

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2021, 2(65): 53–55  
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.053>

УДК 516.3, 516.65

**Ю.М. МАЦЕВИТИЙ**, д-р техн. наук, академік НАН України, ORCID: 0000-0002-6127-0341

**М.О. САФОНОВ**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр., ORCID: 0000-0002-3951-4805

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського, 2/10,  
м. Харків, 61046, Україна

**Я.М. БУШТЕЦЬ**, ORCID: 0000-0002-3867-7362

## ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО СПРИЙМАЄТЬСЯ СФЕРИЧНИМ ТРУБЧАСТИМ КОЛЕКТОРОМ

Визначено площу поверхні сферичного трубчастого колектора, що освітлюється Сонцем. Отримано кількість тепла, що сприймає сонячний колектор за кожен день року. Одержано загальну кількість тепла за рік при вертикальній орієнтації осі колектора.

*Ключові слова:* сонячна енергія, сферичний сонячний трубчастий колектор, кількість тепла.

Сферичний сонячний трубчастий колектор (ССТК) був винайдений в ІПМаш ім. А.М. Підгорного як альтернатива сонячному плоскому колектору для перетворення променистої енергії Сонця в теплову [1, 2]. Важливо розуміти, яку кількість енергії ССТК зможе приймати. Для обчислення інтенсивності сонячного випромінювання в точці поверхні колектора використовується формула  $I \cos i$  [4, 5], де  $I$  – інтенсивність сонячного випромінювання,  $i$  – кут між напрямком на Сонце  $S(S_x, S_y, S_z)$  і нормаллю  $n(n_x, n_y, n_z)$  у цій точці (рис. 1). Для визначення кількості теплової енергії, що поглинається ССТК в якийсь момент часу  $t$ , необхідно величину  $I \cos i$  проінтегрувати по всій його поверхні:

$$q(t) = \int_{\Gamma} I \cos i d\Gamma, \text{ де } \Gamma - \text{поверхня колектора.}$$

Інтеграл по часу від  $q(t)$  від сходу Сонця до його заходу в будь-який з 365 днів у році дає кількість енергії, поглиненої колектором в цей день. Значення  $\cos i$  залежить від часу, тому що від часу залежить кут між напрямком на Сонце і нормаллю в точці поверхні. З огляду на те, що висота Сонця змінюється з часом, то й інтенсивність  $I$  залежить від часу.

© Ю.М. МАЦЕВИТИЙ, М.О. САФОНОВ, Я.М. БУШТЕЦЬ, 2021

$$Q(d) = \int_{-i^*(d)}^{i^*(d)} \int_{\Gamma} I \cos i d\Gamma dt = \\ = \int_{-i^*(d)}^{i^*(d)} \int_{\Gamma} I(t) [S_x(t)n_x + S_y(t)n_y + S_z(t)n_z] d\Gamma dt, \quad (1)$$

де  $-i^*$  і  $i^*$  – час сходу і заходу Сонця відповідно;  $d$  – день у році.

Для обчислення елементарної площі  $d\Gamma$  в (1) необхідно знати коефіцієнти першої квадратичної форми цієї поверхні:  $E = (r_\varphi, r_\varphi)$ ,  $F = (r_\varphi, r_\psi)$ ,  $G = (r_\psi, r_\psi)$  [6], де  $r(\varphi, \psi) = r(x(\varphi, \psi), y(\varphi, \psi), z(\varphi, \psi))$  – радіус-вектор точки поверхні  $\Gamma$  ( $0 \leq \varphi \leq \varphi_m$ ,  $0 \leq \psi < 2\pi$ ), а  $\varphi, \psi$  – її параметри. Тоді для  $F = 0$  і  $G = r_0^2$  інтеграл (1) має наступний вигляд

$$Q(d) = \int_{-i^*(d)}^{i^*(d)} \int_0^{\varphi_m} \int_0^{2\pi} I(t) [S_x(t)n_x(\varphi, \psi) + \\ + S_y(t)n_y(\varphi, \psi) + S_z(t)n_z(\varphi, \psi)] r_0 \sqrt{E} d\psi d\varphi dt. \quad (2)$$

Слід підкреслити, що не всі точки поверхні  $\Gamma$  освітлюються Сонцем, а тільки ті, у яких кут  $i$  менше  $90^\circ$ , тобто

$$\cos i = (S, n) = S_x n_x + S_y n_y + S_z n_z > 0. \quad (3)$$

Це означає, що ті точки поверхні, які не відповідають умові (3) і які не освітлені Сонцем,

