

**ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ**

УДК 697.329

**Тепловий розрахунок плоского сонячного колектора-водонагрівача***І. Л. Бошкова*<sup>1✉</sup>, *Н. В. Волгушева*<sup>2</sup>, *Л. З. Бошков*<sup>3</sup>, *М. Д. Потапов*<sup>4</sup><sup>1-4</sup>Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.comORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2196-1519>, <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-6847-5745>

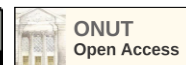
*Перетворення сонячної енергії на теплову характеризується високою ефективністю, екологічністю і є економічно вигідним. Енергія випромінювання Сонця перетворюється на теплову енергію у пристрої, що називається сонячним колектором. Сонячні колектори відрізняються від інших типів теплообмінників низькими щільностями теплових потоків. Проаналізовано сучасні уявлення про методи підвищення ефективності конструкції плоского сонячного колектора. Встановлено, що раціонально розглянути конструкцію сонячного колектора з розташуванням труб на поверхні пластини, що поглинає, і під одним прозорим покриттям із загартованого скла. Методика розрахунку плоского сонячного колектора складена на основі математичних уявлень процесів теплоперенесення з урахуванням залежностей для розрахунку ефективності. Основними елементами плоского сонячного колектора, що беруть участь у методиці, є: поверхня (пластина), що поглинає енергію сонячного випромінювання та передає її рідині; труби, в яких протікає рідина, що нагрівається; прозорі для сонячного випромінювання покриття, розміщені над поглинаючою поверхнею та зменшують втрати теплоти в атмосферу за рахунок конвекції та випромінювання; теплової ізоляції. Наведена методика апробована при конструюванні плоского сонячного колектора для кліматичних умов, що відповідають Одеській області. Розрахунки проводилися за допущення стаціонарного режиму роботи колектора. В результаті базового розрахунку за найбільш несприятливих умов отримані геометричні характеристики колектора. Площа поверхні колектора, що отримується в результаті такого розрахунку, є основою для визначення його робочих характеристик в інших умовах. Розрахунки проведені для умов січня як найбільш холодного місяця та липня як найбільш спекотного. Варіаційні розрахунки дозволяють визначити умови зниження теплових втрат і підвищення ефективності колектора.*

**Ключові слова:** Коефіцієнт тепловіддачі; Сонячна радіація; Ефективність; Математичне подання теплоперенесення; Стаціонарний режим

**doi:** <https://doi.org/10.15673/ret.v58i3.2487>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**1. Вступ**

У даний час вважається, що сонячна енергія має переваги щодо інших альтернативних форм енергії, оскільки вона стійко одержується та безпечна для навколишнього середовища [1]. Перетворення сонячної енергії на теплову характери-

зується високою ефективністю, екологічністю і є економічно вигідним [2].

Основним елементом установки, в якій енергія випромінювання Сонця перетворюється на теплову енергію, є сонячний колектор. Особливостями, що відрізняють сонячні колектори від інших типів теплообмінників є низькі щільності теплових по-

токів (не більше  $1,5 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>) та значна роль променистого теплообміну. Широко поширені плоскі сонячні колектори (СК), так як мають ряд переваг у порівнянні з фокусуючими. Серед таких переваг є те, що плоскі сонячні колектори можуть використовувати як пряму, так і розсіяну радіацію, не вимагають стеження за Сонцем, мають прості конструкції. Плоскі сонячні колектори зазвичай призначені для застосування з типовими робочими температурами від 40 до 60 °С, що в основному відноситься до систем гарячого водопостачання.

Перевага плоских сонячних колекторів у порівнянні з іншими конструкціями переконливо обґрунтовується у [1]. Плоскі СК знаходять широке застосування для гарячого водопостачання та опалення у зимовий період [3], для систем кондиціонування повітря [4].

