

УДК 535.232+52-323.2

Т. Г. Сабірзянов, проф., д-р техн. наук, О. І. Сіріков, доц., канд. техн. наук,
М. В. Кубкін, асист., В. П. Солдатенко, асист.*Кіровоградський національний технічний університет*

Алгоритм визначення густини потоку сонячного випромінювання на довільно-орієнтовану поверхню

В статті шляхом використання методів сферичної астрономії та векторного аналізу для визначення погодинного надходження енергії від Сонця був отриманий аналітичний вираз знаходження горизонтальних координат Сонця за значеннями дня року та часу доби а також отримана зручна аналітична залежність кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану світлосприймаючу поверхню в функції часу доби, дня року та орієнтації поверхні; розроблено алгоритм розрахунку погодинної орієнтації світлосприймаючої поверхні для систем слідування за Сонцем.
координати Сонця, сонячна радіація, густина потоку сонячного випромінювання, HDKR-модель

В даний час все ширше застосовуються установки, які перетворюють енергію Сонця в електричну або теплову. Тому виникає необхідність інженерного розрахунку систем із перетворювачами сонячної енергії. Як відомо надходження енергії від Сонця відносно постійне у часі, але на нього впливають багато факторів, як то стан атмосфери, нахил світло сприймаючої поверхні, пора року і час дня.

Ще 20-30 років тому велись активні спостереження за випромінюванням Сонця розширеною мережею метеостанцій. Усі дані збирались, оброблялись та систематизувались [1, 2]. Проте зараз такі спостереження ведуться лише кількома великими метеостанціями. Відтак при проектуванні енергетичних систем з сонячними установками виникають певні труднощі з оцінкою енергії, що надходить на їх поверхню [3].

Метою статті є розробка зручного способу визначення положення Сонця для будь-якого часу доби та створення алгоритму визначення густини потоку сонячного випромінювання на похилу поверхню.

Кількість сонячної радіації, яка потрапляє на приймаючу поверхню (фотоелектричну батарею, сонячний колектор тощо) залежить від положення Сонця відносно цієї поверхні. Положення Сонця відносно нерухомого спостерігача на поверхні Землі визначається двома горизонтальними координатами: азимутом та висотою (рис. 1, а).

Азимут Сонця A_{\odot} — це кут між напрямком на північ та горизонтальною проекцією напрямку на Сонце. Може приймати значення від 0° до 360° .

Висота Сонця h_{\odot} — це кут між горизонтальною площиною та напрямком на Сонце, приймає значення від -180° до 180° .

Так як Земля рухається як навколо власної осі так і навколо Сонця, то горизонтальні координати (A_{\odot}, h_{\odot}) будуть неперервно змінюватись як на протязі доби так і на протязі року. Для визначення поточних горизонтальних координат Сонця скористаємося першою системою екваторіальних координат. У ній в якості координат використовують схилення Сонця δ_{\odot} та часовий кут Сонця t_{\odot} (рис. 3.2, б).

Схилення Сонця можна визначити за формулою Купера [4]:

$$\delta_{\odot}(t) = 23,45^{\circ} \sin \left[360^{\circ} \frac{284 + d(t)}{365} \right], \quad (1)$$

де $d(t)$ — номер дня року.