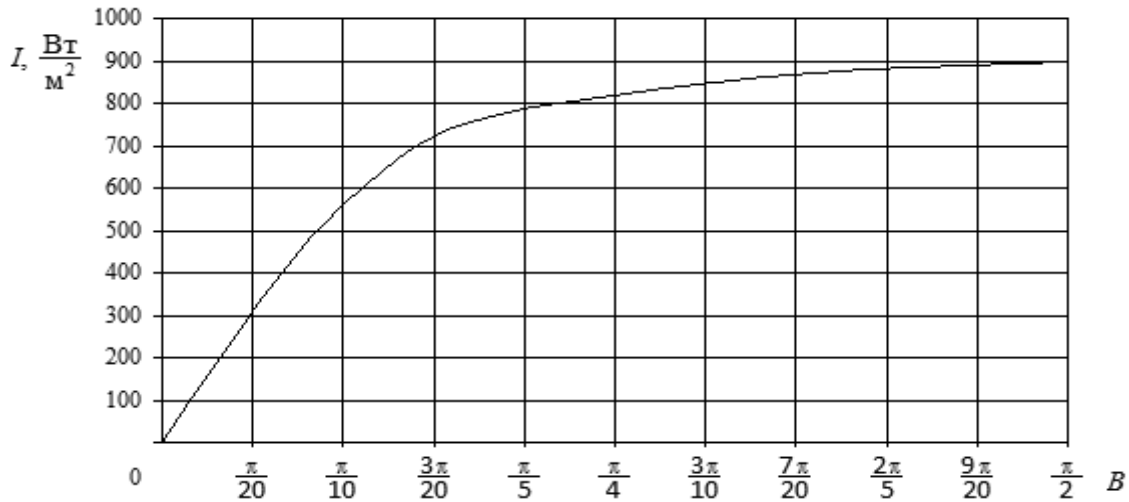


Рис. 1. Залежність сонячної інтенсивності від висоти Сонця

потрібно виключити при чисельному інтегруванні (2).

Поверхня  $\Gamma$  сама себе блокує (затемнює) залежно від того, з якого боку вона освітлюється Сонцем, тобто при будь-якому векторі  $S$  витки, освітлювані з зовнішнього боку колектора, кидають тінь на витки, освітлювані з його внутрішнього боку. Протягом світлового дня ці тіні пересуваються по поверхні колектора, змінюють свою форму, тому що Сонце рухається й освітлює її з різних боків. Тому виникає проблема «світла і тіней», яка полягає в наступному: в кожен момент часу  $t$ , в який обчислюється підінтегральна функція (2) з урахуванням (3), при обході всієї трубчастій поверхні  $\Gamma$  необхідно виявляти затемнені частини поверхні й не враховувати їх при обчисленні інтеграла (2).

Протягом усього світлового дня для кожного моменту часу  $-t^* \leq t \leq t^*$  на поверхні  $\Gamma$  можна виділити дві її частини. Перша частина цієї поверхні (позначимо її символом  $\Gamma^+$ ) освітлюється Сонцем з зовнішнього боку колектора, і вона не має затемнених плям. Друга, позначена символом  $\Gamma^-$ , має ці плями, і освітлюється Сонцем з її внутрішнього боку. З огляду на те, що сонячний вектор  $S$  однаковий в кожній точці поверхні  $\Gamma$  (в силу паралельності сонячних променів), геометрично обидві описані вище частини можна розділити площиною  $S_x x + S_y y + S_z z = 0$ , що проходить через центр сфери і перпендикулярна вектору  $S$ .

Для точок поверхні  $\Gamma^+$

$$S_x x + S_y y + S_z z > 0, \tag{4}$$

а для точок поверхні  $\Gamma^-$

$$S_x x + S_y y + S_z z < 0. \tag{5}$$

З урахуванням цього факту при обчисленні інтеграла (2) точки на поверхні  $(x, y, z) \in \Gamma^-$  необхідно перевіряти на наявність затемнення.

Для різних  $d$  чисельно (зокрема, методом прямокутників) було визначено, що площа освітлюваної поверхні становить  $0,429S$ , де  $S$  – площа поверхні всього колектора. Якщо усереднити підінтегральну функцію  $I \cos i$  за часом і простором для різних  $d$ , то можна приблизно обчислювати величину  $Q(d)$ , не вдаючись до чисельних методів, тобто

$$Q(d) \approx IC(d) \cdot 2t^* \cdot 0,429S, \tag{6}$$

де  $IC(d)$  – усереднення підінтегральної функції  $I \cos i$  для певного дня року,  $2t^*$  – світловий день у годинах,  $S = 2\pi_0 L$ , а довжина гвинтової лінії

$$L \approx R \left[ 4,934802n + \frac{1,397540}{\sqrt{n}} \right].$$

У таблиці наведені: окремі дні року (перший стовпець); величини  $IC$  (другий стовпець); освітлювана Сонцем частина поверхні (третій стовпець); кількість тепла, сприйнятого ССТК, порохована чисельно і за формулою (6) для цих днів (четвертий і п'ятий стовпці).

