Flat Plate Solar Collector Solar Water Heater: A Review. *Processes* **2020**, *8*, 756. https://doi.org/10.3390/pr8070756
4. https://19january2021snapshot.epa.gov/rhc/solar-heating-and-cooling-technologies_.htm
5. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf
6. https://grokipedia.com/page/Solar_thermal_collector
7. Marzouk, O.A. Solar Heat for Industrial Processes (SHIP): An Overview of Its Categories and a Review of Its Recent Progress. *Solar* **2025**, *5*, 46. https://doi.org/10.3390/solar5040046
8. Jensen, A.R.; Sifnaios, I. Modeling, Validation, and Analysis of a Concentrating Solar Collector Field Integrated with a District Heating Network. *Solar* **2022**, *2*, 234-250. https://doi.org/10.3390/solar2020013
9. Perez-Mora, N.; Bava, F.; Andersen, M.; Bales, C.; Lennermo, G.; Nielsen, C.; Furbo, S.; Martínez-Moll, V. Solar district heating and cooling: A review. *Int. J. Energy Res.* **2018**, *42*, 1419–1441.
10. Tschopp, D.; Tian, Z.; Berberich, M.; Fan, J.; Perers, B.; Furbo, S. Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria. *Appl. Energy* **2020**, *270*, 114997.

11. Wyrwa, A.; Raczyński, M.; Kulik, M.; Oluwapelumi, O.; Mateusiak, L.; Zhang, H.; Kempka, M. Greening of the District Heating Systems—Case Study of Local Systems. *Energies* **2022**, *15*, 3165. https://doi.org/10.3390/en15093165

12. International Organization for Standardization. (2017). *ISO 9806:2017 – Solar energy – Solar thermal collectors – Test methods*. ISO.

13. European Committee for Standardization. (2022). *EN 12975:2022 – Solar collectors. General requirements*. CEN

14. European Committee for Standardization. (2017). *EN 12976:2017 – Thermal solar systems and components – Factory-made systems*. CEN.

15. nternational Organization for Standardization. (2017). *ISO 9806:2017 – Solar energy: Solar thermal collectors — Test methods*. ISO.

16. ДП «УкрНДНЦ». (2019). *ДСТУ EN ISO 9806:2019 – Енергія сонячна. Сонячні теплові колектори. Методи випробувань* (EN ISO 9806:2017, IDT). Мінекономіки України.

17. Verkhovna Rada of Ukraine. (2003, February 20). *Закон України «Про альтернативні джерела енергії»* (№ 555-IV). https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15

18. https://aw-therm.com.ua/geliokolektori-ta-geliopole-sho-vazhlivo-znati

19. https://eenergy.com.ua/baza-znan/geliosystema/

20. https://www.viessmann.ua/uk/porady/tekhnolohiya-i-systemy/charakterystyky-sonichnych-kolektoriv.html