Предметом дослідження є тип сонячного водонагрівача, який складається з накопичувального бака, труб з рідиною, що нагрівається, пластини абсорбера і скляного покриття. Ця конструкція добре відома і давно застосовується [1], а її подальший розвиток привів до покращення теплової ефективності [5]. Подальша оптимізація сонячних колекторів передбачає уточнення коефіцієнтів перенесення та застосування сучасних комплектуючих матеріалів з урахуванням інноваційних досліджень у галузі тепломасоперенесення. Актуальність роботи пов'язана з необхідністю уточнення методики теплового конструкторського розрахунку СК, призначеного для нагрівання проточної води із заданою витратою, стосовно специфіки з'єднання труб з поглинаючою пластиною.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як показано в [1], теплові характеристики сонячних колекторів можна визначити шляхом детального аналізу оптичних та теплових характеристик матеріалів та конструкції колектора або шляхом експериментального визначення продуктивності. Зазначається, що достовірність розрахунку теплових потоків залежить від точності визначення коефіцієнтів теплопередачі, на які сильний вплив надає неоднорідність температурного поля в сонячних колекторах. У роботі наведено результати розробки системи СК для опалення [6]. Зазначається, що важливим чинником економії енергії є оптимізація масової витрати. Основні аналітичні залежності для теплових роз-

рахунків відповідають класичній методиці, викладеній у [7]. Апробація методики розрахунку СК [7] доводить її ефективність при конструюванні СК [8]. Однак для конструювання колекторів з індивідуальними способами з'єднання пластини з трубками та їх розташуванням необхідні дані за коефіцієнтами тепловіддачі від пластини до прозорого покриття. Наявні емпіричні формули узагальнюють дані для конкретних видів системи прозорі покриття – поглинаюча пластина – труби, що нагріваються. У роботі [9] представлена емпірична залежність визначення коефіцієнта тепловіддачі між двома плоскопаралельними пластинами колектора більшою мірою відбиває вплив кута нахилу проти залежностями.

У роботі [10] наведено огляд різних методів, які використовуються для підвищення ефективності плоских сонячних колекторів. Наведено короткий опис методик, які використовуються для аналізу ефективності різних конструкцій, проте докладний алгоритм розрахунку індивідуальних колекторів відсутній.

У роботі [11] представлено методику обробки експериментальних даних, проте для проведення конструкторських розрахунків вона не застосовується.

Проведений аналіз плоских сонячних колекторів авторами [12] дозволив оцінити продуктивність СК із різними геометричними характеристиками. Аналізується вплив труб різної геометрії та спосіб їх встановлення на продуктивність та вартість колектора. Особливу цінність представляють дані по прозорим покриттям і селективним покриттям із зазначенням їх оптичних характеристик. У роботі [13] досліджено полімерний сонячний колектор із прозорим пластиковим покриттям, яке на 40 % легше традиційного. Недоліком таких колекторів є відносно низька пропускання здатність та недовговічність у порівнянні зі склом. Як скляне покриття в роботі [14] пропонується застосовувати загартоване скло, оскільки загартоване скло має підвищену міцність і здатне пропускати до 92% падаючого сонячного випромінювання [15]. Зниження втрат теплоти від скляного покриття у навколишнє середовище шляхом вставки прозорого ізоляційного матеріалу під скляну кришку досліджується авторами роботи [16]. Експериментальні та аналітичні дослідження показали, що теплові втрати зверху колектора значно знижуються, що дозволяє отримати більш високу продуктивність колектора. Рідина, що нагріва-

ється, може досягати дуже високих температур, особливо в періоди низького споживання гарячої води або у разі відмови насоса. У цих умовах температура рідини на окремих ділянках може досягати 290 °С [16]. Для вирішення цієї проблеми автори пропонують встановлювати вентиляований канал під пластиною, що поглинає. Недоліком такого рішення є збільшення теплових втрат через нижню частину колектора при його стаціонарній роботі, а також ускладнення та подорожчання конструкції.

При конструюванні СК безліч питань набувають важливого значення, одним з яких є вибір матеріалів для виготовлення колектора. У роботі [10] проведено порівняння характеристик металевого та полімерного колектора. Показано, що полімерний колектор на 67,8% легший за металевий сонячний колектор, проте ефективність полімерного колектора на 7-14% нижча, ніж у традиційного колектора. Одним із яких є вибір матеріалів для виготовлення колектора.

Усе це дозволяє стверджувати, що при використанні сонячного колектора раціонально застосовувати плоскі СК. Їхня розрахункова методика у загальному вигляді відпрацьована, проте потребує коригування коефіцієнтів тепловіддачі. Насамперед, необхідно уточнення коефіцієнта тепловіддачі від пластини до скляного покриття з урахуванням розташування труб. Як матеріал для прозорого покриття доцільно використовувати загартоване скло, а труби з рідиною, що нагрівається, розмістити на поверхні поглинаючої пластини. При цьому доцільно використовувати труби прямокутного перерізу, що покращує контакт пластини з трубою та виключає утворення тінєвих зон.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є коригування методики розрахунку плоского сонячного колектора з одним скляним покриттям при розташуванні труб з водою, що нагрівається, на поглинаючій пластині.

