

УДК 697.4

Математичне моделювання роботи геліопокрівлі

С. П. Шаповал

к.т.н., асистент, Національний університет «Львівська політехніка», shapovalstepan@mail.ru

Описано моделювання роботи геліопокрівлі. Геліопокрівля забезпечує підвищення ефективності системи сонячного теплопостачання за рахунок збільшення площі поглинання сонячної енергії. Показано, що можна ефективно використовувати тепло покрівельного матеріалу будівлі. Виведена залежність температури води в баці-акумуляторі від інтенсивності теплового потоку та часу опромінення. Встановлена залежність дозволяє визначити ефективність геліопокрівлі при різних умовах.

Ключові слова: геліопокрівля, моделювання, кількість тепла.

Вступ. Інтенсивне використання традиційних джерел енергії призвело до появи ряду екологічних проблем, найбільш гострими з яких є: збільшення викидів в атмосферу вуглекислого газу і зменшення товщини озонового шару. За останні 100 років концентрація вуглекислого газу в атмосфері Землі збільшилась на 13%. Потенціал альтернативних джерел енергії є високим: використання 1/100 % енергії Сонця дозволяє виключити використання нафти, газу та інших традиційних джерел. Формування механізму використання альтернативних джерел енергії є важливою умовою сталого розвитку міст, регіонів, країн на сучасному етапі.

Постановка проблеми. Використання відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна енергія дає значні можливості отримання теплової енергії, яка може бути успішно використана для забезпечення різних побутових і технологічних потреб. Впровадження систем сонячного теплопостачання покращує екологічну ситуацію за рахунок зниження об'ємів викидів забруднюючих речовин, зокрема продуктів згоряння традиційних видів енергії. Надходження сонячної енергії на територію України складає 1100-1380 Вт/м² в теплий період року. Розроблення нових, удосконалення та впровадження сонячних установок для гарячого водопостачання та опалення об'єктів різного призначення, і разом з цим покращення екологічної ситуації регіону, в якому використовуються ці установки, є актуальними завданнями. Важливим є зменшення вартості сонячних колекторів, оскільки вартість та термін окупності сучасних геліосистем є високими.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано використовувати геліопокрівлю, в якій теплопоглинач сонячної енергії виконано з гофрованого покрівельного матеріалу будівлі. Це дозволяє суттєво знизити вартість геліосистеми та спростити її конструкцію. Геліопокрівля може застосовуватись для забезпечення різних побутових та технологічних потреб.

Для оцінки ефективності геліопокрівлі потрібно провести аналітичні розрахунки енергетичного балансу, метою яких є визначення термоаккумуляційних властивостей геліопокрівлі та пошук оптимальних параметрів її конструкції.

Оскільки сонячна енергія поглинається покрівельним матеріалом будівлі, кількість яку вона поглине, залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить на поверхню цього матеріалу. Від покрівельного матеріалу будівлі тепло втрачається шляхом конвекції та випромінювання в навколишнє середовище. Отримана енергія теплопровідністю втрачається через бокові та нижню частини геліопокрівлі, а решта енергії від покрівельного матеріалу будівлі передається теплоносію (рис. 1). При цьому відбувається його нагрівання. За рахунок різниці температур, та відповідно різниці густин теплоносія в зоні вхідного і вихідного патрубків створюється циркуляція теплоносія. Нагрітий теплоносій подається у бак-акумулятор гарячої води.

При моделюванні роботи геліопокрівлі були прийняті такі допущення і спрощення:

- температура кожного елемента системи вважалась постійною в досліджуваному проміжку часу;
- потік сонячної енергії розподілений рівномірно по поверхні покрівельного матеріалу будівлі;
- прийнято, що випромінювальні властивості поверхонь не залежать від довжини хвилі;

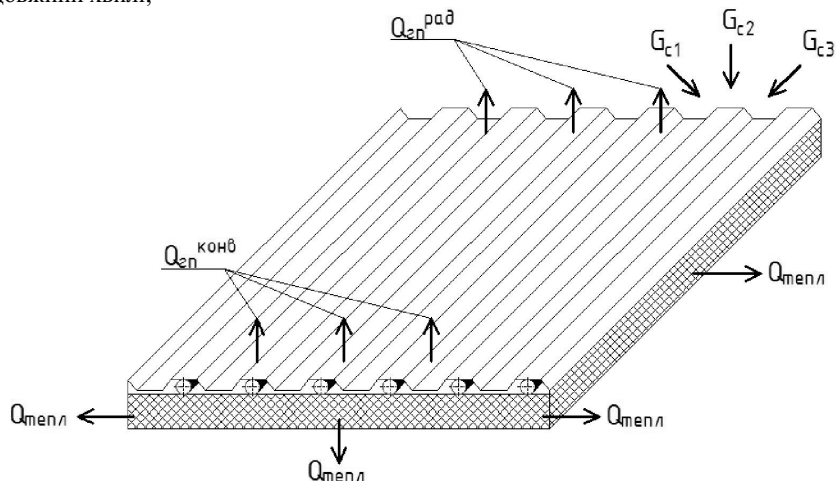


Рис. 1. Тепловтрати та теплонадходження геліопокрівлі

Для оцінки роботи геліопокрівлі можна скласти наступне рівняння енергетичного балансу, яке показує корисну енергію та втрати:

