

ІНТЕНСИВНІСТЬ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, СПРЯМОВАНОГО НА ПОХИЛУ ПОВЕРХНЮ

*В.В. Козирський, доктор технічних наук
Л.В. Мартинюк, студентка магістратури*

Наведено метод оцінки інтенсивності сонячної інсоляції, що припадає на вертикальну або похилу поверхню.

Інтенсивність випромінювання, зенітний кут, ймовірність розподілу, статистичний метод.

При аналізі інтенсивності сонячного випромінювання виходять із припущення, що місячні суми сонячної радіації на горизонтальну поверхню змінюються щорічно, проте їх середні багаторічні значення стійкі [2,6,7].

Існують теоретичні та напівемпіричні моделі, засновані на кореляції густини потоку сонячної радіації з хмарністю і прозорістю атмосфери на особливість пропускання нею різних ділянок сонячного спектра [9,10], а також в використанні для апроксимації гармонічних функцій [11].

Розрахунки найчастіше виконують у припущенні, що сприймаюча поверхня є горизонтальною. Проте, насправді, поверхня в геліосистемах, що використовується, може бути вертикальною, похилою або іншої форми. Тому завдання визначення ступеня сприйняття сонячної радіації незалежно від напрямку поверхні, заслуговує уваги. Крім того, слід враховувати варіаційний характер сонячної радіації для досліджуваної місцевості.

Мета досліджень – визначення інтенсивності сонячного випромінювання, що сприймається досліджуваною поверхнею залежно від її напрямку відносно сонячних променів.

Матеріали та методика досліджень. Інтенсивність сонячного випромінювання в значній мірі залежить від щільності розподілу потоку, що надходить у відповідній точці локалізації споживача. Шукана закономірність може бути визначена на основі статистичних методів.

Для використання статистичних методів, повинна бути визначена функція щільності розподілу інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить, як випадкової величини. Визначити таку функцію для будь-якої площі можна, спираючись на дані, постійно одержуваних за сонячною інсоляцією за завчасно заданим проміжком часу. Такі відомості були отримані для території України.

На основі виконаних досліджень встановлено, що щільність розподілу описується різними принципами параметричного розподілу: Джонсона SB (Jonson SB), Вейкебі (Wakeby), Бета (Beta), Кумарасвами (Kumaraswamy), узагальненим Парето (Gen Pareto) і Дагум (Dagum).

Найбільшого поширення набули розподіл Джонсона (72 % території країни) і розподіл Вейкебі (25 % території).

Незалежні випадкові величини x_1, \dots, x_n , які отримані на основі вимірів, мають задану функцію $F(x)$, яка є основою критерію Колмогорова - Смирнова, побудована на статистиці. Критерій згоди Колмогорова - Смирнова в цьому випадку має значення в межах 0,022 – 0,043.

Розподіл Джонсона SB описується залежністю [9]:

$$f(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2}} \frac{\lambda}{\pi(x-\varepsilon)(\lambda-x+\varepsilon)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[y + \eta \ln\left(\frac{x-\varepsilon}{\lambda-x+\varepsilon}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

де η і λ – параметри форми; y – параметр розсіювання; ε – центр розсіювання.

Розподіл Вейкеби описується залежністю:

$$f(x) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} [1 - (1 - F)^\beta] - \frac{\gamma}{\delta} [1 - (1 - F)^{-\delta}], \quad (2)$$

де β і δ – параметри форми; α і γ – параметри розсіювання; ξ – центр розсіювання.

Розподіл Джонсона і Вейкебі належать до класу розподілу екстремальних величин з вимогою уточнення «хвостом» розподілу. Для зон з найбільшим потенціалом сонячної енергії «хвосту» мають виражений підйом, для зон зі зниженим потенціалом характерний пологий хвіст.

Для аналізу закономірності сприйняття сонячного випромінювання на похилій поверхні, звернемося до методики, викладеної в монографії [3].

