

УДК 621.311:621.311.1

Валентина Коберник, <http://orcid.org/0000-0001-8727-7157>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна  
e-mail: V.S.K@ukr.net

## АНАЛІЗ СОНЯЧНОГО ПРОМИСЛОВОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Анотація.** Майбутнє України неможливе без інтеграції до європейського співтовариства, у тому числі в протидії змінам клімату. Зробити виробництво теплової енергії більш екологічним можна завдяки впровадженню сонячних технологій. Сонячні теплові технології необхідні для декарбонізації промислового сектору. Проаналізовано інформацію з відкритих джерел щодо стану та перспектив розвитку систем сонячного промислового теплопостачання у світі. Аналіз розвитку виробництва сонячного тепла та пари для промисловості у світі показав, що ринок сонячної теплової енергії зараз знаходиться на ранній стадії розвитку, але активно розвивається і багато проєктів будуть введені в експлуатацію найближчим часом. Визначено питомі інвестиційні витрати та економічність систем сонячного промислового теплопостачання різної потужності. У якості критерію економічності у світовій практиці використовується середня зважена собівартість теплової енергії за життєвий цикл. Питомі інвестиційні витрати на встановлення сонячних систем значно зменшуються при збільшенні їх теплової потужності. Отримано апроксимаційні залежності середніх питомих інвестиційних витрат від теплової потужності. Значний вплив на середню собівартість виробництва сонячного тепла та пари для промисловості мають питомі інвестиційні витрати на встановлення та кількість годин роботи. Отримано апроксимаційні залежності середньої собівартості теплової енергії від теплової потужності за різних дисконтних ставок та за різної потужності від дисконтних ставок. В Україні можливо в короткий термін організувати забезпечення промисловості теплом і гарячою водою від використання сонячних технологій. Перспективним напрямком є використання систем сонячного теплопостачання у комбінації з іншими джерелами теплової енергії.

**Ключові слова:** тепла енергія, теплопостачання промисловості, потужні сонячні системи, інвестиційні витрати, собівартість виробництва теплової енергії.

### 1. Вступ

Майбутнє України неможливе без інтеграції до європейського співтовариства, у тому числі в протидії змінам клімату. Для вирішення кліматичної проблеми у 2015 р. було прийнято Паризьку угоду до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Україна у 2017 році ратифікувала Паризьку угоду, яка з 2021 року є продовженням Кіотського протоколу [1], Європейська рада ухвалила Європейський кліматичний закон (червень 2021 р.) [2], який має за мету скорочення викидів парникових газів у порівнянні з 1990 р. до 2030 р. на 55 %. Актуальність вирішення цієї проблеми значно загострилась з приєднанням України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. Перехід країни до низьковуглецевої економіки визначено у Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року [3]. Зробити виробництво теплової енергії більш екологічним можливо завдяки впровадженню сонячних технологій. Оцінка вуглецевого сліду різних типів сонячних водонагрівачів проведена в [4]. Сонячні технології необхідні для зменшення споживання викопних видів палива і декарбонізації промислового сектору країни.

В Україні є небагато досліджень, присвячених сонячному теплопостачанню. Це роботи Інституту відновлюваної енергетики НАН України, наприклад [5, 6]. У роботі [5] визначені загальні тенденції розвитку сонячних теплових систем, їх внесок у постачання енергії та обсяги зменшення викидів вуглекислого газу при їх застосуванні. У роботі [6] проаналізовано параметри сонячних колекторів для нагрівання води в системах гарячого водопостачання та опалення будівель. Показано перспективи подальших досліджень з впровадження систем отримання теплової енергії від сонячного випромінювання. У роботі [7] розглянуто досвід застосування систем сонячного гарячого водопостачання в Ізраїлі, який є цінним при впровадженні аналогічних систем в нашій країні, але в Україні не було досліджень з аналізом сонячного промислового теплопостачання. В Інституті загальної енергетики НАН України були розпочаті такі роботи [8, 9], результати яких доповідались на конференціях, проведених в інститутах НАН України.

**Метою** цієї роботи є ґрунтовний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку систем сонячного промислового теплопостачання у світі та визначення економічності таких систем різної потужності.

## 2. Методи та матеріали

Використані методи аналізу інформації з відкритих джерел щодо сонячного промислового теплопостачання. Проведений розрахунок такого теплопостачання з використанням у якості критерію економічності середньої собівартості виробництва теплової енергії протягом життєвого циклу системи.

Частка теплової енергії у споживанні енергії промисловістю світу складає 75 % [10]. Сонячні теплові системи використовують у світі для теплопостачання у промисловості, сільському господарстві та централізованих тепломережах. Вони постачають тепло для виробничих процесів та в мережі централізованого теплопостачання (ЦТ). За прогнозом International Renewable Energy Agency (IRENA), для досягнення цілей Паризької угоди необхідно значно збільшити сонячні теплові потужності у світі з 4 ГВт у 2018 р. до 890 ГВт у 2030 р. і до 1290 ГВт у 2050 р. [10].