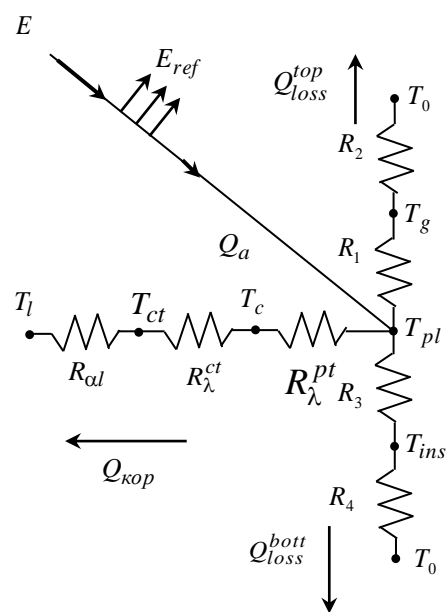
Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- уточнити методику теплового розрахунку плоского сонячного колектора-водонагрівача для прийнятої конструкції;

- провести конструкторський розрахунок плоского колектора для умов літнього та зимового періоду та визначити його теплові та геометричні характеристики.

### 4. Матеріали та методи

Основними елементами плоского сонячного колектора є: поверхня (пластина), що поглинає енергію сонячного випромінювання та передає її рідині; труби, в яких протікає рідина, що нагрівається; прозорі для сонячного випромінювання покриття, розміщені над поглинаючою поверхнею та зменшують втрати теплоти в атмосферу за рахунок конвекції та випромінювання; теплової ізоляції. Теплова схема сонячного колектора представлена на рис. 1.



**Рисунок 1** – Теплова схема сонячного колектора:  $T_0$ ,  $T_c$ ,  $T_{pl}$ ,  $T_{ins}$ ,  $T_g$  – температури навколишнього середовища, покриття, поглинаючої пластини, поверхні ізоляції, рідини;  $R_1$ – $R_4$ ,  $R_\lambda$ ,  $R_\lambda R_{al}$  – термічні опори;  $E$ ,  $E_{ref}$  – потоки падаючого та відбитого сонячного випромінювання;  $Q_a$ ,  $Q_{us}$ ,  $Q_{loss}$  – тепловий потік, поглинений пластинною, переданий рідині, відведений у навколишнє середовище.

Коефіцієнт теплопередачі нижньої поверхні колектора

$$K_{bott} = \frac{1}{R_3} = \frac{\lambda_{ins}}{\delta_{ins}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (1)$$

де  $\lambda_{ins}$ ,  $\delta_{ins}$  – коефіцієнт теплопровідності та товщина шару ізоляції.

Тепловтрати через бічні поверхні СК розраховують аналогічно з використанням відповідного коефіцієнта  $K_6$ . Коефіцієнт втрат через верхню поверхню СК визначається величиною,

зворотній сумі відповідних термічних опорів (це, по суті, коефіцієнт теплопередачі від поверхні пластини в навколишнє середовище):

$$K_b = (R_1 + R_2)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2)$$

Щільність теплового потоку, що передається від пластини з температурою  $T_n$  до скляного покриття з температурою  $T_c$  за рахунок вільної конвекції та випромінювання, визначається формулою:

$$q = q_{kl} + q_{nl} = (\alpha_1 + \alpha_{nl})(T_n - T_c) = \frac{T_n - T_c}{R_1}, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (3)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі при вільній конвекції в зазорі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_{nl}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням між пластиною та покриттям,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Коефіцієнт променистого теплообміну між пластиною та покриттям визначається з формули:

$$\alpha_{nl} = \frac{q_{nl}}{T_n - T_c} = \frac{\varepsilon_{np} \sigma_0 (T_n^4 - T_c^4)}{T_n - T_c} = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_n^2 - T_c^2)(T_n + T_c), \quad (4)$$

де  $\sigma_0$  – коефіцієнт променевипускання абсолютно чорного тіла, ( $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$ );  $\varepsilon_{np}$  – наведений ступінь чорноти системи «пластина-покриття».

