

## ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА НАКЛОННУЮ ЛУЧЕПРИЕМНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

В.А. Пашинский, канд. техн. наук, доцент, А.А. Бутько (МГЭУ им. А.Д. Сахарова)

### Аннотация

*На основании статистических метеорологических данных поступления суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, дана оценка поступления прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации, приходящейся на наклонную лучеприемную поверхность с южной ориентацией. Определены оптимальные углы в течение года для наиболее эффективной утилизации энергии солнца.*

*The assessment of direct, diffused, reflected sun radiation is given on the basis of statistical meteorological data of total sun radiation earnings on the horizontal area. The radiation is fitted on inclined refractive area with south orientation. The optimal angles for effective utilization of sun energy during the year is defined.*

### Введение

Современная экономическая ситуация в Республике Беларусь диктует необходимость реформирования деятельности всех отраслей народного хозяйства. Одной из составляющих такой реструктуризации является изменение структуры в общем потреблении топливно-энергетических ресурсов с дальнейшим выходом на максимально рациональное их использование. В настоящее время проблема использования топливно-энергетических ресурсов сталкивается со следующими факторами: ежегодное увеличение цен на данный вид ресурсов; увеличение зависимости от изменения цен на импорт углеводородного топлива; высокий удельный расход топлива и электрической энергии в производстве. Сложившуюся ситуацию можно ощутимо улучшить за счет вовлечения в структуру топливно-энергетического комплекса возобновляемых видов топлива и источников энергии, использованию которых в мировой практике уделяется большое внимание.

Основными преимуществами возобновляемой энергетики по сравнению с традиционной являются: экологический фактор; инфраструктурные преимущества близости к потребителю; независимость от импорта энергоносителей.

Возможности использования экологически чистой, повсеместно доступной возобновляемой энергии солнечного излучения привлекают все большее внимание. Успехи последних лет в технологии использования энергии солнца и положительный практический опыт использования стали основой быстрого развития гелиоэнергетики в мире.

Энергия солнца может быть преобразована в тепловую энергию, механическая энергия – в электрическую, которая, в свою очередь, используется в химических и биологических процессах. Гелиоустановки находят широкое применение в системах отопления и охлаждения жилых и общественных зданий, технологических процессах, протекающих при низких, средних и высоких температурах. Они используются для получе-

ния горячей воды, сушки материалов и сельскохозяйственных продуктов и т.д. Кроме того, солнечная энергия является катализатором, которая осуществляет процесс фотосинтеза и рост растений, в результате чего происходят различные фотохимические процессы.

Существует ряд методов преобразования солнечной энергии, среди которых наибольшее практическое применение получили фотоэлектрические преобразователи и системы термодинамического преобразования.

Государственная программа Республики Беларусь на период до 2020 г. предусматривает использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в нарастающих масштабах. Так, по данным Государственной комплексной программы модернизации основных производственных фондов Белорусской энергетической системы энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов, потенциальные запасы солнечной энергии составляют 71000 тыс. т у. т., причем экономически целесообразное использование в 2010 году составит 3 тыс. т у. т., что в 10 раз больше за аналогичный период 2007 года [1].

### Основная часть

При расчете и проектировании гелиоустановок и фотоэлектрических элементов, для достижения более высокой эффективности их использования, необходимо определить количество солнечной радиации, поступающей на наклонную лучеприемную поверхность определенной ориентации, которая определяется астрономическими факторами, режимом облачности, прозрачностью атмосферы.

### Методы исследований

Для расчета располагаемого количества солнечной энергии, поступающей на наклонную лучеприемную поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на горизонтальную и вертикальную поверхности в данном месте.

Для данного момента времени положение некоторой точки определяется следующими основными углами – склонением  $\delta$  и часовой углом  $\omega$  Солнца, широтой местоположения точки  $\varphi$ .

Склонение Солнца  $\delta$  в течение года изменяется от  $+23^{\circ}26,5'$  в день летнего солнцестояния и  $-23^{\circ}26,5'$  – в день зимнего солнцестояния, и равно нулю в дни весеннего и осеннего равноденствия.

Склонение Солнца  $\delta$  в данный день определяется по формуле [2]:

$$\delta = 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos\left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N} + 9,1^{\circ}\right) - 0,3915 \cdot \cos\left(2 \cdot \left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N}\right) + 5,4^{\circ}\right) + 0,1764 \cdot \cos\left(3 \cdot \left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N}\right) + 105,2^{\circ}\right), \quad (1)$$

где  $n$  – порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января;  $N$  – число дней в году.