Таблиця.  $IC(d)$  і  $Q(d)$ , пороховані чисельно та за формулою (6)

$d$	$IC, \frac{Вт}{м^2}$	Частина $S$	$Q, Вт\cdot год$ чисельно	$Q, Вт\cdot год$ за (6)
0	289,248	0,429	420,925	418,967
50	334,580	0,431	611,379	604,919
100	342,176	0,431	672,717	665,879
150	323,855	0,431	553,483	547,962
200	262,325	0,428	344,978	343,443
250	164,085	0,426	163,383	163,282
300	167,967	0,427	169,225	168,262
350	266,323	0,428	354,933	356,055
364	287,967	0,429	416,653	413,447

З використанням даних таблиці побудовано апроксимацію величини  $IC(d)$  поліномами

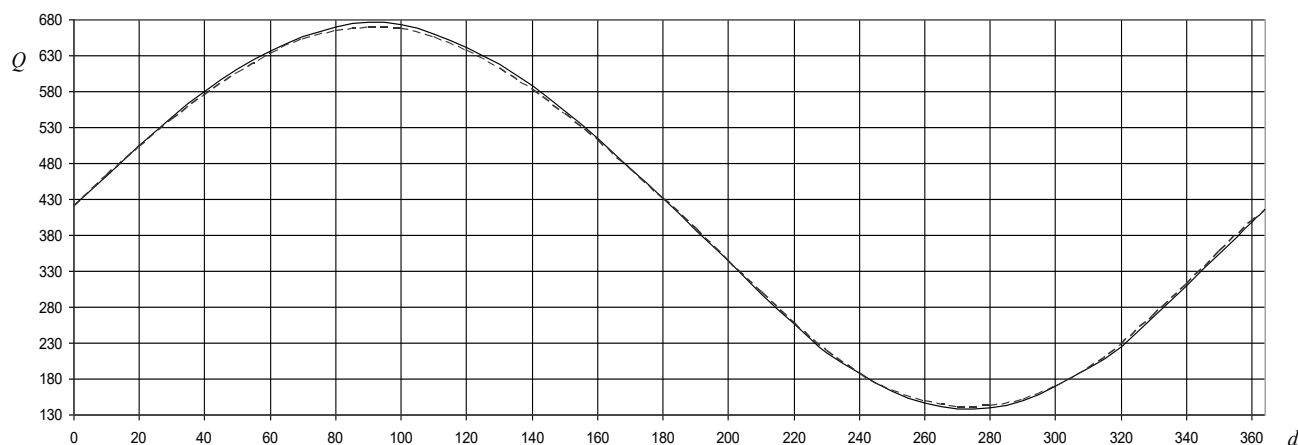


Рис. 2. Кількість тепла  $Q$ , Вт·год, що сприймає ССТК

четвертого ступеня для зовнішнього радіусу трубки  $r_0 = 0,006$  м, радіусу сфери  $0,15$  м, кількості витків  $10$ , положення вертикальної осі ССТК  $\alpha = 90^\circ$  і географічної широти місцевості (м. Харків)  $\varphi = 50^\circ$  [3].

Для  $0 \leq d \leq 200$

$$IC(d) = 289,297 + 1,431d - 0,0132d^2 + 5,824 \cdot 10^{-5}d^3 - 1,564 \cdot 10^{-7}d^4;$$

для  $200 \leq d \leq 364$

$$IC(d) = -6060,737 + 106,587d - 0,6417d^2 + 1,632 \cdot 10^{-3}d^3 - 1,489 \cdot 10^{-6}d^4.$$

На рис. 2 наведено кількість тепла, сприйнятого ССТК протягом року, отриманого шляхом апроксимації поліномами четвертого ступеня (пунктирна лінія) і за допомогою чисельного методу (суцільна лінія). Видно гарне узгодження обох кривих.

З використанням виразу (6) визначено кількість тепла, сприйнятого ССТК за рік  $Q_{all} = \sum_{d=0}^{364} Q(d) \approx 150273$  Вт·год при вертикальній орієнтації осі колектора. Таким чином, з урахуванням наведеної поліноміальної апроксимації підінтегральної функції, можна обчислювати кількість енергії, сприйнятої сонячним колектором протягом певного дня року.

## ВИСНОВКИ

Винайдено та запатентовано принципово новий за геометричною формою сферичний сонячний колектор. Розроблено методологію обчислення кількості тепла, що сприймається колектором. Визначено кількість енергії, яку поглинає ССТК у м. Харків протягом року.

1. Сферичний сонячний колектор: пат. 105112 Україна. №201302194; заявл. 21.02.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7 (кн. 1). З. 136 с.

2. Мацевитый Ю.М., Ценципер А.И., Сафонов Н.А., Лушпенко С.Ф. К построению сферического солнечного коллектора. *Проблемы машиностроения*. 2011. Т. 14, № 2. С. 46—51.

3. Ценципер А.И., Костиков А.О., Сафонов Н.А., Буштец Я.Н. К ориентации сферических солнечных коллекторов. *Проблемы машиностроения*. 2015. Т. 18, № 3. С. 31—36.

4. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1977. 413 с.

5. Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека. М.: Мир, 1976. 286 с.

6. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. М.: Гостехиздат, 1950. 428 с.

Надійшла до редколегії: 10.03.2021