Результати досліджень. Для розрахунку інтенсивності сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню, яка поглинає промені, необхідно знати кути падіння сонячних променів на цю поверхню в даному місці. Положення деякої точки А на земній поверхні щодо сонячних променів у даний момент часу визначається трьома основними кутами: широтою місцевості φ , годинним кутом ω і відміною Сонця δ (рисунок) [7]. Широта φ – це кут між лінією, що з'єднує точку А з центром Землі О, та її проекцією на площину екватора (ОА*). Часовий кут ω – це кут, виміряний в екваторіальній площині між проекцією лінії ОА і проекцією лінії ОВ, що з'єднує центри Землі і Сонця. Кут $\omega = 0$ в сонячний полудень, щогодини відповідає 15° довготи, при цьому значення часового кута до полудня вважаються позитивними, а після полудня – негативними.

Схиляння Сонця δ – це кут між лінією, що з'єднує центри Землі і Сонця ОВ та її проекцією на площину екватора (ОВ*). Схиляння Сонця протягом року безперервно змінюється, від $-23^\circ 27'$ у день зимового сонцестояння (22 грудня) до $+23^\circ 27'$ в день літнього сонцестояння (22 червня) і дорівнює нулю в дні весняного та осіннього рівнодення (21 березня і 23 вересня відповідно). Схиляння Сонця в будь-який день року можна визначити за формулою:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right), \quad (3)$$

де n – порядковий номер дня, відрхований від 1 січня, зазвичай береться номер середнього розрахункового дня місяця для I – XII місяців року. Поряд із зазначеними основними кутами в розрахунках сонячної радіації використовують також зенітний кут z , кут висоти сонцестояння α і азимут a Сонця (рисунок).

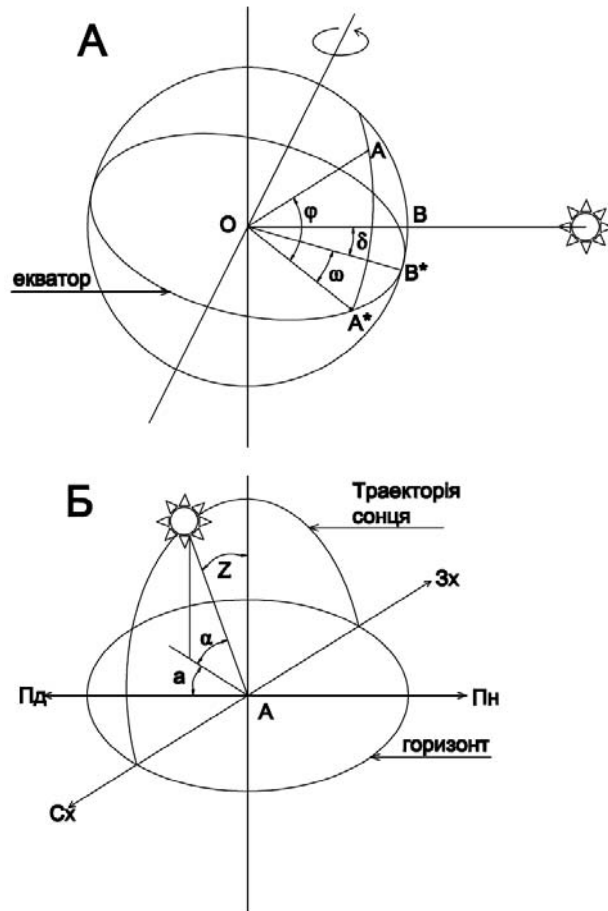


Схема руху сонця по небосхилу (а); кути, які визначають точки А на земній поверхні відносно сонячних променів (б)

Зенітний кут Сонця z – це кут між сонячним променем і нормаллю до горизонтальної площини в точці А. Кут висоти сонцестояння α – це кут у вертикальній площині між сонячним промінням та його проекцією на горизонтальну площину. Сума кутів $a + z$ дорівнює 90° . Азимут Сонця a – це кут у горизонтальній площині між проекцією сонячного променя і напрямком на південь. Азимут поверхні a_n вимірюється як кут між нормаллю до поверхні і напрямком на південь.

