

**А. В. БОРЦОВ**, к.т.н., с.н.с., доцент НТУ «ХПИ» ;  
**Е. И. ПОТОВСКАЯ**, инженер 1-й кат. НТУ «ХПИ»

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАКЛОННОЙ ПРИНИМАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлена методика расчета солнечного излучения безоблачного неба для горизонтально расположенной и наклонной принимающей поверхности. Рассмотрены случаи определения мгновенных и суточных значений солнечного излучения. Приведена оценка полученных результатов.

**Ключевые слова:** солнечное излучение, склонение, широта, принимающая поверхность, азимут, часовой угол Солнца, показатель ясности.

**Введение.** Целью нашего исследования является энергообеспечение автономных средств связи и контроля обеспечения безопасной работы высоковольтных воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Для решения данной задачи были предложены несколько способов энергообеспечения, в частности использование солнечных батарей. На сегодняшний день существуют достаточно подробные таблицы интенсивности солнечного излучения для областных центров Украины [1], тем не менее, эти данные не являются достаточными для целей нашей работы, так как ВЛ не проходят по областным центрам, а расположены вдалеке от населенных пунктов. Метод расчета солнечного излучения (СИ) приведенный в данной статье позволяет определять количество СИ приходящее на принимающую поверхность (ПП) расположенную в произвольном месте имея данные широты, азимута, угла наклона ПП и времени года, для которого необходимо провести расчет.

Количество солнечного излучения полученного поверхностью контролируется, в глобальном масштабе геометрией Земли, атмосферной проницаемостью и относительным размещением Солнца. В местном масштабе излучение изменяется из-за наклона поверхности, перспективы и возвышения. При расчете энергии приходящей на конкретную поверхность используют метеорологические данные по солнечному излучению ( $R_s$ ), так как эти данные получены для горизонтальных поверхностей, они требуют доработки. Для наклонной поверхности общее солнечное излучение состоит из суммы трех компонентов:

1. прямое излучение – часть солнечного излучения, которая не поглощена и не рассеяна в атмосфере, она достигает поверхности непосредственно от Солнца.

2. диффузное излучение – часть солнечного излучения, которая была рассеяна при прохождении его через атмосферу.

© А.В.Борцов, Е. И. Потовская 2013

3. отраженное излучение – часть солнечного излучения, которая была отражена от земных поверхностей (этот компонент имеет небольшие размеры).

Предлагаемая методика расчета базируется на ранее известных моделях [2], [3], [4] и [5]. Методика расчета состоит из двух этапов:

1. расчет внеземного солнечного излучения ( $R_u$ ) для заданных угла наклона и азимута;

2. расчет солнечного излучения для безоблачного неба.

Внеземное солнечное излучение в любой момент времени, при дневном свете, это функция угла падения солнечного излучения:

$$R_u = \frac{G_s \cdot \cos(\theta)}{d^2} \quad (1)$$

где  $G_s$  – солнечная постоянная (1367 Вт/м<sup>2</sup>);

$d$  – относительное расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах;

$\cos(\theta)$  – косинус угла падения солнечного излучения относительно нормали к поверхности земли.

Параметр  $d$  – это функция дня года, она может быть рассчитана по формуле [4]

$$d^2 = \frac{1}{1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right)} \quad (2)$$

где  $D$  – день года.

Полное уравнение для нахождения мгновенного угла падения солнечного излучения на наклонную поверхность [5]

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin S \cdot \sin \omega \quad (3)$$

где  $\delta$  – склонение Солнца, град.;

$\varphi$  – широта точки, град.;

$S$  – наклон поверхности, град.;

$\gamma$  – азимут принимающей поверхности, град. (для принимающей поверхности ориентированной на юг  $\gamma = 0^\circ$ , для принимающей поверхности ориентированной на восток  $\gamma = -90^\circ$ ; для принимающей поверхности ориентированной на запад  $\gamma = 90^\circ$ , для принимающей поверхности ориентированной на север  $\gamma = \pm 180^\circ$ );

$\omega$  – часовой угол Солнца, град. ( $\omega = 0$  в солнечный полдень, отрицательный утром и положительный после полудня).

Склонение Солнца рассчитывается исходя из формулы [5]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (284 + D) \right] \quad (4)$$

В случае горизонтальной принимающей поверхности ( $S = 0$ ), а азимут не существен уравнение (3) преобразуется к виду:

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

где,  $\cos \theta_g$  – косинус угла падения солнечного излучения относительно нормали к горизонтальной поверхности.