IRENA зібрала дані про потужність і витрати для великих проєктів сонячного теплопостачання, які були введені в експлуатацію з 2010 р. по 2020 р. База даних налічує: 115 проєктів (потужність 686 МВт<sub>т</sub>) централізованого теплопостачання; 259 проєктів сонячного теплопостачання для промисловості (SHIP – Solar Heat for Industrial Processes) (потужність 92 МВт<sub>т</sub>) [10]. У 2021 році на світовому ринку промислового сонячного теплопостачання спостерігалися обнадійливі тенденції. Транснаціональні корпорації частіше звертаються до постачання тепла від сонця. Виробники з Нідерландів та Австрії реалізували велику кількість проєктів сільськогосподарського теплопостачання, а кількість нових систем за межами Китаю зростає. Розвиток сонячного промислового теплопостачання у світі з 2017 р. по 2022 р., за даними щорічних опитувань компаній, що постачають системи під ключ [11, 12], надано у табл. 1. Кількість включає всі системи із площею колекторів від 50 м<sup>2</sup>, незалежно від типу. Потужність розраховувалась з використанням коефіцієнта 0,7 кВт/м<sup>2</sup> для всіх типів колекторів. Зменшення у 2020–2022 рр. пов'язане з епідемією COVID. Країни із найбільшою кількістю введених в експлуатацію потужних систем сонячного теплопостачання надано у табл. 2.

**Таблиця 1.** Розвиток сонячного теплопостачання для промисловості у світі у 2017–2022 рр.

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Всього
Введені в експлуатацію системи, шт.	107	99	86	85	71	114	1089
Площа нових колекторів, м <sup>2</sup>	219280	55583	358641	132316	50819	43390	860029
Нова встановлена потужність, МВт <sub>т</sub>	153	39	251	93	36	30	620

У 2021 році завдяки великій кількості субсидованих сільськогосподарських систем Нідерланди та Австрія випередили Китай та Німеччину, які були одними з найбільших ринків у 2020 році. За доданою площею колекторів у 2021 р. Франція випередила Китай та Іспанію. У 2022 р. найбільше систем ввели: Нідерланди (38 шт., 7,3 МВт<sub>т</sub>), Китай (17 шт., 7,2 МВт<sub>т</sub>), Франція (14 шт., 1,8 МВт<sub>т</sub>), Мексика (13 шт.,

1,6 МВт<sub>т</sub>), Німеччина (9 шт., 1,3 МВт<sub>т</sub>), США (8 шт., 5,4 МВт<sub>т</sub>). Китайські виробники часто постачають колектори на будівельні майданчики, а місцеві компанії їх встановлюють, тому є значні коливання у статистиці кількості введених систем.

**Таблиця 2.** Сонячне теплопостачання для промисловості у різних країнах

	Системи, введені у 2020 р., шт.	Додана площа колекторів у 2020 р., м <sup>2</sup>	Системи, введені у 2021 р., шт.	Додана площа колекторів у 2021 р., м <sup>2</sup>	Середня площа на систему, м <sup>2</sup>
Мексика	16	2182	18	2387	134
Нідерланди	7	16102	15	2786	859
Австрія	7	720	11	2997	207
Китай	30	101314	7	11664	3053
Німеччина	10	2070	4	388	176
Іспанія	3	602	4	6430	1005
Франція	0		3	14370	4790
Індія	3	510	3	1280	298

У 2021 році завдяки великій кількості субсидованих сільськогосподарських систем Нідерланди та Австрія випередили Китай та Німеччину, які були одними з найбільших ринків у 2020 році. За доданою площею колекторів у 2021 р. Франція випередила Китай та Іспанію. У 2022 р. найбільше систем ввели: Нідерланди (38 шт., 7,3 МВт<sub>т</sub>), Китай (17 шт., 7,2 МВт<sub>т</sub>), Франція (14 шт., 1,8 МВт<sub>т</sub>), Мексика (13 шт., 1,6 МВт<sub>т</sub>), Німеччина (9 шт., 1,3 МВт<sub>т</sub>), США (8 шт., 5,4 МВт<sub>т</sub>). Китайські виробники часто постачають колектори на будівельні майданчики, а місцеві компанії їх встановлюють, тому є значні коливання у статистиці кількості введених систем.

Багатонаціональні корпорації виявили, що сонячне тепло є важливим для захисту довкілля. Вони поставили перед собою цілі щодо скорочення викидів. Це є перспективна група споживачів сонячного тепла, але вони вимагають дуже короткого терміну окупності. Це в більшості випадків може бути досягнуто лише з субсидією на інвестиційні витрати (ЕСКО). Модель ЕСКО знижує ризик споживача та прискорює прийняття рішень. Деякі постачальники промислового сонячного тепла встановили перші демонстраційні сонячні системи у великих транснаціональних корпораціях у 2021 році, а саме:

1) Проект в Voortmalt у Франції (10 МВт<sub>т</sub>). Voortmalt є одним з лідерів у виробництві солоду у світі. У Хорватії система потужністю 25 МВт<sub>т</sub> знаходиться на стадії проєктування.

2) Gatorade (дочірня компанія PepsiCo) почала використовувати сонячне тепло у 2009 році і три рази розширювала установку до 3793 м<sup>2</sup> (2,7 МВт<sub>т</sub>). У листопаді 2021 р. ця компанія запустила у Бразилії систему з площею колекторів 400 м<sup>2</sup>, які нагрівають воду до 65 °С.

3) Німецький виробник параболічних жолобкових колекторів Soliterm у 2021 р. ввів в експлуатацію вже друге поле з виробництва сонячної пари для дочірньої компанії в Туреччині.