Зв'язок між додатковими та основними кутами встановлюється такими рівняннями:
зенітний кут:

$$\cos z = \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta ;$$

кут висоти сонцестояння: $\alpha = 90 - z$, тому $\sin \alpha = \cos z$;

азимут Сонця:

$$\sin \alpha = \sec \alpha \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega .$$

У сонячний полудень ($\omega = 0$) $\alpha = 0$ при $\varphi > \delta$ і $\alpha = \pi$ при $\varphi < \delta$. Максимальний кут висоти сонцестояння досягається в сонячний полудень, при $\omega = 0$, тобто $\alpha_{\text{макс}} = \frac{\pi}{2} - |\varphi - \delta|$. При користуванні наведеними формулами для північної півкулі широта φ береться зі знаком «+», а для південної – зі знаком «-»; відхилення Сонця δ має знак «+» для літа (від весняного до осіннього рівнодення) і знак «-» в інші пори року. Кут ω змінюється від 0 у сонячний полудень до 180° опівночі, при $\omega < 90^\circ$ він має знак «+», а при $\omega > 90^\circ$ – знак «-». Азимут Сонця α змінюється від 0 до 180° . Кут падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню, що має азимут $a_{\text{п}}$ і кут нахилу до горизонту β , визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \cos i = \sin \beta [\cos \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos a_{\text{п}} \cdot \cos \omega + \sin a_{\text{п}} \cdot \sin \omega) - \\ - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos a_{\text{п}}] + \cos \beta \cdot (\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi). \end{aligned} \quad (4)$$

Це співвідношення має важливе практичне значення, оскільки при куті падіння прямого сонячного випромінювання на скляну поверхню (прозоре покриття СК) під кутом понад 60° пропускна здатність скла різко зменшується, це необхідно враховувати при проведенні теплових розрахунків сонячних колекторів. Вираз (4) також може бути використано для розрахунку можливого затінення геліополя від різного роду об'єктів, розташованих у районі геліосистеми. Кут падіння променів на горизонтальну поверхню можна отримати, підставивши в формулу (4) значення $\beta = 0$:

$$\cos i = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi. \quad (5)$$

Кут падіння променів на вертикальну поверхню ($\beta = 90^\circ$):

$$\begin{aligned} \cos i = \cos \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos a_{\text{п}} \cdot \cos \omega + \sin a_{\text{п}} \cdot \sin \omega) \\ - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos a_{\text{п}} \end{aligned} \quad (6)$$

Для нахиленої поверхні з південним орієнтуванням ($a_{\text{п}} = 0^\circ$) маємо:

$$\cos i = \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (7)$$

Інтенсивність (щільність) потоку сонячної радіації для будь-якого просторового положення сонячного колектора в довільний момент часу можна визначити за формулою:

$$J = J_S P_S + J_D P_D, \quad (8)$$

де J_S і J_D – інтенсивності потоків прямої і розсіяної сонячної радіації, що падають на горизонтальну поверхню; P_S і P_D – коефіцієнти положення сонячного колектора для прямої і розсіяної сонячної радіації відповідно. Коефіцієнти положення сонячного колектора можна розрахувати за формулами:

$$P_D = \frac{\cos^2 \beta}{2}; \quad (9)$$

$$P_S = \frac{\cos i}{\sin \alpha}. \quad (10)$$

Для забезпечення уловлювання максимальної кількості (за розрахунковий період) сонячної енергії колектор встановлюють у похилому положенні з оптимальним кутом нахилу до горизонту β , який визначається розрахунковим шляхом і залежить від періоду експлуатації. При південній орієнтації сонячних колекторів $\beta = \varphi$ для цілорічних геліосистем; $\beta = \varphi - 15^\circ$ для сезонних геліосистем (період експлуатації квітень – жовтень). Для сезонних геліосистем співвідношення (4) набуде вигляду:

$$\cos i = 0,259 \sin \delta + 0,966 \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (11)$$

Для цілорічних:

$$\cos i = \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (12)$$

Кількість сонячної енергії, що падає на поверхню сонячного колектора, залежить від орієнтації його відносно південного напрямку, тобто від азимута a_{Π} . При $a_{\Pi} = \pm 15^\circ$ середньорічне надходження сонячної енергії на поверхню сонячного колектора всього на 2 % менше, ніж для південно орієнтованого. При $a_{\Pi} = \pm 40^\circ$ ця різниця становить 13 %, причому найбільше відхилення (25 %) має місце в січні, а найменше (5 %) – у червні та липні.

