

Производительность гелиоколлектора при различных режимах эксплуатации

А.Маркин, А.Мысливец

Недостатком солнечного излучения как источника энергии является неравномерность его поступления на земную поверхность в течение года. При некорректном проектировании, это может привести к простоям гелиоустановки при пиках солнечной радиации в летние месяцы и недостаточной теплопроизводительности зимой. В связи с этим угол наклона солнечного коллектора является важным параметром, изменяя который можно оптимизировать теплопроизводительность солнечной установки под конкретный сезонный режим работы, что способствует повышению эффективности использования солнечной энергии.

Основным элементом гелиоустановки является коллектор. Для расчета теплопроизводительности плоского солнечного коллектора (СК) необходимо определить: располагаемое количество солнечной энергии q' , поступающей на его наклонную светопрозрачную поверхность; приведенную поглощательную способность теплопринимающей пластины τ_a и эффективный коэффициент теплопотерь коллектора η_k .

Определение количества солнечной энергии

При расчете располагаемого количества солнечной энергии, падающей на наклонную поверхность на широте определенной местности, необходимо знать угол падения солнечных лучей i на произвольно ориентированную поверхность (угол между нормалью к плоскости коллектора и солнечными лучами, падающими в эту точку). Азимут наклонной поверхности α_n (угол между направлением нормали плоскости коллектора по странам света и направлением на юг) и угол наклона плоскости солнечного коллектора к горизонту β .

Схема движения солнца по небосводу и углы, определяющие положение СК на земной

поверхности относительно солнечных лучей приведены на рис. 1.

Угол падения солнечных лучей i на произвольно ориентированную поверхность при углах α_n и β , заданных проектом, определяется по формуле:

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos \alpha_n \cos \omega + \sin \alpha_n \sin \omega) - \sin \delta \cos \varphi \cos \alpha_n] + \cos \beta (\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi), \quad (1)$$

где

φ – широта местности;

δ – склонение (угловое положение Солнца относительно горизонтальной поверхности, зависящее от времени года);

ω – часовой угол, равный нулю в полдень для коллекторов ориентированных на юг, через каждый час значение часового угла меняется на 15°;

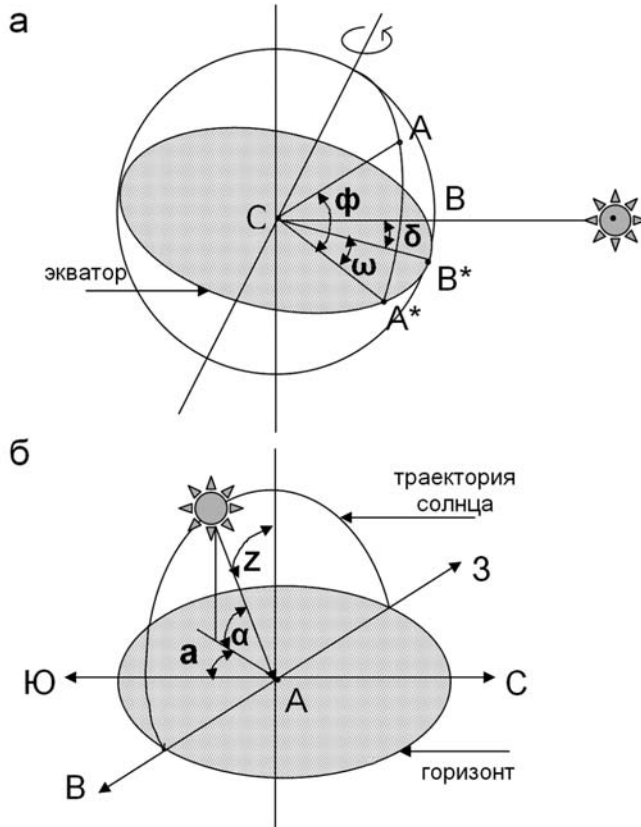
$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right), \quad (2)$$

где n – порядковый номер дня года (в качестве n берется номер среднего расчетного дня месяца для I – XII месяцев года);

$$\omega = 180^\circ - 15^\circ \tau, \quad (3)$$

где τ – время суток в часах.