4) Пивоварні Heineken і Carlsberg у 2022 р. купили сонячні промислові теплові системи.

5) Givaudan (найбільший виробник ароматизаторів) отримав у 2022 р. сонячну пару на двох заводах в Іспанії та Мексиці.

Раніше на ринку сонячного промислового теплопостачання у світі найбільше було проєктів з плоскими та вакуумними колекторами, які постачали гарячу воду з температурою нижче 100 °С. Проєкти з параболічним жолобом, лінійним колектором Френеля або колектором-концентратором для постачання сонячної пари були рідкістю, але зараз це змінюється. У 2022–2023 рр. заплановано ввести в експлуатацію 39 проєктів сумарною потужністю 134 МВт<sub>т</sub> [13], дані про які надано у табл. 3.

#### **Сонячне централізоване теплопостачання.**

У Франції у 2022 році сонячна станція виробила близько 1000 МВт-год тепла для тепломережі, що відповідає питомому виробництву 555 (кВт-год/м<sup>2</sup>)/рік. У Швейцарії (Женева) сонячна система централізованого опалення працює з грудня 2020 року. Це сонячне поле площею 784 м<sup>2</sup> зі спеціальних

високовакуумних плоских панелей. Станція виробляє тепла в середньому 558 МВт·год/рік, що відповідає питомому виробництву 712 (кВт·год/м<sup>2</sup>)/рік [14].

**Таблиця 3.** Найбільші проекти сонячного теплопостачання для промисловості, які заплановано ввести в експлуатацію у 2022–2023 рр.

Проект	Країна	Тип колектора	Площа, м <sup>2</sup>	Потужність, МВт <sub>т</sub>	Використання	Дата вводу
Aztec/Solarlite	Бельгія	Параболічний жолоб	5540	2,5	Хімія	Кінець 2022
Aztec/Engie	Іспанія	Параболічний жолоб	43414	3,0	Пивоваріння	04-2023
CSIN/Solaton	Іспанія	Лінійний Френеля	1462	1,0	Нафтохімія	06-2023
CSIN/Solaton	Іспанія	Лінійний Френеля	3052	2,1	Харчова	06-2023
Intertec/Solaton	Іспанія	Лінійний Френеля	1526	1,1	Очищення стічних вод	06-2023
Heliac	Німеччина	Концентричний (параболічний)	2750	1,9	Допоміжний	05-2022
Inventive Power	Мексика	Параболічний жолоб	1300	0,6	Видобуток корисних копалин	09-2022
Protarget	Чилі	Параболічний жолоб	1645	1,2	Видобуток корисних копалин	2023
Protarget	Кіпр	Параболічний жолоб	5600	3,9	Прання	2023
Sunvaper	США	Параболічний жолоб	4000	2,3	Мигдальний процес	02-2022
Thermal Cooling Technology (TCT)	Іспанія	Концентричний (параболічний)	1550	1,1	Виробництво м'яса	03-2023
TCT	Іспанія	Концентричний (параболічний)	1700	1,2	Виробник пробки	04-2023
Xucheng Energy	Китай	Параболічний жолоб	110000	77	Парк відпочинку	Початок 2023

Китайська компанія Sunrain Group є найбільшим виробником колекторів у світі. Вона представила деякі проекти централізованого теплопостачання, де сонячні колектори разом із тепловими насосами забезпечують 100 % енергетичних потреб великих будівельних комплексів. На дахах нових навчальних корпусів Вейхайської професійної школи у 2019 р. встановлено 6000 м<sup>2</sup> вакуумних трубчастих колекторів із заповнених водою подвійних скляних труб. Сонячне тепло разом із накопичувальними баками 330 м<sup>3</sup> покриває 100 % потреб у гарячій воді влітку. Основну потребу в опаленні взимку покривають повітряні теплові насоси потужністю 1,5 МВт<sub>т</sub>, сонячні системи та теплові насоси працюють паралельно [15].

Централізоване теплопостачання у Косово зараз забезпечується від ТЕЦ, яка працює на бурому вугіллі. Планується будівництво однієї з найбільших сонячних теплових станцій у Європі, пуск до кінця 2027 року. Потужність 40,6 МВт, буде сезонний накопичувач 408 тис. м<sup>3</sup>, термін роботи 25–30 років. Вона вироблятиме тепла 43 ГВт·год/рік, 741 кВт/год. Потужність абсорбційних теплових насосів 20 МВт. Вартість проекту складає 80 млн євро [16].

У світі економічні розрахунки собівартості виробництва теплової енергії виконують у дол. США за кВт·год, а в Україні прийнято за Гкал, тому далі для порівняння у дужках наведена собівартість у дол. США за Гкал. Данія є одною з лідерів у Європі за потужністю централізованого теплопостачання. Для сонячного ЦТ у Данії середньозважені інвестиційні витрати зменшились з 573 дол. США/кВт у 2010 р. до 409 дол. США/кВт у 2019 р., а середньозважена собівартість тепла за життєвий цикл впала з 0,066 дол. США/кВт·год (76,762 дол. США/Гкал) у 2010 р. до 0,045 дол. США/кВт·год (52,338 дол. США/Гкал) у 2019 р. [10]. Це зробило системи сонячного опалення конкурентоспроможними для централізованого теплопостачання.