$$Q_{ак}/\Delta\tau = Q_{сон} - Q_{гп}^{конв} - Q_{гп}^{рад} - Q_{тепл}, \quad (1)$$

де $Q_{ак}$ – кількість закумульованої енергії впродовж часу $\Delta\tau$, Вт; $Q_{сон}$ – кількість сонячної енергії, яка надходить на геліопокрівлю, Вт; $Q_{гп}^{конв}$ – кількість тепла, яке втрачається конвекцією, Вт; $Q_{гп}^{рад}$ – кількість тепла, яке втрачається

випромінюванням, Вт; $Q_{\text{тепл}}$ – втрати через бокові та нижню частини геліопокрівлі, Вт.

Кількість тепла закумуляованого геліопокрівлею визначається за формулою:

$$Q_{\text{ак}} = c \cdot m \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{п}}), \quad (2)$$

де c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг · °С); m – маса теплоносія, кг; $t_{\text{к}}$ і $t_{\text{п}}$ – відповідно кінцева та початкова температури теплоносія, °С.

Кількість сонячної енергії, яка надходить на геліопокрівлю визначається за формулою:

$$Q_{\text{сон}} = h \cdot (F_1 G_1 + F_2 G_2 + F_3 G_3), \quad (3)$$

де h – коефіцієнт поглинання сонячної енергії покрівельним матеріалом будівлі; F_i – площа поглинання відповідної грані гофрованого покрівельного матеріалу будівлі, м²; G_i – інтенсивність сонячного випромінювання, яке надходить на відповідну грань гофрованого покрівельного матеріалу будівлі, Вт/м².

Коефіцієнт поглинання сонячної енергії покрівельним матеріалом пофарбованим в чорний колір становить 0,98.

Добова інтенсивність сонячного випромінювання є повною енергією сонячного випромінювання, яка приходить на одиницю площі поверхні за день[2]:

$$G_c = \int G dt, \quad (4)$$

де G – кількість сонячного випромінювання, Вт/м².

Інтенсивність сонячного випромінювання яке надходить на геліопокрівлю визначається як сума прямої та розсіяної сонячної радіації впродовж дня [2]:

$$G_c = \int (G_b \cdot \cos \theta + G_d) dt, \quad (5)$$

де G_b , G_d – відповідно інтенсивність прямої та розсіяної сонячної радіації, Вт/м²; θ – кут між напрямком потоку випромінювання та нормаллю до поверхні теплопоглинача, °.

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \beta, \quad (6)$$

де

$$A = \sin \varphi \cdot \cos \beta, \quad (7)$$

$$B = \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \quad (8)$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma, \quad (9)$$

$$D = \cos \varphi \cdot \cos \beta, \quad (10)$$

$$E = \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \quad (11)$$

де δ – кут між напрямком на Сонце та екваторіальною площиною, град.; ω – часовий кут, град.; β – кут нахилу геліопокрівлі (між площиною, що розглядається та горизонтальною площиною), град; φ – широта місцевості, град.; γ – кут повороту геліопокрівлі (відхилення від меридіану проекції на горизонтальну площину нормалі до поверхні теплопоглинача геліопокрівлі), град.

Кут між напрямком до Сонця та екваторіальною площиною δ визначається за формулою [2]:

$$\delta = \delta_0 \sin[360^\circ (284 + n)/365], \quad (12)$$

де δ_0 – напрям земної осі до нормалі до площини обертання (в північній півкулі $\delta_0 = + 23,5^\circ$ в період літнього сонцестояння та $\delta_0 = - 23,5^\circ$ в період зимового сонцестояння), град.; n – день року ($n = 1$ відповідає 1 січня);

Часовий кут ω визначається:

$$\omega = (15^\circ \text{ год}^{-1}) \cdot (t_{\text{solar}} - 12 \text{ год}) = (15^\circ \text{ год}^{-1}) \cdot (t_{\text{zone}} - 12 \text{ год}) + \omega_{\text{eq}} + (\varphi - \varphi_{\text{zone}}), \quad (13)$$

де t_{solar} , t_{zone} – відповідно локальний сонячний і дискретний час (в годинах), год; φ_{zone} – довгота на якій знаходиться Сонце, коли t_{zone} відповідає полудню (коли сонячний і дискретний час співпадають), град.; ω_{eq} – поправочний коефіцієнт.