З метою більш точного розрахунку параметрів геліосистем розроблена математична модель, що враховує стохастичну закономірність хмарності й температури навколишнього середовища [4].

Температура сонячних променів, що надходять T_c , залежить від ступеня хмарності O та температури поверхні в тіні T_T , а остання – від атмосферних фронтів, руху повітряних мас і баричних утворень.

Залежність між температурами T_c і T_T можна прийняти лінійною.

$$T_c = aT_T + bO + c. \quad (13)$$

Коефіцієнти a, b та c рівняння регресії (13) можуть бути визначені з використанням методу найменших квадратів:

$$F(a; b; c) = \sum_{i=1}^n (T_{c_i} - aT_{T_i} - bO_i - c)^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

де n – кількість використаних статистичних даних.

У результаті простих перетворень отримують такі залежності:

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^n T_{T_i}^2 + b \sum_{i=1}^n T_{T_i} O_i + c \sum_{i=1}^n T_{T_i} &= \sum_{i=1}^n T_{T_i} T_{c_i}; \\ a \sum_{i=1}^n T_{T_i} O_i + b \sum_{i=1}^n O_i^2 + c \sum_{i=1}^n O_i &= \sum_{i=1}^n O_i T_{c_i}; \\ a \sum_{i=1}^n T_{T_i} + b \sum_{i=1}^n O_i + cn &= \sum_{i=1}^n T_{c_i}. \end{aligned} \quad (15)$$

Автокорреляційна функція має вигляд:

$$y(j) = \sum_{k=0}^m d_k E(j-k), \quad y = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (16)$$

де m – кількість інтервалів, що покривають час спаду автокорреляційної функції випадкового процесу; d_k – дослідний коефіцієнт; $E(j, k)$ – стаціонарна одинична некорреляційна випадкова послідовність.

Розрахунок надходження сонячної радіації на похилі поверхні може бути виконаний таким способом.

При визначенні щільності сонячної радіації, що надходить на похилу поверхню, її слід розділяти на пряму $Q_{пр.}$ та розсіяну $Q_{розс.}$ складові.

Потік прямої сонячної радіації $Q_{пр.}$ слід розглядати як векторну величину. Потік прямої сонячної радіації, що надходить на похилу поверхню, $Q_{пох.}$ можна визначити за залежністю:

$$Q_{пох.} = Q_{гор.} \cos \beta + Q_{сп.} \sin \beta, \quad (17)$$

де $Q_{гор.}$ і $Q_{сп.}$ – потік прямої сонячної радіації відповідно на горизонтальну і вертикальну площини; β – кут нахилу поверхні до горизонту.

При розрахунку геліосистем, як правило, необхідно знати середні надходження прямої сонячної радіації за добу по місяцях року. Для перерахунку середніх добових надходжень прямої радіації з горизонтальної поверхні на вертикальну вводиться коефіцієнт перерахунку k , залежно від орієнтації поверхні, географічної широти місцевості та пори року [5]:

$$Q_{сп.} = k Q_{гор.} \quad (18)$$

Отже, надходження сонячної радіації на довільно орієнтовану поверхню визначається за залежністю, в основу якої покладена закономірність надходження прямої сонячної радіації на горизонтальну поверхню:

$$Q_{\text{пox.}} = Q_{\text{гop.}} (\cos \beta + k \sin \beta). \quad (19)$$

Інтенсивність розсіяної сонячної радіації, що надходить на похилу поверхню, залежить від того, яка частина небесної напівсфери висвітлює її та яке альbedo навколишнього середовища [1]. Потік розсіяної сонячної радіації визначають за формулою:

$$Q_{\text{дi cн. i o.}} = \frac{Q_{\text{дi cн. i o.}} (1 + \cos \beta)}{2}. \quad (20)$$