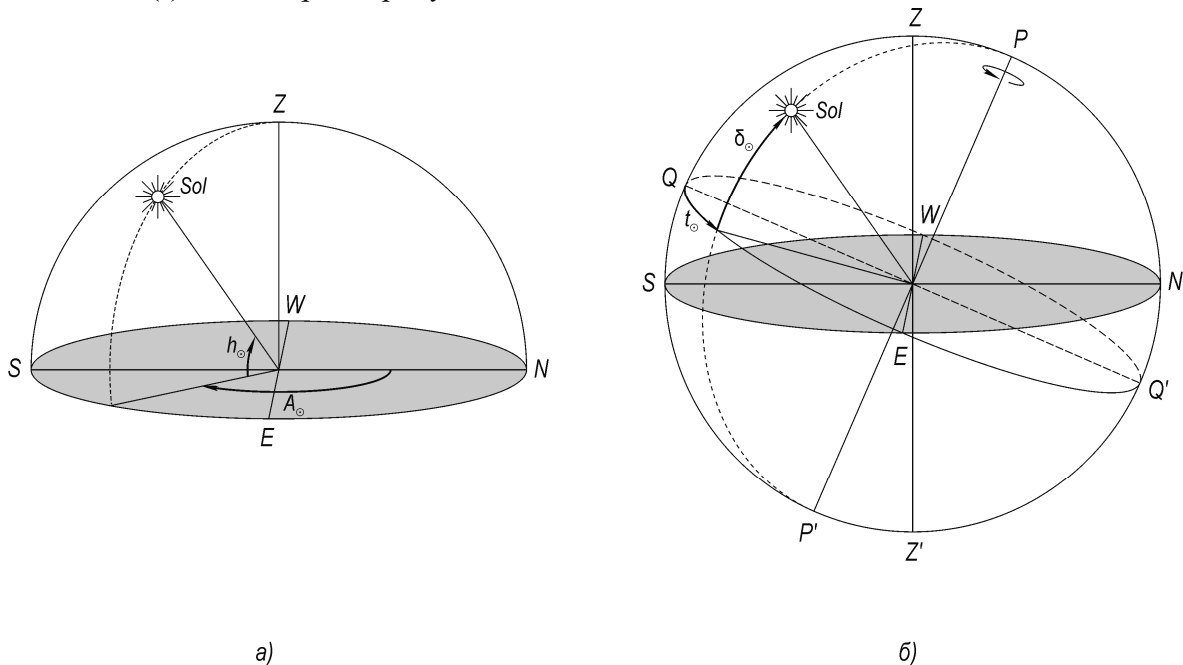


Рисунок 1 — Горизонтальні (а) та екваторіальні (б) координати Сонця

Часовий кут Сонця визначається перерахуванням середнього місцевого часу на істинний сонячний час:

$$t_{\odot}(t) = \left[\tau(t) + \frac{\lambda}{15^{\circ}} - Z_n + E(t) - 12^h \right] \cdot 15^{\circ}, \quad (2)$$

де $\tau(t)$ — поточний час доби (змінюється в межах від 0^h до 24^h);

λ — довгота місця (на схід від Гринвічу додатна, на захід — від'ємна);

Z_n — номер часового поясу (так, для UTC2 $Z_n = 2$, для UTC3 $Z_n = -3$);

$E(t)$ — рівняння часу (різниця між істинним сонячним та середнім часом) [5]:

$$E(t) = 3,85 \cdot [0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B(t) - 0,032077 \cdot \sin B(t) - 0,014615 \cos 2B(t) - 0,04089 \sin 2B(t)],$$

де $B(t)$ — середній сонячний кут [5]:

$$B(t) = [d(t) - 1] \frac{360^{\circ}}{365}.$$

Визначивши за рівняннями (1) та (2) екваторіальні координати Сонця можна перейти до горизонтальних координат [6]:

$$h_{\odot}(t) = \arcsin [\sin \delta_{\odot}(t) \sin \varphi + \cos \delta_{\odot}(t) \cos \varphi \cos t_{\odot}(t)]; \quad (4)$$

$$A_{\odot}(t) = \begin{cases} A', & \text{при } \sin t_{\odot}(t) < 0; \\ 360^{\circ} - A', & \text{при } \sin t_{\odot}(t) \geq 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{де } A' = \arccos \left[\frac{\sin \delta_{\odot}(t) - \sin \varphi \sin h_{\odot}(t)}{\cos \varphi \cos h_{\odot}(t)} \right];$$

φ — широта місцевості.

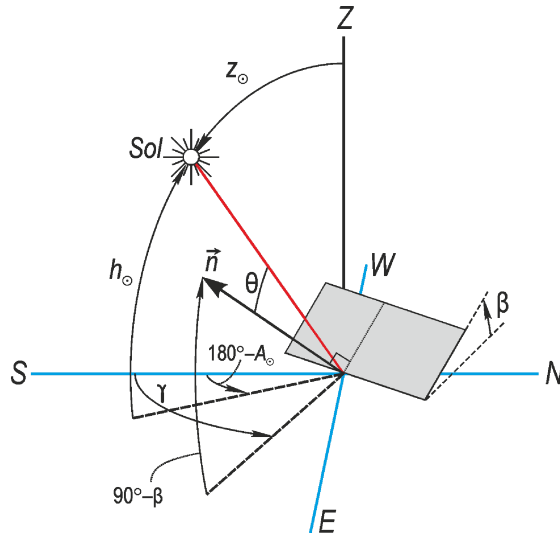


Рисунок 2 — До визначення кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню θ
 \vec{n} — нормаль до приймаючої поверхні