Для получения внеземного солнечного излучения за определенный период проинтегрируем уравнение (3) по  $\omega$ :

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_g d\omega = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S \cdot (\omega_2 - \omega_1) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot (\omega_2 - \omega_1) + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin S \cdot (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \quad (6)$$

Если брать для  $\omega_1$  и  $\omega_2$  моменты начала и окончания солнечного дня можно рассчитать, таким образом, количество внеземного солнечного излучения за сутки.

$$\sin \omega_1 = \frac{a \cdot c - b \cdot \sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}; \quad (7)$$

$$\sin \omega_2 = \frac{a \cdot c + b \cdot \sqrt{b^2 + c^2 - a^2}}{b^2 + c^2}, \quad (8)$$

где  $a, b, c$  – константы для наклона, широты и азимута принимающей поверхности;

$$a = \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S - \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S; \quad (9)$$

$$b = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma; \quad (10)$$

$$c = \cos \delta \cdot \sin S \cdot \sin \gamma. \quad (11)$$

Для горизонтально расположенной принимающей поверхности  $\omega_1$  и  $\omega_2$  равны  $-\omega_s$  и  $\omega_s$ , где  $-\omega_s$  это часовой угол солнца во время восхода, а  $\omega_s$  это закатный часовой угол рассчитывается по формуле [5]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad (12)$$

Солнечное излучение чистого неба ( $R_c$ ), его мгновенное значение рассчитывается:

$$R_c = K_{Bo} \cdot R_u + (f_{ia} \cdot K_{Do} + \alpha \cdot (1 + f_i) \cdot [K_{Bo} + K_{Do}]) \cdot R_{ug}, \quad (13)$$

где  $K_{Bo}$  – показатель ясности для прямого излучения;

$K_{Do}$  – показатель ясности для рассеянного излучения;

$f_{ia}$  – фактор «небесного вида» (sky-view) для анизотропного рассеянного излучения;

$f_i$  – фактор «небесного вида» для изотропного рассеянного излучения [6];

$$f_i = 0,75 + 0,25 \cdot \cos S - \frac{0,5}{\pi} \cdot S \quad (14)$$

$R_{ug}$  – внеземное СИ на горизонтальную поверхность, Вт·ч/м<sup>2</sup>;

$$R_{ug} = \frac{G_s \cdot T}{\pi \cdot d^2} \cdot (\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \omega_s + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_s) \quad (15)$$

где  $T$  – время освещенности, ч.

Показатель ясности для прямого СИ [7]:

$$K_{Bo} = 0,98 \cdot \exp \left( \frac{-0,00146 \cdot P}{K_t \cdot \sin \beta} - 0,075 \cdot \left( \frac{W}{\sin \beta} \right)^{0,4} \right) \quad (16)$$

где  $K_t$  – эмпирический коэффициент мутности;

$P$  – атмосферное давление, Па;

$\beta$  – угол Солнца относительно горизонта для горизонтальной принимающей поверхности, град.;

$W$  – эквивалент глубины влагосодержания в атмосфере:

$$W = 0,4 \cdot e_a \cdot P + 2,1 \quad (17)$$

где  $e_a$  – фактическое давление пара, Па.

Показатель ясности для рассеянного излучения рассчитывается по формуле:

$$K_{Do} = 0,25 - 0,36 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } K_{Bo} \geq 0,15; \quad (18 \text{ а})$$

$$K_{Do} = 0,18 + 0,82 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } 0,065 < K_{Bo} < 0,15; \quad (18 \text{ б})$$

$$K_{Do} = 0,1 + 2,08 \cdot K_{Bo} \quad \text{для } K_{Bo} \leq 0,065. \quad (18 \text{ в})$$

В случае мгновенных значений  $\sin \beta$  находится из выражения [5]:

$$\sin \beta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega. \quad (19)$$

Для расчета суточного солнечного излучения  $\sin \beta$  рассчитывается по формуле:

$$\sin \beta = \frac{(b \cdot g - a \cdot h) \cdot f_1 - c \cdot g \cdot f_2 + (0,5 \cdot b \cdot h - a \cdot g) \cdot f_3 + 0,25 \cdot b \cdot h \cdot f_4 + 0,5 \cdot c \cdot h \cdot f_5}{b \cdot f_1 - c \cdot f_2 - a \cdot f_3} \quad (20)$$