Сума прямої та розсіяної сонячної радіації для добових або місячних надходжень дорівнює:

$$Q_{\text{aae.}} = \frac{Q_{\text{ai o.}} (\cos \beta + k \sin \beta) + Q_{\text{дi cн. i o.}} (1 + \cos \beta)}{2}. \quad (21)$$

Теоретичні дослідження повинні бути доповнені експериментальними даними на основі пірометрів [8].

Висновки

При аналізі можливих режимів роботи систем, що використовують сонячну енергію, додатково слід використовувати дані надходження сонячної радіації в ясний і похмурий дні різних місяців.

При розрахунку систем теплопостачання на базі сонячної енергії для кожної конкретної місцевості слід враховувати локальні характеристики – зміну інтенсивності сприйняття сонячного випромінювання, розташування поверхні, що сприймає сонячні промені.

Список літератури

1. Богословский В.Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Н. Богословский, М.Я. Поз. – М.: Стройиздат, 1983. – С. 319.
2. Валов М.И. О точности определения интенсивности солнечной радиации при расчетах гелиоустановок / М.И. Валов, В.Н. Горшков, Э.И. Некрасова // Гелиотехника. – 1982. – №6.
3. Горин А.Н. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха / А.Н. Горин, А.В. Дорошенко. – Донецк.: Норд – Пресс. 2006. – 341 с.
4. Качан Ю.Г. Моделирование параметров окружающей среды для задачи проектирования гелиосистем горячего теплоснабжения / Ю.Г. Качан, С.А. Левченко, Н.М. Трипутень // Відновлювана енергетика. – 2007. – №4. – С. 51–53.

5. Кондратьев К.Я. Радиационный режим наклонных поверхностей / К.Я. Кондратьев, З.М. Пивоваров, М.П. Федорова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 340 с.
6. Рабинович М.Д. Сравнение различных методов представления климатической информации при расчетной производительности гелиосистем / М.Д. Рабинович // Гелиотехника. – 1986. – №3.
7. Системы солнечного тепло – и хладоснабжения / [Э.Р. Авязов, М.А. Барский – Зорин, Н.М. Васильев и др.]; под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича.– М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
8. Теплотрия в сельском хозяйстве / Б.Х. Драганов, С.А. Сажина, Ю. М. Сергиенко, В.Г. Федоров; под ред. Б.Х. Драганова. – К.: Изд-во УСХА, 1993. – 280 с.
9. Look D.C. Shopt method for the analytical determination of atmospheric model parameters // Solar Energy. – 1975. – Vol.17 – p. 265
10. Morrison C.A., Feber E.A. Development and use of solar insolation data in northern latitude for south facing surfaces // Solar Energy. – 1976. – Vol. 17. – P. 116 – 120
11. Norris D.G. Correlation of solar radiation with cloud // Solar Energy. – 1968. – Vol. 12. – P. 107 – 112

Приведен метод оценки интенсивности солнечной инсоляции, приходящейся на вертикальную или наклонную поверхность.

Интенсивность излучения, зенитный угол, вероятность распределения, статистический метод.

A method for measuring the intensity of solar insolation falling on a vertical or inclined surface.

The intensity of radiation, zenith angle, the probability distribution, the statistical method.

УДК:621.313.322

ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В АВТОНОМНОМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ З КОМПЕНСОВАНИМИ АСИНХРОННИМИ МАШИНАМИ

С.С. Макаревич, асистент

Проаналізовано енергетичні перетворення в автономному електромеханічному комплексі з компенсованими асинхронними машинами, проведено порівняння основних енергетичних показників автономного асинхронного генератора та компенсованого автономного асинхронного