Кількість сонячної радіації, що потрапляє на похилу поверхню залежить від кута падіння променів на цю поверхню (рис. 2). Якщо поверхня має нахил відносно горизонту β , а її орієнтація відносно напрямку на Південь визначається кутом γ , то кут падіння сонячних променів θ можна визначити за виразом:

$$\cos \theta(t) = \sin \beta \sin \gamma \sin A_{\odot}(t) \cos h_{\odot}(t) - \sin \beta \cos \gamma \cos A_{\odot}(t) + \cos \beta \sin h_{\odot}(t). \quad (6)$$

Прийнято вважати, що потік сонячного випромінювання від Сонця величина постійна в часі. Але кількість випромінювання, яке надходить у верхні шари атмосфери коливається протягом року, оскільки відстань між Сонцем та Землею змінюється протягом року із-за ексцентриситету орбіти Землі.

Густина потоку позаземного нормального сонячного випромінювання, тобто кількість сонячної радіації, що падає на перпендикулярну променям поверхню на межі атмосфери, визначається як в [4]:

$$I_{0n}(t) = I_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \frac{360d(t)}{365} \right], \quad (7)$$

де $I_{0n}(t)$ — густина потоку позаземного нормального випромінювання, кВт/м²;

$I_{sc} = 1,367 \text{ кВт/м}^2$ — сонячна стала;

$d(t)$ — номер дня року.

Очевидно, що густина потоку *позаземного випромінювання* буде визначатись наступним чином:

$$I_0(t) = I_{0n}(t) \cos z_{\odot}(t) = I_{0n}(t) \cos [90^{\circ} - h_{\odot}(t)] = I_{0n}(t) \sin h_{\odot}(t), \quad (8)$$

де $I_0(t)$ — густина потоку позаземного горизонтального випромінювання, кВт/м²;

$I_{0n}(t)$ — густина потоку позаземного нормального випромінювання, кВт/м²;

$z_{\odot}(t)$ — зенітний кут;

$h_{\odot}(t)$ — висота Сонця над горизонтом.

Для отримання середнього значення густини потоку позаземної горизонтальної радіації проінтегруємо (8):

$$\begin{aligned} \bar{I}_0(t) &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_{\odot 1}}^{t_{\odot 2}} I_{0n}(t) \sin h_{\odot}(t) dt = \\ &= \frac{12}{\pi} I_{0n}(t) \left[\cos \varphi \cos \delta_{\odot}(t) [\sin t_{\odot 2}(t) - \sin t_{\odot 1}(t)] + \frac{\pi [t_{\odot 2}(t) - t_{\odot 1}(t)]}{180^{\circ}} \sin \varphi \sin \delta_{\odot}(t) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

де $\bar{I}_0(t)$ — середнє значення густини потоку позаземної горизонтальної радіації за 1 годину, кВт/м²;

$t_{\odot 1}(t)$ та $t_{\odot 2}(t)$ — часові кути Сонця на початок t_1 та кінець t_2 годинного інтервалу.

Рівняння (9) дозволяє визначити середню кількість сонячної радіації, що потрапила на горизонтальну поверхню у верхніх шарах атмосфери за 1 годину. З іншого боку дані спостереження за сонячним випромінюванням на земних метеостанціях дають інформацію про кількість сонячної радіації, яка потрапила на горизонтальну поверхню в нижньому шарі атмосфери (біля поверхні Землі) за той самий проміжок часу. Відношення кількості випромінювання біля земної поверхні до кількості випромінювання у верхніх шарах атмосфери має назву *коефіцієнта ясності атмосфери* і визначається як:

$$k_{\text{ясн}}(t) = \frac{\bar{I}(t)}{\bar{I}_0(t)}, \quad (10)$$

де $\bar{I}_0(t)$ — середнє значення густини потоку позаземної радіації на горизонтальну поверхню за 1 годину;

$\bar{I}(t)$ — середнє значення густини потоку горизонтальної радіації біля поверхні Землі за інтервал 1 година.