З проведеного аналізу видно, що ринок сонячної теплової енергії для промисловості і централізованого теплопостачання зараз знаходиться на ранній стадії розвитку, але світові тенденції

впровадження сонячних систем теплопостачання показують зростаючий попит на такі системи, багато проєктів будуть введені в експлуатацію найближчим часом.

### Визначення економічних характеристик.

Як критерій економічності у світі широко використовують середню собівартість енергії за життєвий цикл. Для систем теплопостачання він позначається скорочено LCOH (levelised cost of heat generation) [12, 17, 18], це середня собівартість виробництва теплової енергії протягом терміну роботи системи. Цей показник враховує всі витрати за життєвий цикл – інвестиційні, експлуатаційні, паливні, екологічні. Для сонячної енергії паливних та екологічних витрат немає, тому він обчислюється за формулою:

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{(1+r)^t}},$$

де LCOH – середня собівартість виробництва теплової енергії за життєвий цикл, дол. США/кВт·год;  $t$  – поточний рік з початку спорудження;  $n$  – термін роботи, роки;  $I_0$  – інвестиційні витрати, дол. США (термін будівництва менше 1 року);  $M_t$  – експлуатаційні витрати, дол. США/рік;  $Y_t$  – виробництво тепла за проєктом, МВт·год/рік;  $r$  – дисконтна ставка.

Вихідні дані для розрахунків собівартості виробництва сонячної теплової енергії. Потужність сонячної системи 1000–16000 кВт<sub>т</sub>. Експлуатаційні витрати, за даними роботи [9], приймаються: 1 % від інвестиційних витрат при площі поля  $\leq 1000$  м<sup>2</sup>; 0,5 % від інвестиційних витрат при площі поля  $>1000$  м<sup>2</sup>.

В енергетиці для порівняння ефективності роботи систем застосовують коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП). Він показує, наскільки ефективно використовується встановлена потужність. Середньомісячне значення КВВП для СЕС України у 2020–2021 рр. становило 14,1 % (від 2,1 % до 23,6 %) [19]. За даними IRENA, середнє значення КВВП для сонячної енергетики у світі у 2020 р. становило 24,2 %. Це пояснюється тим, що у світі є регіони планети з більшою сонячною активністю, ніж в Україні. Час роботи  $\tau_1 = 1235$  год/рік розраховано з середнього КВВП в Україні. Термін роботи  $n = 25$  років. Дисконтна ставка змінюється від 10 % до 25 % (облікова ставка НБУ), що враховує ризики, пов'язані з військовими діями в Україні.

Витрати на сонячне теплопостачання залежать від регіону використання і типів сонячних колекторів. В цій роботі розраховані середні економічні показники таких систем різної потужності. Сучасні системи розрахунків в більшості є цифровими, де для вхідних і вихідних даних, які задані у вигляді таблиць, необхідно знайти аналітичні залежності. Апроксимація (наближене вираження) потрібна для виявлення загальних тенденцій зміни показників і проведення цифрових розрахунків, які будуть використовуватися в подальших дослідженнях. В програмі Excel отримано апроксимаційні залежності, які можуть бути використані для моделювання і визначення економічності впровадження сонячних технологій в системи теплопостачання.

За даними дослідження [12], середні інвестиційні витрати на сонячні теплові системи в Європі на 2020 рік залежно від теплової потужності  $Q_T$  склали (дол. США/кВт<sub>т</sub>):

- на системи сонячного теплопостачання  
815 (1 МВт<sub>т</sub>), 702 (2 МВт<sub>т</sub>), 604 (4 МВт<sub>т</sub>), 520 (8 МВт<sub>т</sub>), 418 (16 МВт<sub>т</sub>);
- на виробництво сонячної пари  
1000 (1 МВт<sub>т</sub>), 750 (3 МВт<sub>т</sub>), 600 (6 МВт<sub>т</sub>), 500 (10 МВт<sub>т</sub>).

За допомогою апроксимації були отримані залежності для визначення середніх інвестиційних витрат від теплової потужності на системи сонячного теплопостачання (1) і на виробництво сонячної пари (2). Максимальні похибки для рівняння (1) та (2) складають 0,64 % і 1,33 % відповідно.

$$I_0 = 815,0443 \times Q_T^{(-0,2146)}, \quad (1)$$

$$I_0 = -218,190983 \times \ln(Q_T) + 995,764090. \quad (2)$$

Результати розрахунків середньої собівартості виробництва сонячного тепла для промисловості і централізованого тепlopостачання за життєвий цикл системи за таких умов надано у табл. 4.

**Таблиця 4.** Середня собівартість виробництва сонячного тепла для промисловості за життєвий цикл системи

Теплова потужність, МВт <sub>г</sub>	Середня собівартість, дол. США/кВт·год			
	r = 10 %	r = 15 %	r = 20 %	r = 25 %
1	0,0809	0,1116	0,1439	0,1768
2	0,0349	0,0481	0,0620	0,0762
4	0,0150	0,0207	0,0267	0,0328
8	0,0065	0,0090	0,0116	0,0142
16	0,0028	0,0038	0,0049	0,0061