Залежність (6) може бути спрощена для деяких випадків: коли теплопоглинач геліопокрівлі орієнтований по напрямку до екватора виявиться повернутим прямо до сонячного потоку в полудень, якщо його кут нахилу β рівний широті місцевості φ . В цьому випадку ($\gamma = 0$, $\beta = \varphi$) залежність(6) буде мати наступний вигляд:

$$\cos \theta = \cos \omega \cdot \cos \delta, \quad (14)$$

Значення густини потоку сонячної енергії впродовж доби для ясного неба визначається за формулою [2]:

$$G_h = G_h^{\text{max}} \cdot \sin(\pi t') / N, \quad (15)$$

де G_h – інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м²; G_h^{max} – максимальна інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м²; t' – час після сходу Сонця; N – тривалість світлового дня, год.

Інтегруванням виразу (15) по всій тривалості світлового дня для ясної погоди отримуємо:

$$H_h = (2N/\pi)G_h^{\text{max}}, \quad (16)$$

де, H_h – густина потоку сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, МДж/м².

Кількість теплоти, яка витрачається конвекцією з геліопокрівлі визначається за формулою:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{копв}} = \alpha_{\text{гп}} F_{\text{гп}} (t_{\text{гп}} - t_{\text{н.с.}}), \quad (17)$$

де $\alpha_{\text{гп}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від покрівельного матеріалу будівлі до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $F_{\text{гп}}$ – площа поглинача сонячної енергії, м²; $t_{\text{гп}}$ – температура теплопоглинача, °С; $t_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища, °С.

Коефіцієнт тепловіддачі від покрівельного матеріалу будівлі до навколишнього середовища визначається за формулою [1]:

$$\alpha_{\text{гп}} = 5,7 + 3,8 \cdot V, \quad (18)$$

Кількість теплоти, яка втрачається випромінюванням від покрівельного матеріалу будівлі у навколишнє середовище визначається за формулою:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{рад}} = \varepsilon_{\text{гп}}^{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot F_{\text{гп}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{гп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 \right], \quad (19)$$

де $\varepsilon_{\text{гп}}^{\text{пр}}$ – приведений відносний коефіцієнт теплового випромінювання покрівельного матеріалу будівлі; c_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴); $T_{\text{н}}$ – температура небозводу, К.

Приведений відносний коефіцієнт теплового випромінювання покрівельного матеріалу будівлі визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\text{гп}}^{\text{пр}} = \frac{c}{c_0}, \quad (20)$$

де c – випромінювальна здатність покрівельного матеріалу будівлі, Вт/(м²·К⁴).

Втрати тепла через бокові та нижню частини геліпокрівлі визначаються за формулою:

$$Q_{\text{тепл}} = K \cdot F_b \cdot (t_{\text{т}} - t_{\text{н.с.}}), \quad (21)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції, Вт/(м²·К); F_b – площа теплоізоляції, м²; $t_{\text{т}}$ – температура теплоносія, °С.

Коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції визначається за формулою:

$$K = \frac{\lambda}{L}, \quad (22)$$

де K – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, (м²·К)/Вт; L – товщина теплоізоляції, м.

Втрати тепла бака-акумулятора визначаються за формулою:

$$Q_{\text{тепл б.а.}} = K_{\text{ак}} \cdot F_{\text{ак}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н.с.}}), \quad (23)$$

де, $K_{\text{ак}}$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції баку-акумулятора, Вт/(м²·К); $F_{\text{ак}}$ – площа теплоізоляції баку-акумулятора, м²; $t_{\text{к}}$ – температура теплоносія, °С.

Втрати тепла в трубопроводах визначаються за формулою:

$$Q_{\text{тр}} = l \cdot \frac{(t_{\text{т}} - t_{\text{н.с.}})}{R_k}, \quad (24)$$

де, l – довжина трубопроводів, м; R_k – термічний опір теплопередачі трубопроводів, м · К / Вт.

Термічний опір теплопередачі трубопроводів визначається за формулою:

$$R_k = \frac{1}{\pi \cdot d_{\text{в}} \cdot \alpha_{\text{в}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{із}}} \cdot \frac{d_{\text{із}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\pi \cdot d_{\text{із}} \cdot \alpha_3}, \quad (25)$$

де, $\alpha_{\text{в}}$ і α_3 – відповідно коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого теплоносія до стінки труби та коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби в навколишнє середовище, Вт/(м²·К); $d_{\text{в}}$ і d_2 – відповідно внутрішній та зовнішній діаметр трубопроводів, м; $d_{\text{із}}$ – зовнішній діаметр теплоізоляції, м; $\lambda_{\text{із}}$ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·К)

Отримана залежність зміни температури води в баці-акумуляторі при різній інтенсивності теплового потоку та часу опромінення показана на рис. 2.