Сонячне випромінювання можна представити як суму двох складових — *пряму і дифузну сонячну радіації*:

$$\bar{I}(t) = \bar{I}_{\text{пр}}(t) + \bar{I}_{\text{диф}}(t), \quad (11)$$

де $\bar{I}_{\text{пр}}(t)$ — середнє значення густини потоку прямої сонячної радіації за годину, кВт/м²;

$\bar{I}_{\text{диф}}(t)$ — середнє значення густини потоку дифузної сонячної радіації за годину, кВт/м².

Пряма радіація – це частина сонячного випромінювання, яке надходить безпосередньо від Сонця до поверхні Землі без розсіяння в атмосфері. Розсіяна радіація – це частина сонячного випромінювання, напрямок якого був змінений внаслідок розсіювання в атмосфері Землі

Різниця між прямою і розсіяною радіацією відіграє важливу роль при розрахунку сумарної радіації, яка падає на похилу поверхню. Орієнтація поверхні має істотний впливає на пряму сонячну радіацію, яка надходить лише від Сонця, ніж на розсіяну радіацію, яка надходить з усіх частин неба.

Тим не менше в практиці на метеостанціях частіше вимірюють повну сонячну радіацію, а не її компоненти. Це означає, що розрахунковим методом потрібно визначити складові сонячного випромінювання, щоб правильно визначити кількість випромінювання, яке падає на приймальну поверхню. З цією метою можна використати співвідношення, за яким можна визначити долю розсіяної радіації в залежності від коефіцієнта ясності атмосфери [7]:

$$\frac{\bar{I}_{\text{диф}}(t)}{\bar{I}(t)} = \begin{cases} 1 - 0,009k_{\text{ясн}}(t) & \text{при } k_{\text{ясн}}(t) \leq 0,2; \\ 0,9511 - 0,1604k_{\text{ясн}}(t) + \\ 4,388k_{\text{ясн}}^2(t) - 16,638k_{\text{ясн}}^3(t) + & \text{при } 0,22 < k_{\text{ясн}}(t) \leq 0,8; \\ 12,336k_{\text{ясн}}^4(t) & \\ 0,165 & \text{при } k_{\text{ясн}}(t) > 0,8; \end{cases} \quad (12)$$

Для кожного годинного інтервалу використовується повна сонячна радіація на горизонтальну поверхню для розрахунку коефіцієнту ясності, а потім розсіяної радіації. Далі визначається пряма сонячна радіація шляхом віднімання розсіяного випромінювання від повного.

Існує кілька методик для оцінки сонячної радіації в залежності від часу, вимірюваних радіаційних даних, типу клімату і місця розташування.

Для розрахунку повного випромінювання, яке падає на похилу поверхню будемо використовуватися модель HDKR (Hay-Davies-Klucher-Reindl) [8]. Згідно цієї моделі сонячна радіація поділяється на пряму та розсіяну. Розсіяна радіація в свою чергу має три складові:

- а) ізотропну складову
- б). навколосонячну складову
- в) позагоризонтну складову

Середнє значення густини потоку сонячного випромінювання на похилу поверхню згідно моделі HDKR (рис. 3) [8]:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\beta}(t) = & \left[\bar{I}_{\text{пр}}(t) + \bar{I}_{\text{роз}}(t)A_i(t) \right] R_{\text{пр}}(t) + \\ & + \bar{I}_{\text{пр}}(t)[1 - A_i(t)] \frac{1 + \cos\beta}{2} \left[1 + f(t) \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + \\ & + \bar{I}(t)\rho_{\text{зп}} \frac{1 - \cos\beta}{2}, \end{aligned} \quad (13)$$

де $\rho_{\text{зн}}$ — альbedo земної поверхні;

$R_{\text{пр}}(t)$ — геометричний фактор для прямої сонячної радіації,

A_i — анізотропний індекс;

f — коефіцієнт «просвітлення горизонту».