Таким чином, термічний опір  $R_1$  можна уявити в наступному вигляді:

$$R_1 = (\alpha_1 + \alpha_{nl})^{-1}, \text{ К}/(\text{Вт}/\text{м}^2). \quad (5)$$

Щільність теплового потоку, що передається від верхнього покриття в навколишнє середовище, визначається процесами вимушеної конвекції та випромінювання між покриттям та небозводом:

$$q = (\alpha_2 + \alpha_{n2})(T_c - T_0) = \frac{T_c - T_0}{R_2}, \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (6)$$

Коефіцієнт тепловіддачі для пластини, що обдувається вітром, визначається з формули [7]:

$$\alpha_2 = 5,7 + 3,8w, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (7)$$

де  $w$  – швидкість вітру,  $\text{м}/\text{с}$ .

Коефіцієнт променистого теплообміну визначається виразом:

$$\alpha_{n2} = \varepsilon_c \sigma_0 (T_c^2 + T_n^2)(T_c + T_n), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (8)$$

де  $\varepsilon_c$  – ступінь чорноти скляного покриття;  $T_c$  – температура верхнього покриття,  $\text{К}$ ;  $T_n$  – температура небозводу.

Замість  $T_n$  може бути використана температура навколишнього середовища  $T_0$ . При цьому значення  $\alpha_{n2}$  зміниться незначно.

Термічний опір  $R_2$  можна подати в наступному вигляді:

$$R_2 = (\alpha_2 + \alpha_{n2})^{-1}, \text{ К}/(\text{Вт}/\text{м}^2). \quad (9)$$

Сумарний коефіцієнт теплових втрат  $K_\Sigma$ :

$$K_\Sigma = K_b + K_n, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (10)$$

Для визначення термічного опору теплопередачі від пластини до рідини, що нагрівається, необхідні дані по теплофізичним властивостям пластини, з'єднання пластини з трубою, труби і рідини, що нагрівається.

$$R_{np} = R_\lambda^3 + R_\lambda^{tp} + R'_{\alpha,p}, \text{ К}/\text{Вт}. \quad (11)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до рідини визначається відповідними критеріальними рівняннями залежно від режиму руху [7].

Термічний опір тепловіддачі визначається формулою:

$$R'_{\alpha,p} = \frac{1}{\pi D_c \alpha_p n L}, \text{ К}/\text{Вт}. \quad (12)$$

Для труб некруглого перерізу слід розрахувати еквівалентний діаметр  $D_e$ .

Міжтрубний простір розглядається як пряме ребро прямокутного перерізу із ізолюваним торцем, коефіцієнт ефективності якого визначається залежністю:

$$E_p = \frac{th(mh)}{mh} = \frac{th\left(\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_{ал} \cdot \delta}} \cdot \frac{S - D_3}{2}\right)}{\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_{ал} \cdot \delta}} \cdot \frac{S - D_3}{2}}. \quad (13)$$

Ефективність колектора дорівнює відношенню термічних опорів теплоперенесення від поверхні поглинаючої пластини до навколишнього середовища.  $R_{п-о.с}$  і від пластини до рідини у трубах  $R_{п-ж}$  [7]:

$$E_p = \frac{1}{K_\Sigma} = \frac{R_{п-о.с}}{R_{п-ж}} \cdot s_1 \left\{ \frac{1}{\pi D_{вн} \alpha_{ж}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c b_c} + \frac{1}{[(s_1 - D)E + D] K_\Sigma} \right\} \quad (14)$$

Ефективність колектора визначає коефіцієнт відведення теплоти:

$$\varepsilon^* = \frac{G'c_{p,p}}{K_\Sigma} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_\Sigma \varepsilon_k}{G'c_{p,p}}\right) \right] \quad (15)$$

Корисний тепловий потік  $Q_{кор}$  визначається потужністю, необхідною для нагрівання рідини до заданої температури:

$$Q_{кор} = G'c_{p,p} (t_2'' - t_2'), \text{ Вт} \quad (16)$$

Потік сонячної енергії, що поглинається пластиною:

$$E_{п} = E_{пад} (1 - R_{від}), \text{ Вт/м}^2 \quad (17)$$

Отримані значення дозволяють визначити площу сонячного колектора:

$$F = \frac{Q_{кор}}{\varepsilon^* [E_{п} - K_\Sigma (t_2'' - t_0)]}, \text{ м}^2 \quad (18)$$