Формули для розрахунків середньої собівартості виробництва сонячного тепла для промисловості і централізованого тепlopостачання залежно від теплової потужності за різних дисконтних ставок:

$$\text{Для } r = 10 \% \quad \text{LCOH} = 0,0809 \times Q_T^{-1,215};$$

$$\text{Для } r = 15 \% \quad \text{LCOH} = 0,1116 \times Q_T^{-1,215};$$

$$\text{Для } r = 20 \% \quad \text{LCOH} = 0,1439 \times Q_T^{-1,215};$$

$$\text{Для } r = 25 \% \quad \text{LCOH} = 0,1768 \times Q_T^{-1,215}.$$

Формули для розрахунків середньої собівартості виробництва сонячного тепла для промисловості і централізованого тепlopостачання залежно від дисконтних ставок за різної потужності:

$$\text{Для } Q_T = 1 \text{ МВт}_g \quad \text{LCOH} = 0,6398 \times r + 0,016;$$

$$\text{Для } Q_T = 2 \text{ МВт}_g \quad \text{LCOH} = 0,2756 \times r + 0,007;$$

$$\text{Для } Q_T = 4 \text{ МВт}_g \quad \text{LCOH} = 0,1185 \times r + 0,003;$$

$$\text{Для } Q_T = 8 \text{ МВт}_g \quad \text{LCOH} = 0,0515 \times r + 0,0013;$$

$$\text{Для } Q_T = 16 \text{ МВт}_g \quad \text{LCOH} = 0,022 \times r + 0,0006.$$

Максимальна похибка апроксимації складає 0,78 %.

Результати розрахунків середньої собівартості виробництва сонячної пари для промисловості за життєвий цикл системи за таких умов надано у табл. 5.

**Таблиця 5.** Середня собівартість виробництва сонячної пари для промисловості за життєвий цикл системи

Теплова потужність, МВт <sub>г</sub>	Середня собівартість, дол. США/кВт·год			
	r = 10 %	r = 15 %	r = 20 %	r = 25 %
1	0,0993	0,1369	0,1765	0,2170
3	0,0248	0,0342	0,0441	0,0542
6	0,0099	0,0137	0,0177	0,0217
10	0,0050	0,0068	0,0088	0,0108

Формули для розрахунків середньої собівартості виробництва сонячної пари для промисловості залежно від теплової потужності за різних дисконтних ставок:

$$\text{Для } r = 10 \% \quad \text{LCOH} = 0,1009 \times Q_T^{-1,299};$$

$$\text{Для } r = 15 \% \quad \text{LCOH} = 0,1391 \times Q_T^{-1,299};$$

$$\text{Для } r = 20 \% \quad \text{LCOH} = 0,1793 \times Q_T^{-1,299};$$

Для  $r = 25\%$  
$$LCOH = 0,2203 \times Q_T^{-1,299}.$$

Формули для розрахунків середньої собівартості виробництва сонячної пари для промисловості залежно від дисконтних ставок за різної потужності:

Для  $Q_T = 1 \text{ МВт}_T$  
$$LCOH = 0,785 \times r + 0,02;$$

Для  $Q_T = 3 \text{ МВт}_T$  
$$LCOH = 0,1963 \times r + 0,005;$$

Для  $Q_T = 6 \text{ МВт}_T$  
$$LCOH = 0,0785 \times r + 0,002;$$

Для  $Q_T = 10 \text{ МВт}_T$  
$$LCOH = 0,0393 \times r + 0,001.$$

Максимальна похибка апроксимації складає  $0,82\%$ .

Середня собівартість виробництва теплової енергії обернено залежить від кількості годин роботи системи:  $LCOH_2 = LCOH_1 / (\tau_2 / \tau_1)$ . Якщо кількість годин роботи ( $\tau_2$ ) збільшиться у 2 рази у порівнянні з середньою по країні (наприклад, для південних регіонів України), то LCOH зменшиться також у 2 рази у порівнянні зі значеннями, наведеними у табл. 4 і табл. 5.

За даними роботи [12], середня собівартість виробництва за життєвий цикл у світі у 2020 році складала: сонячного промислового тепла (43 проекти)  $0,039$  дол. США/кВт·год ( $45,359$  дол. США/Гкал або, за курсом НБУ  $1$  дол. США =  $36,5686$  грн [20], собівартість  $1658,73$  грн/Гкал); сонячної пари (11 проектів)  $0,07$  дол. США/кВт·год ( $81,41$  дол. США/Гкал або за курсом НБУ собівартість  $2977,21$  грн/Гкал), що співставно з розрахованими значеннями. Середня собівартість тепла за життєвий цикл сонячних систем за розрахунками зменшується: для виробництва гарячої води від  $7520$  грн/Гкал ( $1 \text{ МВт}_T$ ) до  $259$  грн/Гкал ( $16 \text{ МВт}_T$ ) за дисконтної ставки  $25\%$  та від  $3442,5$  грн/Гкал ( $1 \text{ МВт}_T$ ) до  $119$  грн/Гкал ( $16 \text{ МВт}_T$ ) за дисконтної ставки  $10\%$ ; для виробництва пари з  $9229$  грн/Гкал ( $1 \text{ МВт}_T$ ) до  $459,3$  грн/Гкал ( $10 \text{ МВт}_T$ ) за дисконтної ставки  $25\%$  та від  $4224$  грн/Гкал ( $1 \text{ МВт}_T$ ) до  $212,7$  грн/Гкал ( $10 \text{ МВт}_T$ ) за дисконтної ставки  $10\%$ . Потрібно впроваджувати сонячні системи більшої потужності.