Геометричний фактор для прямої сонячної радіації визначається відношенням прямої радіації на похилу поверхню до прямої радіації на горизонтальну поверхню:

$$R_{\text{пр}}(t) = \frac{\cos \theta(t)}{\cos z_{\odot}(t)}. \quad (14)$$

Анізотропний індекс A_i є мірою прозорості атмосфери для прямої радіації. Цей коефіцієнт використовується для оцінки кількості навколосонячного випромінювання, яке також називають передрозсіяною радіацією:

$$A_i(t) = \frac{\bar{I}_{\text{пр}}(t)}{I_0(t)}. \quad (15)$$

Величина f означається як коефіцієнт, що враховує «просвітлення горизонту», або той факт, що більша частина розсіяної радіації надходить із-за горизонту, а не від усього неба. Цей коефіцієнт пов'язаний з хмарністю і задається наступним рівнянням:

$$f(t) = \sqrt{\frac{\bar{I}_{\text{пр}}(t)}{\bar{I}(t)}}. \quad (16)$$

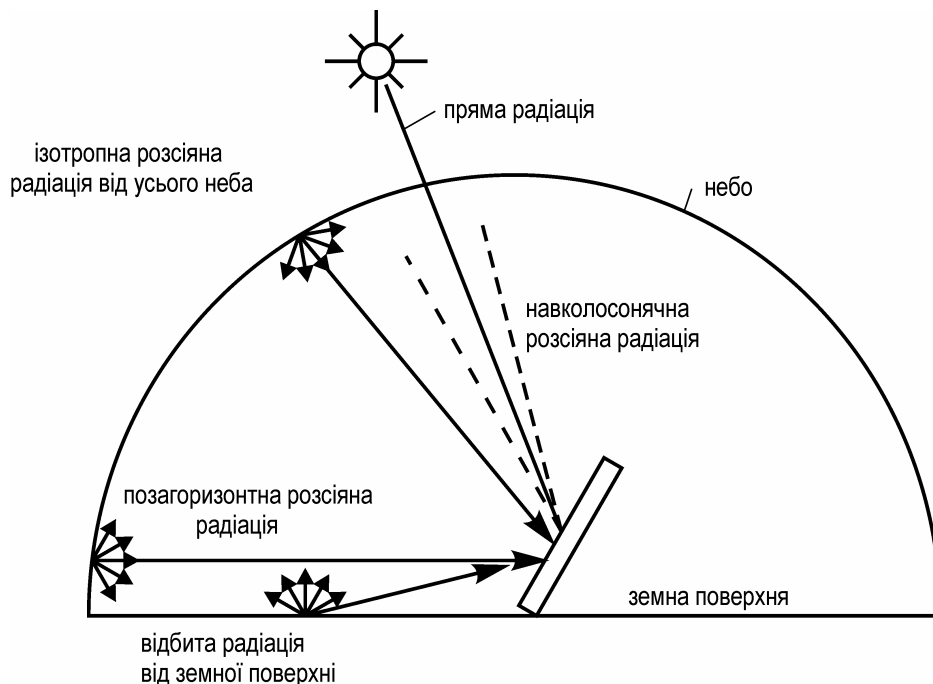


Рисунок 3 — Пряма, розсіяна і відбита радіація на похилу поверхню згідно моделі HDKR

Алгоритм визначення координат Сонця та кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню приведений на рис. 4.

Алгоритм визначення середнього значення густини потоку повної сонячної радіації на похилу поверхню за 1 годину приведений на рис. 5