Оскільки для визначення коефіцієнтів тепловіддачі необхідно зняти температури пластини  $T_{п}$  і покриття  $T_c$ , які залежать від теплових втрат, і можуть бути відомі, розрахунок ведеться шляхом послідовних наближень. У першому наближенні задаються значеннями  $T_{п}$  і  $T_c$ , потім наведеними вище формулами обчислюють коефіцієнти тепловіддачі, коефіцієнти тепловтрат, тепловтрати. Після цього з формул (19)-(21) можна розрахувати температури пластини та скляного покриття.

Середня температура рідини:

$$\bar{T}_ж = T_p - \frac{[E_p - K_\Sigma (T_p - T_0)]}{K_4} \quad (19)$$

Середня температура пластини:

$$\bar{T}_п = \bar{T}_p + Q_{кор} \cdot R_{пн} / F \quad (20)$$

Температура скляного покриття:

$$\bar{T}_c = \frac{K_{в} (\bar{T}_п - T_0)}{\alpha_2 + \alpha_{л2}} + T_0, \text{ К} \quad (21)$$

У разі необхідності слід перезадати значення  $T_{п}$  і  $T_c$  і повторити розрахунки до тих пір, поки не буде досягнуто задовільне узгодження температур, прийнятих у першому наближенні. Розбіжність температур не має перевищувати 5 %. Подані залежності складають методику теплового конструкторського розрахунку сонячного колектора, кінцевою метою якого є визначення площі поверхні.

## 5. Результати розрахунку плоского сонячного колектора

Для визначення геометричних характеристик СК та його ефективності при кліматичних умовах, що відповідають Одеській області, проведено розрахунки для січня, як найхолоднішого місяця року, в результаті якого визначились геометричні характеристики колектора. Також проведено розрахунок для липня, як місяця з максимальною температурою, що дозволило визначити робочі параметри СК із визначеною за зимовим періодом площею. Для проведення розрахунків складено програму за допомогою програмного забезпечення Maple 15.

Результати варіантних розрахунків показали, що оптимальними вихідними даними є наступні величини: кут нахилу колектора  $\varphi = 30^\circ$ ; матеріал для нижньої ізоляції – пінополістирол товщиною 0,1 м; поглинаюча пластина – сталь 45 товщиною 0,01 м; канали для рідини, що нагрівається, прямокутного перерізу з еквівалентним діаметром 0,012 м та товщиною стінки 0,001 м; максимальна товщина зазору між пластиною та скляним покриттям – 0,015 м; кількість труб – 30 шт із кроком 0,06 м. Результати розрахунку наведені у таблиці.

В результаті розрахунку отримано, що необхідна площа колектора становить  $F = 14,7 \text{ м}^2$ . Слід передбачити теплоізоляцію бічних поверхонь пінополістиролом, що дозволить практично виключити бічні втрати. Розрахунки показали, що марка сталі для виготовлення пластини і труб, а

також вид селективного покриття в діапазоні поглинаючої здатності 0,94...0,85 не мають істотного впливу на вихідні характеристики сонячного колектора. Також слід зазначити, що

відстань між покриттями не має помітного впливу на коефіцієнт втрат  $K_b$ . Істотний вплив мають щільність потоку падаючого випромінювання, витрата рідини і температури на вході та виході.

**Таблиця** – Теплові характеристики плоского сонячного колектора

	$T_p, K$	$T_c, K$	$T_{ж.вих}, K$	$Q_{кор}, Вт$	$\varepsilon^*$
Липень: $E=604 \text{ Вт/м}^2$ , $G=0,018 \text{ кг/с}$ , $T_{ж.вх}=288 \text{ К}$					
Розрахункова температура	338	324	319	173	0,723
Січень: $E=312 \text{ Вт/м}^2$ , $G=0,012 \text{ кг/с}$ , $T_{ж.вх}=280 \text{ К}$					
Розрахункова температура	303	262	298	96	0,725

## 6. Висновки

Уточнена методика теплового розрахунку плоского сонячного колектора-водонагрівача з одним скляним покриттям та трубами прямокутного перерізу дає можливість визначити площу поверхні колектора та надалі проводити оцінку витрати рідини, необхідної для забезпечення заданої температури води на виході.