За даними «Київтеплоенерго» [21], тарифи на централізоване тепlopостачання в осінньо-зимовий період 2022–2023 рр. складала (грн/Гкал): для бюджетних організацій  $4235,72$  (протягом дії воєнного стану  $2732,04$ , компенсація згідно з законом [22]), для інших організацій  $6416,14$  (тариф протягом дії воєнного стану  $2876,71$ , компенсація згідно з законом [22]). З порівняння видно, що тарифи централізованого тепlopостачання «Київтеплоенерго» є вищими, ніж середня собівартість сонячного промислового тепла у світі у 2020 р. А для умов України багато залежить від дисконтної ставки, яка може зменшитись завдяки зниженню безпекових ризиків. Важливим моментом також є автономність постачання гарячої води та пари.

### 3. Висновки

Аналіз виробництва сонячного тепла та пари для промисловості у світі показав, що ринок сонячної теплової енергії зараз знаходиться на ранній стадії розвитку, але активно розвивається, свідченням чого може бути те, що багато проектів будуть введені в експлуатацію найближчим часом.

Питомі інвестиційні витрати на встановлення сонячних систем (у цінах 2020 р.) значно зменшуються: для виробництва гарячої води від  $825$  до  $525$  дол. США/кВт<sub>T</sub> при збільшенні їх теплової потужності з  $1 \text{ МВт}_T$  до  $8 \text{ МВт}_T$  і мало зменшуються при потужності більше  $8 \text{ МВт}_T$ ; для виробництва пари від  $1000$  до  $500$  дол. США/кВт<sub>T</sub> при збільшенні їх теплової потужності з  $1 \text{ МВт}_T$  до  $10 \text{ МВт}_T$ . Отримано апроксимаційні залежності середніх інвестиційних витрат від теплової потужності.

Розрахована середня собівартість тепла за життєвий цикл сонячних систем (у цінах 2020 р.), вона значно зменшується: для виробництва гарячої води від  $0,0809$  до  $0,0099$  дол. США/кВт·год при збільшенні їх теплової потужності з  $1 \text{ МВт}_T$  до  $8 \text{ МВт}_T$  за дисконтної ставки  $10\%$ ; для виробництва пари від  $0,0993$  до  $0,005$  дол. США/кВт·год при збільшенні їх теплової потужності з  $1 \text{ МВт}_T$  до  $10 \text{ МВт}_T$  за дисконтної ставки

10 %. Отримано апроксимаційні залежності середньої собівартості від теплової потужності за різних дисконтних ставок та за різної потужності від дисконтних ставок.

В Україні можливо організувати забезпечення промисловості гарячою водою і паром за допомогою сонячних технологій. Перспективним напрямком є використання систем сонячного теплопостачання у комбінації з іншими джерелами теплової енергії, наприклад тепловими насосами.

Отримані формули для розрахунків сонячного теплопостачання будуть використані у подальших дослідженнях, а також можуть бути використані в програмах щодо моделювання і визначення економічності впровадження сонячних технологій в системи теплопостачання в Україні.

## Посилання

1. Проект аналітичного огляду Другого національно визначеного внеску України до Паризької угоди. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. Квітень 2021. URL: [https://mepr.gov.ua/files/docs/klimatychna\\_polityka/](https://mepr.gov.ua/files/docs/klimatychna_polityka/) (дата звернення: 22.01.2023).
2. Council adopts European climate law: Press release. *Council of the European Union*. 2021, June 28. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/06/28/council-adopts-european-climate-law/> (дата звернення: 29.06.2023).
3. Стратегія низьковуглецевого розвитку до 2050 року. Київ, 2017. 53 с. URL: <https://menr.gov.ua/files/docs/Проект Стратегії низьковуглецевого розвитку України.pdf> (дата звернення: 22.01.2022).
4. Carbon footprint assessment of various types of solar water heater. 2023, August. URL: <https://solarthermalworld.org/news/carbon-footprint-assessment-of-various-types-of-solar-water-heater/> (дата звернення: 25.08.2023)
5. Матях С., Суржик Т., Резцов В., Іванчук В. Напрями та перспективи розвитку сонячної теплоенергетики. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 3. С. 33—44. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3\(66\).33-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3(66).33-44)
6. Зощенко С.А. Сонячне теплопостачання: різновиди систем перетворення, ефективність. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 2. С. 43—48. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).43-48](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).43-48)
7. Гламаздин П., Кіреєв Е. Перспективи використання досвіду Ізраїлю в сонячному гарячому водопостачанні в Україні. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2019. Вип. 13. С. 69—78. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.13.69-78>
8. Коберник В.С. Розвиток сонячного промислового теплопостачання. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті. Матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції (18–19 травня 2023, м. Київ)*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2023. С. 184—185. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023>
9. Коберник В.С. Сонячне теплопостачання об'єктів критичної інфраструктури. *Матеріали науково-практичної конференції «Результативність критичної інфраструктури – 2023» (21 червня 2023, м. Київ)*. Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 86—89. URL: [https://www.researchgate.net/publication/371753766\\_Sritical\\_Infrastructure\\_Resilience\\_-\\_2023\\_collection\\_of\\_materials\\_of\\_the\\_scientific\\_and\\_practical\\_conference\\_Kyiv\\_June\\_21\\_2023\\_PIMEE\\_of\\_NAS\\_of\\_Ukra](https://www.researchgate.net/publication/371753766_Sritical_Infrastructure_Resilience_-_2023_collection_of_materials_of_the_scientific_and_practical_conference_Kyiv_June_21_2023_PIMEE_of_NAS_of_Ukra)
10. Renewable power generation costs in 2020. IRENA, 2021, June. 180 p. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (дата звернення: 10.01.2023)
11. High level of dynamism on the SHIP world market in 2022. 2023, March 27. URL: <https://solarthermalworld.org/news/high-level-of-dynamism-on-the-ship-world-market-in-2022/> (дата звернення: 21.04.2023)
12. Bärbel Epp. Cost and market trends in solar industrial heat. 2022. 22 p. URL: [https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/soko/soko2021/DLR-SolarColloquium2021\\_Cost\\_and\\_market\\_trends\\_EPP.pdf](https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/soko/soko2021/DLR-SolarColloquium2021_Cost_and_market_trends_EPP.pdf) (дата звернення: 21.04.2023).
13. Concentrating solar heat capacity quadruples in 2022. 2022, August 29. URL: <https://solarthermalworld.org/news/concentrating-solar-heat-capacity-quadruples-in-2022/> (дата звернення: 10.01.2023).
14. Promising results from innovative solar district heating plants. 2023, February 27. URL: <https://solarthermalworld.org/news/promising-results-from-innovative-solar-district-heating-plants/> (дата звернення: 17.03.2023).
15. IEA SHC investigates cost reduction potential of solar district heating. 2023, February 6. URL: <https://solarthermalworld.org/news/iea-shc-investigates-cost-reduction-potential-of-solar-district-heating/> (дата звернення: 17.03.2023).