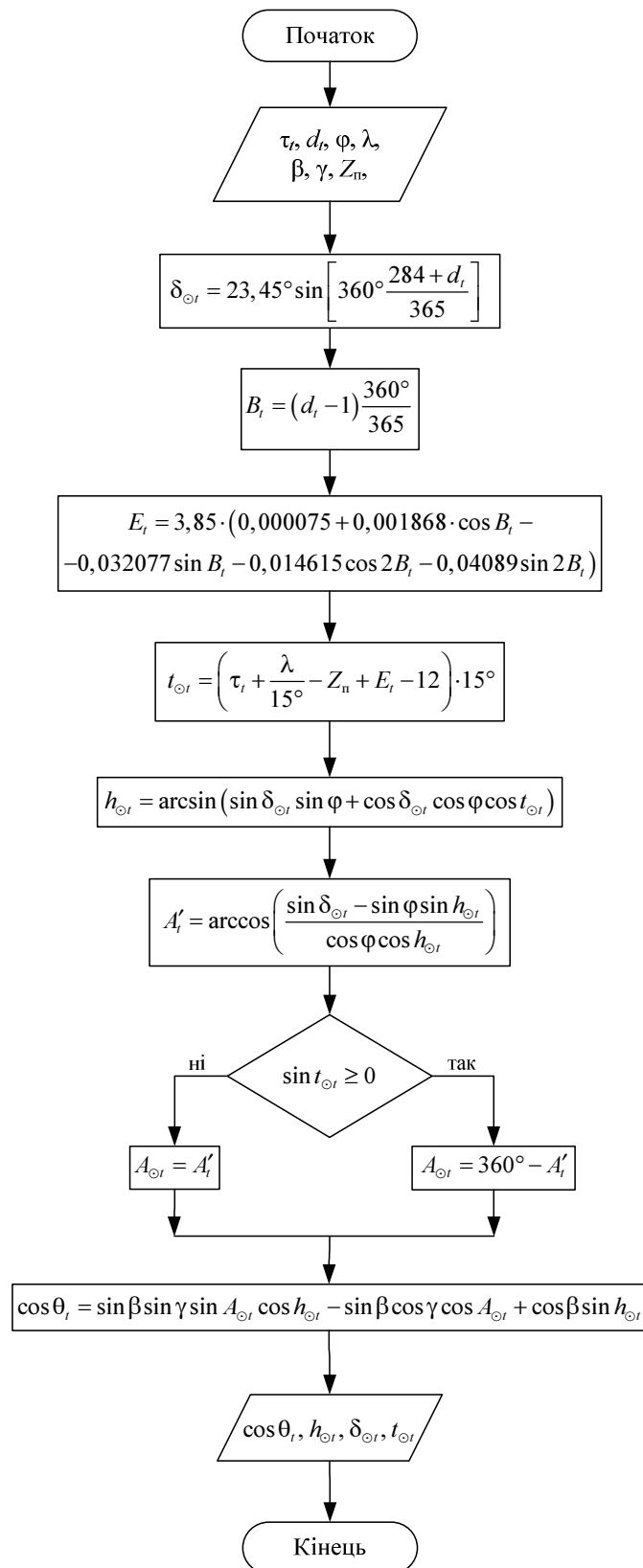