Проведені обчислювальні експерименти при щільності потоку падаючого випромінювання  $E = 312 \text{ Вт/м}^2$  для температури навколишнього середовища  $T_0 = 269 \text{ К}$  при заданих температурах води на вході  $T_{ж.вх} = 280 \text{ К}$  та на виході  $T = 298 \text{ К}$  і витраті  $G = 0,012 \text{ кг/с}$  показали, що площа колектора становить  $F = 14,7 \text{ м}^2$ .

## Особистий внесок авторів CRediТ

**Бошкова І.Л.:** концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Волгушева Н.В.:** комп'ютерне моделювання, методичне забезпечення. **Бошков Л.З.:** аналіз та узагальнення даних. **Потапов М.Д.:** інформаційний пошук, експериментальні дослідження

## Література

1. **Kalogirou S. A.** Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second Edition. – The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2014. – 815 p.
2. **Singh R., Lazarus I. J., Souliotis M.** Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 54. – P. 270-298.
3. **Ayompe L.M., Duffy A.** Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat

plate collectors in a temperate climate // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 58, Issues 1-2. – P. 447-454.

4. **Мірмов І. Н., Мірмов Н.І.** Використання сонячної енергії та вторинних джерел теплоти для отримання холоду // Холодильна техніка. – 2011. – № 9. – С. 44-48.

5. **Singh Ch. G., Kumar A. R.** Experimental analysis of a batch type solar water heater with integrated collector water storage system // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – Vol. 3 (5). – P. 269-274.

6. **Zelzouli Kh., Guizani A., Sebai R., Kerkeni Ch.** Solar Thermal Systems Performances versus Flat Plate Solar Collectors Connected in Series // Engineering. – 2012. – Vol. 4. – P. 881-893.

7. **Duffy J. A., Beckman W. A.** Solar energy thermal process. – Wiley: New York, 1974. – 413 p.

8. **Тунік О.О.** Математична модель процесів тепломасоперенесення у плоскому сонячному колекторі SUN 1 // Вісник МГСУ. – 2016. – № 1. – С. 126-142.

9. **Chen G., Shestopalov K., Doroshenko A., Koltun P.** Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2015. – Vol. 54. – Is. 8. – P. 796-805.

10. **Pandey K. M., Chaurasiya R.** A review on analysis and development of solar flat plate collector // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 641-650.

11. **Kumar G. V., Sridhar K., Kumar S. A.** Heat Removal Factor of an Integrated Solar Flat Plate Collector with Packed Bed System Research Scholar // International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 5. – Is. 7. – P. 720-727.

12. **Amrutkar S. K., Ghodke S., Patil K. N.** Solar

Flat Plate Collector Analysis // IOSR Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 2. – Is. 2. – P. 207-213.

13. **Chen G., Doroshenko A., Koltun P., Sheshtopalov K.** Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors' // Solar Energy. – 2015. – Vol. 115. – P. 577-588.

14. **Caouris Y. G.** Low Temperature Stationary Collectors // Comprehensive Renewable Energy. Solar Thermal Systems: Components and Applications. – 2012. – Vol. 3. – P. 1-25.

15. **Athienitis A., Kalogirou S., Candanedo L.** Mo-

deling and Simulation of Passive and Active Solar Thermal Systems // Comprehensive Renewable Energy. Solar Thermal Systems: Components and Applications. – 2012. – Vol. 3. – P. 357-368.

16. **Kessentini H., Capdevila R., Castro J., Oliva A.** Numerical and experimental study of a flat plate solar collector with transparent insulation and overheating protection system // A: ISES Solar World Congress. "Proceedings of ISES Solar World Congress 2011". – 2011. – P. 2946-2957.

Отримана в редакції 11.08.2022, прийнята до друку 19.09.2022

## Heat calculation of a flat solar collector-water heater

**Iryna Boshkova<sup>1</sup>✉, Natalya Volgusheva<sup>2</sup>, Leonid Boshkov<sup>3</sup>, Mykhailo Potapov<sup>4</sup>**

<sup>1-4</sup>Odessa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>boshkova.irina@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2196-1519>, <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-6847-5745>