где  $g$  и  $h$  – константы для широты:

$$g = \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (21)$$

$$h = \cos \delta \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$  – параметры для углов восхода и захода Солнца:

$$f_1 = \sin \omega_2 - \sin \omega_1 \quad (23)$$

$$f_2 = \cos \omega_2 - \cos \omega_1 \quad (24)$$

$$f_3 = \omega_2 - \omega_1 \quad (25)$$

$$f_4 = \sin 2\omega_2 - \sin 2\omega_1 \quad (26)$$

$$f_5 = \sin^2 \omega_2 - \sin^2 \omega_1 \quad (27)$$

Для анизотропного рассеянного излучения [6]:

Надійшла до редколегії 09.10.2013

$$f_{ia} = (1 - K_{Bog}) \cdot \left( 1 + \left[ \frac{K_{Bog}}{K_{Bog} + K_{Dog}} \right]^{0,5} \cdot \sin^3 \left( \frac{S}{2} \right) \right) \cdot f_i + K_{Bo} \cdot \frac{R_u}{R_{ug}} \quad (28)$$

где  $K_{Bog}$  – показатель ясности для прямого излучения на горизонтальную принимающую поверхность;

$K_{Dog}$  – показатель ясности для рассеянного излучения на горизонтальную принимающую поверхность.

Суточное значение солнечного излучения для чистого неба состоит из прямого излучения, рассеянного излучения и отраженного излучения:

$$R_c = R_b + R_d + R_r \quad (29)$$

где  $R_b$  – суточное значение прямого солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>;

$R_d$  – суточное значение рассеянного солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>;

$R_r$  – суточное значение отраженного солнечного излучения, Вт·ч/м<sup>2</sup>.

Прямая составляющая солнечного излучения это:

$$R_b = K_{Bo} \cdot R_u \quad (30)$$

Рассеянная составляющая солнечного излучения:

$$R_d = f_{ia} \cdot K_{Dog} \cdot R_{ug} \quad (31)$$

Отраженная составляющая солнечного излучения:

$$R_r = R_{ug} \cdot \alpha \cdot (1 - f_i) \quad (32)$$

### Выводы.

Предлагаемая методика расчета солнечного излучения:

1. Позволяет рассчитать количество солнечного излучения в произвольной точке земной поверхности;

2. Учитывает достоинства и недостатки методик [2 – 5];

3. Количество солнечного излучения, рассчитанное по приведенной методике, отличается от табличных значений [1] в среднем не более чем на 16,5 %;

4. Расчетные данные, полученные по предлагаемой методике, для случая наклонного падения солнечного излучения на поверхность солнечной батареи, расположенной на крыше здания в городе Харькове, подтверждены экспериментально.

**Список литературы:** 1. <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030>. 2. Revfeim K. J. A. A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface. J. Appl. Meteorol. – 1978 – № 17 – P. 1126–1131. 3. Tian Y. Q., Davies-Colley R. J., Gong P., Thorrold B. W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. Short communication. Agric. Forest Meteorol. – 2001 – № 109 – P. 67–74. 4. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Process, 2nd ed. John Wiley and Sons – NY – 1991 – 15 p. 5. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Process, 1st ed. John Wiley and Sons – NY – 1980. 6. Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. Solar Energy – 1990 – № 45 – P. 9–17. 7. ASCE EWRI The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration Calculation, ASCE, Washington, DC – 2005 – p. 190.

УДК 620.9

**Определение интенсивности солнечного излучения для наклонной принимающей поверхности** / А. В. Борцов, Е. И. Потовская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032). – С. 34–39. – Бібліогр.: 7 назв.

Представлена методика розрахунку сонячного випромінювання безхмарного неба для горизонтально розташованої і розміщеної під кутом приймаючої поверхні. Розглянуті випадки визначення миттєвих і добових значень сонячного випромінювання. Наведена оцінка отриманих результатів.

**Ключові слова:** сонячне випромінювання, схилення, широта, приймаюча поверхня, азимут, годинний кут Сонця, показник ясності.

The computing method of the solar radiation for cloudless sky for a horizontal and inclined receiving surfaces, have been submitted. The cases of the definition of instantaneous and daily values of solar radiation, have been considered. The assessment of the findings, have been shown.

**Keywords:** solar radiation, declination, latitude, receiving surface, aspect angle, hour angle, clearness index.