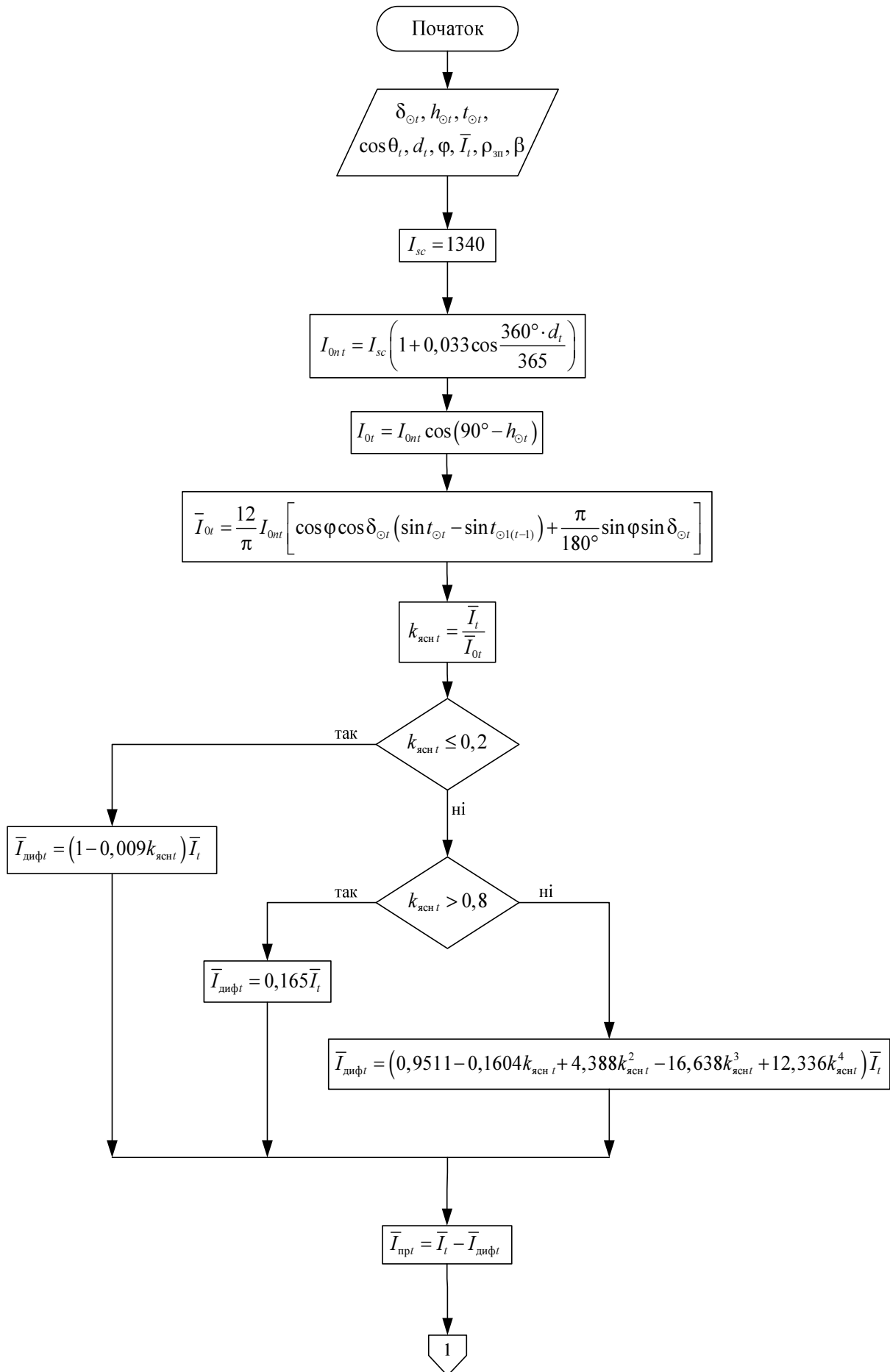