*The conversion of solar energy into thermal energy is characterized by high efficiency, environmental friendliness and is economically beneficial. The energy of the Sun's radiation is converted into heat energy in a device called a solar collector. Solar collectors differ from other types of heat exchangers by low densities of heat flows. Modern ideas about methods of increasing the efficiency of the design of a flat solar collector are analyzed. It has been established that it is rational to consider the construction of a solar collector with the arrangement of pipes on the surface of the absorbing plate and under one transparent coating of tempered glass. The method of calculating a flat solar collector is based on mathematical representations of heat transfer processes, taking into account dependencies for calculating efficiency. The main elements of a flat solar collector involved in the technique are: a surface (plate) that absorbs the energy of solar radiation and transfers it to the liquid; pipes in which heated liquid flows; coatings transparent to solar radiation placed over the absorbing surface and reducing heat loss to the atmosphere due to convection and radiation; thermal insulation. The given technique was tested during the construction of a flat solar collector for the climatic conditions corresponding to the Odesa region. Calculations were carried out assuming a stationary mode of operation of the collector. As a result of the basic calculation under the most unfavorable conditions, the geometric characteristics of the collector were obtained. The surface area of the collector obtained as a result of such a calculation is the basis for determining its operating characteristics in other conditions. Calculations are made for the conditions of January as the coldest month and July as the hottest. Variation calculations make it possible to determine the conditions for reducing heat losses and increasing the efficiency of the collector.*

**Keywords:** Heat transfer coefficient; Solar radiation; Efficiency; Mathematical presentation of heat transfer; Stationary mode

## References

1. **Kalogirou, S. A.** (2014) Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Second Edition. *The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 815.*

2. **Singh, R., Lazarus, I. J., Souliotis, M.** (2016) Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 270-298.*

3. **Ayompe, L.M., Duffy, A.** (2013) Analysis of the thermal performance of a solar water heating system

- with flat plate collectors in a temperate climate. *Applied Thermal Engineering*, 58 (1-2), 447-454.
4. **Mirmov, I.N., Mirmov, N.I.** (2011) The use of solar energy and secondary sources of heat to produce cold. *Kholodilna tekhnika*, 9, 44-48.
  5. **Singh, Ch. G., Kumar, A. R.** (2013) Experimental analysis of a batch type solar water heater with integrated collector water storage system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3 (5), 269-274.
  6. **Zelzouli, Kh., Guizani, A., Sebai, R., Kerkeni, Ch.** (2012) Solar Thermal Systems Performances versus Flat Plate Solar Collectors Connected in Series. *Engineering*, 4, 881-893.
  7. **Duffy, J. A., Beckman, W. A.** (1974) Solar energy thermal process. *Wiley: New York*, 413.
  8. **Tunik, A. A.** (2016) Mathematical Model of Heat-Mass Exchange Processes in a Flat Solar Collector SUN 1. *Proceedings of MGSU*, 1, 126-142.
  9. **Chen, G., Shestopalov, K., Doroshenko, A., Koltun, P.** (2015). Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 54(8), 796-805.
  10. **Pandey, K. M., Chaurasiya, R.** (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 641-650.
  11. **Kumar, G. V., Sridhar, K., Kumar, S. A.** (2017). Heat Removal Factor of an Integrated Solar Flat Plate Collector with Packed Bed System Research Scholar. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 5(7), 720-727.
  12. **Amrutkar, S. K., Ghodke, S., Patil, K. N.** (2012). Solar Flat Plate Collector Analysis. *IOSR Journal of Engineering*, 2(2), 207-213.
  13. **Chen, G., Doroshenko, A., Koltun, P., Shestopalov, K.** (2015). Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors. *Solar Energy*, 115, 577-588.
  14. **Caouris, Y.G.** (2012). Low Temperature Stationary Collectors. *Comprehensive Renewable Energy. Solar Thermal Systems: Components and Applications. 1-25.*
  15. **Athienitis, A., Kalogirou, S., Candanedo, L.** (2012) Modeling and Simulation of Passive and Active Solar Thermal Systems. *Comprehensive Renewable Energy. Solar Thermal Systems: Components and Applications*, 3, 357-368.
  16. **Kessentini, H., Capdevila, R., Castro, J., Oliva, A.** (2011) Numerical and experimental study of a flat plate solar collector with transparent insulation and overheating protection system. *A: ISES Solar World Congress. Proceedings of ISES Solar World Congress 2011*, 2946-2957.

---

Received 11 August 2022  
Approved 09 September 2022  
Available in Internet 04 October 2022