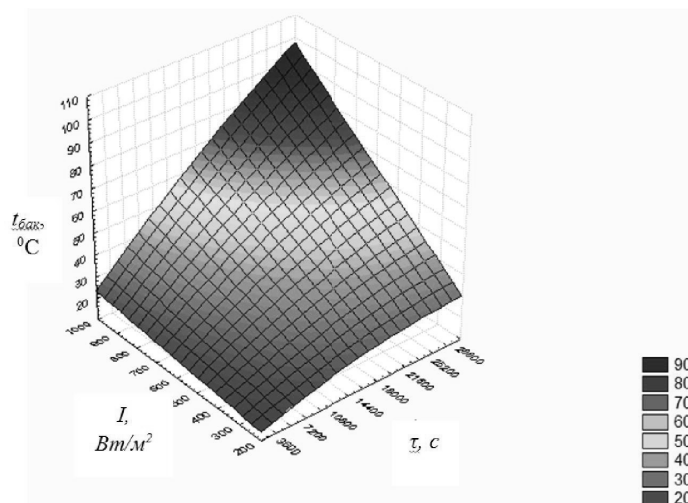


Рис. 2. Залежність зміни температури води в баці-акумуляторі $t_{\text{бак}}$ при різній інтенсивності теплового потоку I та часу опромінення τ

На основі даних рис. 2 отримана формула залежності зміни температури води в баці-акумуляторі $t_{\text{бак}}$ при різній інтенсивності теплового потоку I та часу опромінення τ :

$$t_{\text{бак}} = 10,6 + 0,610^{-3} I + 0,7 \cdot 10^{-2} \tau - 1,79 \cdot 10^{-8} I^2 + 2,6110^{-6} I\tau - 2,08 \cdot 10^{-8} \tau^2 \quad (26)$$

Висновок. Отримана залежність зміни температури води в баці-акумуляторі при різній інтенсивності теплового потоку та часу опромінення дозволяє визначити ефективність системи сонячного теплопостачання з використанням геліопокрівлі впродовж дня в будь-який момент часу.

Література:

1. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман ; пер. с англ. под. ред. Ю. Н. Малевского. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
2. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробкова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 391 с.
3. Фрид С. Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов / С. Е. Фрид. – Москва : ИВТАН АН СССР, 1988. – 57с. – (Препринт № 3-248).
4. Шаповал С. П. Проблеми енергетики України / С. П. Шаповал, А. С. Романів, О. С. Дацько // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : зб. матеріалів I Міжнародного конгресу, 28-29 травня 2009 р. Тези доповідей. – Л. : В-во НУ "ЛП", 2009. – С. 112.

5. Ляшенко М. Б. Математическое моделирование и оптимальное проектирование некоторых хозяйственных гелиотехнических систем / М. Б. Ляшенко, Ш. Р. Реджепова. – Ашхабад : Ылым, 1989. – 124 с.

6. Математическая модель гелиоконтра для системы отопления / [А. П. Беляков, Г. Н. Дульнев, Л. А. Савинцева, Е. В. Сахова] // Гелиотехника. – 1989. – № 6. – С. 25-28.

7. Модель почасового поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность для условий г. Ташкента / [М. К. Карабаев, И. Х. Каримов, М. М. Кенисарин и др.] // Гелиотехника. – 1988. – № 1. – С. 48-52.

Математическое моделирование работы гелиокровли

С. П. Шаповал

Описано моделирование работы гелиокровли. Гелиокровля обеспечивает повышение эффективности системы солнечного теплоснабжения за счет увеличения площади поглощения солнечной энергии. Показано, что можно эффективно использовать тепло кровельного материала здания. Выведена зависимость температуры воды в баке-аккумуляторе от интенсивности теплового потока и времени облучения. Установлена зависимость позволяет определить эффективность гелиокровли при различных условиях.

Ключевые слова: гелиопокрытие, моделирование, количество тепла.

Mathematical modeling the work of helioroof

S. Shapoval

This article describes the modeling the work of helioroof. Helioroof enhances the efficiency of solar heating by increasing the area of the absorption of solar energy. It is shown that heat can be effectively used by roofing material building. Deduced dependence of temperature of water in the accumulator box on the intensity of the heat flux and the exposure time. The dependence allows to determine the effectiveness of helioroof under various conditions.

Keywords: helio roof, modeling, heat.

Надійшла до редакції 17.04.2015 р.