Данные высоты Солнца над горизонтом в градусах приведены на 15-е число месяца, в феврале – на 14-е (табл. 1).

Часовой угол Солнца  $\omega$  определяется по формуле:

$$\omega = (12,00ч - \tau_{ист}) \cdot 15^{\circ} / ч, \quad (2)$$

где  $\tau_{ист}$  – истинное солнечное время, определяемое видимым движением солнца.

$$\tau_{ист} = \tau_m + \Delta\tau, \quad (3)$$

где  $\tau_m$  – среднее солнечное время, определяется равномерным движением, так называемого, среднего солнца;  $\Delta\tau$  – уравнение времени, мин.

Разность между истинным временем и средним солнечным временем изменяется в течение года, но не бывает больше 16 минут.

Уравнение времени  $\Delta\tau$  для данного дня определяется по формуле[2]:

$$\Delta\tau = 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos\left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N} + 85,9^{\circ}\right) + 9,9359 \cdot \cos\left(2 \cdot \left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N}\right) + 108,9^{\circ}\right) + 0,3387 \cdot \cos\left(3 \cdot \left(360^{\circ} \cdot \frac{n}{N}\right) + 105,2^{\circ}\right). \quad (4)$$

Данные уравнения времени приведены на 15-е число месяца, в феврале – на 14-е (табл. 2).

Угол  $\omega = 0$  в солнечный полдень, а 1 ч соответствует  $15^{\circ}$ .

Наряду с вышеуказанными углами в расчете солнечной радиации используется зенитный угол  $\theta_z$ ,

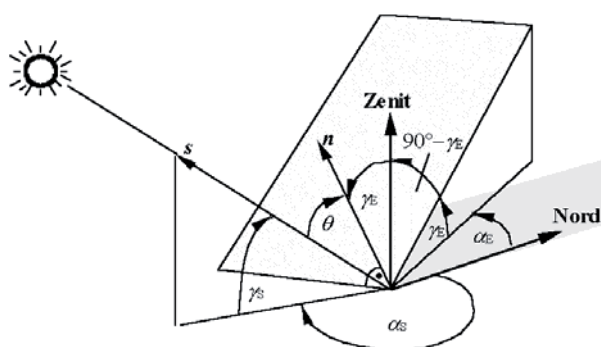


Рис. 1. Схема для расчета поступления солнечной радиации на наклонную поверхность:  $\gamma_S$  – высота Солнца;  $\gamma_E$  – угол наклона плоскости;  $\alpha_S$  – азимут Солнца;  $\alpha_E$  – азимут наклонной поверхности;  $\theta$  – угол падения солнечного луча на плоскость;  $n$  – нормаль к наклонной плоскости

угол высоты  $\gamma_S$  и азимут Солнца  $\alpha_S$ .

Связь между основными и дополнительными углами устанавливается следующими уравнениями [2]:

– угол высоты Солнца  
 $\gamma_S = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta); \quad (5)$

– зенитный угол  
 $\theta_z = 90^{\circ} - \gamma_S;$

– азимут Солнца

Таблица 1. Склонение Солнца на 15-е число месяца (град)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\delta$	-21,04	-13,32	-2,61	9,59	18,92	23,22	21,42	14,32	3,50	-8,33	-18,54	-23,14

Таблица 2. Уравнение времени на 15-е число месяца (град)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta\tau$	-9,09	-14,39	-9,17	0,09	3,61	-0,04	-5,63	-4,62	4,55	14,33	15,33	4,87

$$\alpha_S = \begin{cases} 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \Rightarrow \tau_{\text{учт.}} \leq 12.00 \\ 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \Rightarrow \tau_{\text{учт.}} \geq 12.00 \end{cases}$$

Максимальный угол высоты Солнца достигается в солнечный полдень при  $\omega = 0$ , т.е.  $\gamma_{S\text{max}} = \pi/2 - |\varphi - \delta|$ . Азимут Солнца изменяется от 0 до 360°, достигая 180° в солнечный полдень.

Угол падения лучей на горизонтальную поверхность [2]:

$$\theta = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi. \quad (7)$$

Угол падения лучей на вертикальную поверхность [2]:

$$\theta = \cos \delta (\sin \varphi \cdot \cos \alpha_E \cdot \cos \omega + \sin \alpha_E \cdot \sin \omega) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha_E, \quad (8)$$

где  $\alpha_E$  – азимут наклонной поверхности, °.