16. Big Solar in Kosovo replaces coal-based electric heating. 2023, January 25. URL: <https://solarthermalworld.org/news/big-solar-in-kosovo-replaces-coal-based-electric-heating/> (дата звернення: 17.04.2023).
17. Станиціна В.В., Артемчук В.О., Богославська О.Ю. Вплив адміністрування екологічного податку на вартість теплової енергії в Україні. *Електронне моделювання*. 2021. Вип. 43(5). С. 55—72. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.05.055>
18. Станиціна В.В., Артемчук В.О. Перспективи впровадження деяких типів теплових насосів в Україні. *Електронне моделювання*. 2022. Вип. 44(6). С. 48—68. <https://doi.org/10.15407/emodel.44.06.048>
19. Сидоров Д. Изменчивое солнце и попутный ветер. *Енергобізнес*. 2022. № 6(1250). URL: <https://e-b.com.ua/izmenscivoe-solnce-i-porutnyy-veter-3299> (дата звернення: 21.04.2023).
20. Курс долара до гривні. *Мінфін*. URL: <https://minfin.com.ua/ua/currency/usd/> (дата звернення: 21.04.2023).
21. Тарифи на теплову енергію КП «Київтеплоенерго»: розпорядження КМДА від 30.09.2022 р. № 673.
22. Про особливості регулювання відносин на ринку природного газу та у сфері теплопостачання під час дії воєнного стану та подальшого відновлення їх функціонування: Закон України від 29.07.2022 р. № 2479-IX.

## ANALYSIS OF SOLAR INDUSTRIAL HEAT SUPPLY

**Valentyna Kobernyk**, <http://orcid.org/0000-0001-8727-7157>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine  
e-mail: V.S.K@ukr.net

**Abstract.** *The future of Ukraine is only impossible without integration into the European community, including in the fight against climate change. It is possible to make the production of thermal energy more environmentally friendly thanks to the introduction of solar technologies. Solar thermal technologies are necessary for the decarbonization of the industrial sector. Information from open sources on the state and prospects for the development of solar industrial heat supply systems in the world has been analyzed. Analysis of the development of solar heat and steam production for industry in the world has shown that the solar thermal energy market is currently in an early stage of development, but it is actively developing and many projects will be commissioned in the near future. Specific investment costs and economy of solar industrial heat supply systems of various capacities are determined. The average weighted cost of thermal energy for the life cycle is used as a criterion of economy in world practice. Specific investment costs for installing solar systems are significantly reduced when their thermal power is increased. Approximate dependences of average specific investment costs on thermal power were obtained. The specific investment costs of installation and the number of hours of operation significant impact on the average cost of solar heat and steam production for industry. Approximate dependences of the average cost of heat on thermal power at different discount rates and at different power on discount rates were obtained. In Ukraine, it is possible to organize the supply of industry with heat and hot water from the use of solar technologies in a short period of time. A promising direction is the use of solar heat supply systems in combination with other thermal energy sources.*

**Keywords:** thermal energy; industrial heat supply, powerful solar systems, investment costs, cost of thermal energy.

### References

1. Proekt analitychnoho ohliadu Druhoho natsionalno vyznachеноho vnesku Ukrainy do Paryzkoї uhody. (2021, April). *Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy*. URL: [https://mepr.gov.ua/files/docs/klimatychna\\_polityka/](https://mepr.gov.ua/files/docs/klimatychna_polityka/) (Last accessed: 22.01.2023) [in Ukrainian].
2. Council of the European Union. (2021, June 28). *Council adopts European climate law*. [Press release]. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/06/28/council-adopts-european-climate-law/> (Last accessed: 29.06.2023).
3. *Stratehiia nyzkovuhletsevoho rozvytku do 2050 roku*. (2017). Kyiv, 53 p. URL: <https://menr.gov.ua/files/docs/Проект Стратегії низьковуглецевого розвитку України.pdf> (Last accessed: 22.01.2022) [in Ukrainian].
4. Carbon footprint assessment of various types of solar water heater. (2023, August 23). URL: <https://solarthermalworld.org/news/carbon-footprint-assessment-of-various-types-of-solar-water-heater/> (Last accessed: 25.08.2023).
5. Matyakh, S., Surzhyk, T., Rieztsov, V., & Ivanchuk, V. (2021). Directions and prospects for the development of solar thermal energy. *Vidnovluvana energetika*, 3, 33–44 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3\(66\).33-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3(66).33-44)