Рисунок 4 — Алгоритм визначення координат Сонця та кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню



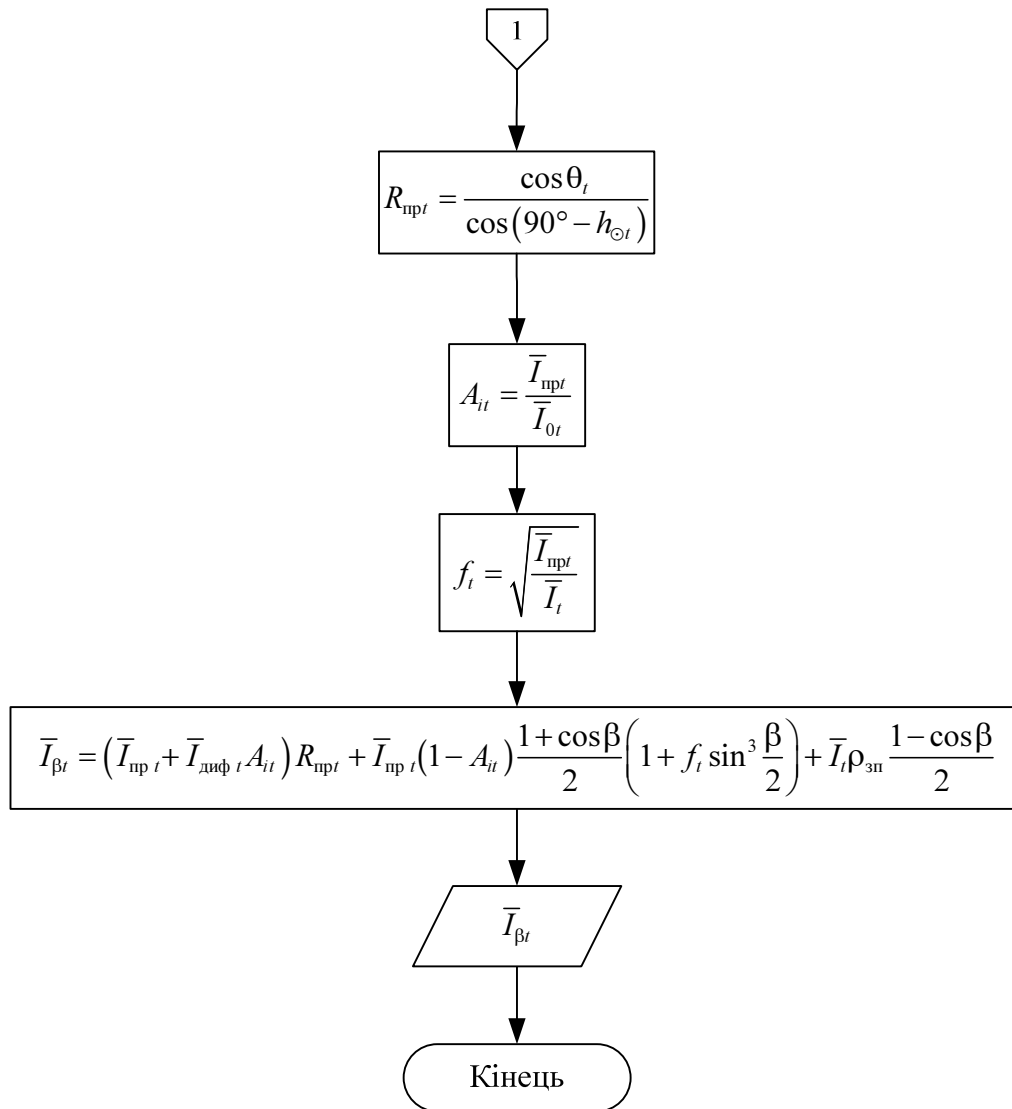


Рисунок 5 — Алгоритм визначення середнього значення густини потоку повної сонячної радіації на похилу поверхню за 1 годину

Висновки. В статті шляхом використання методів сферичної астрономії та векторного аналізу для визначення погодинного надходження енергії від Сонця був отриманий аналітичний вираз знаходження горизонтальних координат Сонця за значеннями дня року та часу доби.

Отримана зручна аналітична залежність кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану світлосприймаючу поверхню в функції часу доби, дня року та орієнтації поверхні.

Розроблено алгоритм визначення координат Сонця та кута падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню.

Розроблено алгоритм розрахунку погодинної орієнтації світлосприймаючої поверхні для систем слідкування за Сонцем.

Список літератури

1. Справочник по климату СССР. Выпуск 10. Украинская ССР. Часть I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. — 126 с.
2. Справочник по климату СССР. Выпуск 10. Украинская ССР. Часть III. Ветер. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. — 690 с.
3. Кубкін М.В. До питання оцінки енергетичних ресурсів сонця та вітру в Кіровоградській області / М.В. Кубкін, П.Г. Плешков, Т.Г. Сабірзянов, В.П. Солдатенко // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Техн. науки. Випуск 102. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» — Харків: ХНТУСГ, 2010. — С. 50—51.
4. Cooper P. I. The Absorption of Solar Radiation in Solar Still // Solar Energy 12, 3 — 1968
5. Spenser J.W. Search 2 (5), 172 (1971) “Fourier Series Representation of the Position of the Sun”
6. Белова Н.А. Курс сферической астрономии. — М.: Наука, 1971 — 183 с.
7. Erbs D.G. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly-average global radiation / D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie, Solar Energy, 28, 293 — 1982
8. Duffie J. Solar engineering of thermal processes / J. Duffie, W. Beckman. — John Wiley & Sons, Inc, New York — 1980.

Т. Сабірзянов, О. Сириков, М. Кубкин, В. Солдатенко

Алгоритм определения плотности потока солнечного излучения на произвольно ориентированную поверхность

В статье с помощью методов сферической астрономии и векторного анализа для определения почасового поступления энергии от Солнца было получено аналитическое выражение нахождения горизонтальных координат Солнца по значению дня года и времени суток, а также получена удобная аналитическая зависимость угла падения солнечных лучей на произвольно-ориентированную поверхность в функции времени суток, дня года и ориентации поверхности; разработан алгоритм расчета почасовой ориентации светлопринимающей поверхности для систем слежения за Солнцем.

T. Sabirzanov, O. Sirikov, M. Kubkin, V. Soldatenko

Algorithm of determination of closeness of stream of sun radiation on the arbitrarily oriented surface

In the article by the use of methods of spherical astronomy and vectorial analysis for determination of sentinel receipt of energy from a Sun analytical expression of finding of horizontal co-ordinates of a Sun was got after the values of day of year and time of days and also comfortable analytical dependence of angle of incidence of sunbeams is got on the arbitrarily oriented surface in the function of time of days, day of year and orientation of surface; the algorithm of calculation of sentinel orientation of surface is developed for the systems of surveillance on a sun.

Одержано 07.12.11