Азимут вертикальной поверхности  $\alpha_E$  в том случае, если поверхность ориентирована на юг, равен 0°, на запад – 90°, на восток – 90°, на север – 180°.

Угол падения солнечных лучей на произвольно ориентированную поверхность с южной ориентацией определяется по формуле [2]:

$$k = \frac{E_{\text{накл.}}}{E_{\text{гор.}}} = \frac{S \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \gamma_S} + D \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E) + E_{\text{гор.}} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E)}{E_{\text{гор.}}}, \quad (11)$$

$$\theta = \arccos \left( \begin{aligned} & -\cos \alpha_S \cdot \cos \gamma_S \cdot \cos \alpha_E \cdot \sin \gamma_S - \\ & -\sin \alpha_S \cdot \cos \gamma_S \cdot \sin \alpha_E \cdot \sin \gamma_E + \\ & + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E \end{aligned} \right) = \arccos \left( \begin{aligned} & -\cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \\ & + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E \end{aligned} \right), \quad (9)$$

где  $\gamma_E$  – угол наклонной лучеприемной поверхности, °.

Среднемесячное дневное суммарное количество солнечной радиации, поступающей на наклонную поверхность, ориентированную на юг, определяется по формуле:

$$E_{\text{накл.}} = E_{\text{гор.}} \cdot k, \quad (10)$$

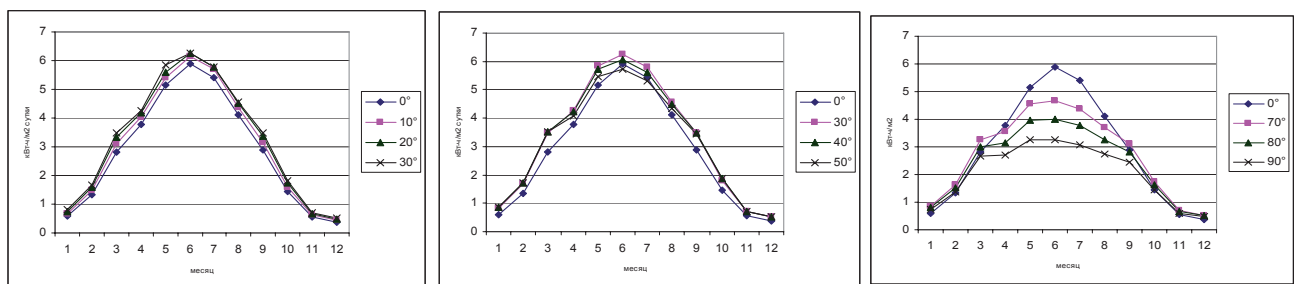
где  $E_{\text{гор.}}$  – среднемесячное суммарное количество солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, кВт/(м<sup>2</sup>·дни);

$k$  – отношение среднемесячных дневных сумм солнечной радиации, поступающей на наклонную и горизонтальную поверхности.

Коэффициент пересчета количества солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную лучеприемную поверхность с южной ориентацией равен сумме трех составляющих, соответствующих прямой, рассеянной и отраженной радиации:

**Таблица 3. Отношения среднемесячных потоков суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонную и горизонтальную поверхности (д. Волма Дзержинского района)  $\varphi = 53,89^\circ$ ;  $\lambda = 26,98^\circ$**

	I	II	III	VI	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
10°	1,14	1,11	1,11	1,07	1,05	1,04	1,05	1,06	1,09	1,11	1,10	1,14	1,09
20°	1,26	1,19	1,19	1,11	1,08	1,06	1,07	1,1	1,16	1,2	1,18	1,25	1,15
30°	1,35	1,25	1,24	1,13	1,08	1,06	1,07	1,11	1,2	1,25	1,24	1,34	1,19
40°	1,41	1,29	1,26	1,12	1,06	1,03	1,04	1,09	1,21	1,29	1,27	1,40	1,21
50°	1,44	1,29	1,26	1,08	1,01	0,97	0,98	1,05	1,19	1,29	1,28	1,43	1,19
60°	1,43	1,27	1,22	1,03	0,94	0,89	0,91	0,98	1,14	1,26	1,26	1,43	1,15
70°	1,40	1,21	1,16	0,94	0,84	0,79	0,81	0,9	1,07	1,2	1,21	1,40	1,08
80°	1,34	1,14	1,07	0,84	0,73	0,68	0,7	0,79	0,97	1,12	1,14	1,34	0,99
90°	1,24	1,03	0,95	0,72	0,6	0,55	0,57	0,67	0,85	1,01	1,04	1,25	0,87