6. Zoshchenko, S.A. (2022). Solar heat supply: varieties of conversion systems, efficiency. *Vidnovluvana energetika*, 2, 43–48 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).43-48](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).43-48)
7. Glamazdin, P., & Kiryeyev, E. (2019). Perspectives of using Israel's experience in solar hot water supply in Ukraine. *Energy-Efficiency in Civil Engineering and Architecture*, 13, 69–78 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.13.69-7>
8. Kobernyk, V.S. (2023). Development of solar industrial heat supply. *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century. Materials of the XXIV International scientific and practical conference (2023, May 18–19)*. Kyiv: Institute of Renewable energy of NAS of Ukraine, 184–185 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023>
9. Kobernyk, V.S. (2023). Soniachne teplppostachannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury. *Critical Infrastructure Resilience: Collection of materials of the scientific and practical conference (2023, June 21)*. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine, 86–89. URL: [https://www.researchgate.net/publication/371753766\\_Sritical\\_Infrastructure\\_Resilience\\_-\\_2023\\_collection\\_of\\_materials\\_of\\_the\\_scientific\\_and\\_practical\\_conference\\_Kyiv\\_June\\_21\\_2023\\_PIMEE\\_of\\_NAS\\_of\\_Ukra](https://www.researchgate.net/publication/371753766_Sritical_Infrastructure_Resilience_-_2023_collection_of_materials_of_the_scientific_and_practical_conference_Kyiv_June_21_2023_PIMEE_of_NAS_of_Ukra) [in Ukrainian].
10. Renewable power generation costs in 2020. (2021, June). IRENA, 180 p. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (Last accessed: 10.01.2023).
11. High level of dynamism on the SHIP world market in 2022. (2023, March 27). URL: <https://solarthermalworld.org/news/high-level-of-dynamism-on-the-ship-world-market-in-2022/> (Last accessed: 21.04.2023).
12. Bärbel Epp. (2022). Cost and market trends in solar industrial heat, 22 p. URL: [https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/soko/soko2021/DLR-SolarColloquium2021\\_Cost\\_and\\_market\\_trends\\_EPP.pdf](https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/soko/soko2021/DLR-SolarColloquium2021_Cost_and_market_trends_EPP.pdf) (Last accessed: 29.06.2023).
13. Concentrating solar heat capacity quadruples in 2022. (2022, August 29). URL: <https://solarthermalworld.org/news/concentrating-solar-heat-capacity-quadruples-in-2022/> (Last accessed: 10.04.2023)
14. Promising results from innovative solar district heating plants. (2023, February 27). URL: <https://solarthermalworld.org/news/promising-results-from-innovative-solar-district-heating-plants/> (Last accessed: 17.03.2023).
15. IEA SHC investigates cost reduction potential of solar district heating. (2023, February 6). URL: <https://solarthermalworld.org/news/iea-shc-investigates-cost-reduction-potential-of-solar-district-heating/> (Last accessed: 17.03.2023).
16. Big Solar in Kosovo replaces coal-based electric heating. (2023, January 25). URL: <https://solarthermalworld.org/news/big-solar-in-kosovo-replaces-coal-based-electric-heating/> (Last accessed: 17.04.2023).
17. Stanytsina, V.V., Artemchuk, V.O., & Bogoslavsk, O.Yu. (2021). The impact of environmental tax administration on the cost of thermal energy on the example of organic and biofuels boilers in Ukraine. *Electronic modeling*, 43(5), 55–72 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.05.055>
18. Stanytsina, V.V., & Artemchuk, V.O. (2022). Prospects for the introduction of several types of heat pumps in Ukraine. *Electronic modeling*, 44(6), 48–68 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/emodel.44.06.048>
19. Sydorov, D. (2022). Izmenchivoe solnce i poutnyj veter. *Energobiznes*, 6(1250). URL: <https://e-b.com.ua/izmenchivoe-solnce-i-poputnyi-veter-3299> (Last accessed: 21.04.2023) [in Russian].
20. Kurs dolara do hryvni. *Minfin*. URL: <https://minfin.com.ua/ua/currency/usd/> (Last accessed: 21.04.2023) [in Ukrainian].
21. Taryfy na teplovu enerhiu KP "Kyivteploenerho": rozporiadzhennia KMDA vid 30.09.2022 r. № 673 [in Ukrainian].
22. Pro osoblyvosti rehuliuвання vidnosyn na rynku pryrodnoho hazu ta u sferi teplopstachannia pid chas dii voiennoho stanu ta podalshoho vidnovlennia yikh funkcionuvannia: Zakon Ukraini vid 29.07.2022 r. № 2479-IX [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії: 23.08.2023