**Рис. 2. Годовой ход средних суточных сумм суммарной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность (д. Волма Дзержинского р-на)**

где  $S$  – количество прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, кВт/(м<sup>2</sup> · дни);

$D$  – количество рассеянной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, кВт/(м<sup>2</sup> · дни);

$E_{\text{сop.}}$  – количество суммарной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, кВт/(м<sup>2</sup> · дни);

$A$  – отражательная способность поверхности, %. [2, 3, 4].

Отношения среднемесячных потоков суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонную и горизонтальную поверхности с южной ориентацией для д. Волма Дзержинского района, представлены в табл. 3.

Изменение прихода солнечной радиации в течение года на наклонную поверхность показано на рис. 2.

Проведенные расчеты позволяют определить оптимальный угол наклонной поверхности в течение года. На рис. 3 представлены зависимости месячных сумм солнечной радиации от угла наклона поверхности к горизонту для каждого месяца года.

Оптимальный угол наклона варьируется от 22° в июне до 58° в декабре, причем для весеннего периода оптимальный угол наклонной поверхности составляет 33°, летнего – 24°, осеннего – 44°, зимнего – 54°. В течение года оптимальный угол располагается в диапазоне от 25° до 35°.

#### Заключение

Оптимальный угол лучеприемной поверхности к горизонту в течение года составляет 32° (1166,6 кВт·ч/м<sup>2</sup> год). Данная величина угла может варьироваться в зависимости от сезона: декабрь-февраль – 50° (92,1 кВт·ч/м<sup>2</sup>); март-май – 32° (408,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>); июнь-август – 25° (504,4 кВт·ч/м<sup>2</sup>); сентябрь-ноябрь – 42° (185,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>).

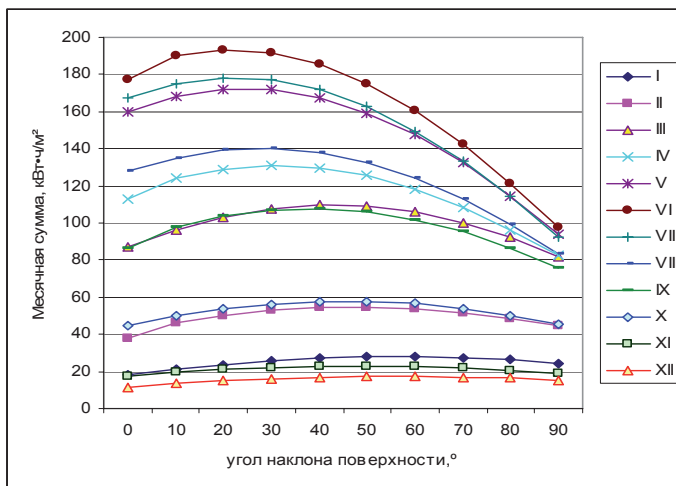


Рис. 3. Поступления месячных сумм суммарной солнечной радиации от угла наклонной поверхности (д. Волма Дзержинского района)

Для более эффективного использования систем термодинамического преобразования угол наклона составляет от 25-27° (910,4-911,1 кВт·ч/м<sup>2</sup>), при условии эксплуатации с апреля по сентябрь. Следует заметить, что эти углы являются оптимальными именно для д. Волма Дзержинского района. Для других пунктов с такой же широтой они могут несколько отличаться.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черноусов, С.В. Энергетика Беларуси смотрит в будущее / С.В. Черноусов // Энергоэффективность, 2006. – № 2. – С. 12-15.
2. Quaschnig V. Regenerative Energiesysteme. 3. Aufl. München: Hanser, 2003. p. 345.
3. Reindl, D. Fraction Correlations/ D. Reindl, W. Beckman, J. Diffie. 1989. S. 2028-2086.
4. Справочник по климату СССР: солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Лн.: изд-во «Гидрометеорологическое», 1966. – Ч. 1. – С. 68.

**“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.**

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по сельскохозяйственным и техническим наукам (сельскохозяйственное машиностроение, транспорт, геоэкология, энергетика). Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на первое полугодие 2010 года: для индивидуальных подписчиков - 27000 руб., ведомственная подписка - 52986 руб.