При проведении тепловых расчетов солнечных коллекторов необходимо учитывать, что при угле падения прямого солнечного из-



лучения на прозрачное покрытие солнечного коллектора под углом свыше 60° пропускная способность стекла резко уменьшается. Кроме того, выражение (1) может быть использовано для расчета возможного затенения гелиополя от различного рода объектов, расположенных вблизи гелиосистемы.

Расчет удельного теплового потока

Величина удельного теплового потока q , Вт, падающего на 1 м^2 наклонной поверхности солнечного коллектора в каждый час безоблачного дня, определяется по формуле:

$$q' = H_B P_B + H_D P_D, \quad (4)$$

где

H_B и H_D – удельный тепловой поток, Вт/ м^2 , прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность на широте ϕ данной местности (эти данные приводятся в климатических справочниках);

P_B и P_D – коэффициенты положения солнечного коллектора относительно прямой и рассеянной солнечной радиации, соответственно. Коэффициенты положения солнечного коллектора можно рассчитать по формулам:

$$P_B = \frac{\cos i}{\sin \alpha}, \quad (5)$$

$$P_D = \frac{\cos^2 \beta}{2}, \quad (6)$$

где α – угол высоты солнцестояния (угол в вертикальной плоскости между солнечным лучом и его проекцией на горизонтальную плоскость). Величину P_B можно определить следующим соотношением:

$$P_B = \frac{\cos Q_i}{\cos Q_z} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}, \quad (7)$$

где Q_i , Q_z – углы падения, соответственно, для наклонной и горизонтальной поверхностей.

Произведение коэффициента пропускания солнечного излучения светопрозрачной изоляции τ и коэффициента поглощения абсорбера α принято называть оптическим КПД или приведенной поглощательной способностью $\tau\alpha$ рассчитывается по формуле:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d}, \quad (8)$$

где:

α – коэффициент поглощения абсорбера (приводится производителем в технических данных СК);

τ – пропускная способность прозрачного покрытия;

ρ_d – диффузная отражательная способность.

Для системы прозрачного покрытия (ПП) из одного листа стекла ρ_d приблизительно равна 0,16

Зависимость пропускной способности прозрачного покрытия солнечного коллектора τ от угла i удобно представить с помощью выражения:

$$\tau = \tau_0 \cdot \kappa, \quad (9)$$

где τ_0 – пропускная способность ПП при $i=0^\circ$ (приводится производителем в технических данных СК);

κ – коэффициент, определяемый соотношениями:

$$\kappa = 1, \text{ если } i < 40^\circ,$$

$$\kappa = 2.42691 - 0.08591i + 0.00172i^2 - 1.18432 \cdot 10^{-5} \cdot i^3, \text{ если } i \geq 40^\circ, \quad (10)$$

Учитывая зависимости (6, 7, 8) выражение (4) для удельного потока солнечной радиации, падающего на абсорбер коллектора, можно записать в виде:

$$q' = H_B \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \cdot \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} + H_D \cdot \frac{\cos^2 \beta}{2}, \quad (11)$$

Таким образом, интенсивность теплового потока представляет собою функцию времени года n , времени суток τ , угла наклона β и азимута солнечного коллектора a_n . Зависит от удельного теплового потока, который несет с собой прямое H_B и рассеянное H_D солнечное излучение, падающее на широте ϕ данной местности на горизонтальную плоскость.

Эффективный коэффициент теплопотерь

Важной характеристикой солнечного коллектора является его эффективный коэффициент теплопотерь, η , который определяется как отношение теплопроизводительности солнечного коллектора к падающему на абсорбер потоку солнечной радиации. Зависимость эффективного коэффициента теплопотерь коллектора от разности температур нагреваемого в нем теплоносителя и наружного воздуха при расчетных условиях определяется по формуле:

$$\eta_k = \eta_0 - \frac{\kappa_1 \cdot (t_k - t_0)}{q'} - \frac{\kappa_2 \cdot (t_k - t_0)^2}{q'}, \quad (12)$$

где

η_0 – коэффициент эффективности или внутренней конверсии коллектора, характеризующий эффективность переноса поглощенного абсорбером солнечного излучения к потоку теплоносителя в трубах, зависящий главным образом от конструкции коллектора;

κ_1 – линейный коэффициент теплопередачи;

κ_2 – квадратичный коэффициент теплопередачи (η_0 , κ_1 , κ_2 приводятся производителем в технических данных СК);

t_k – средняя температура теплоносителя в коллекторе (определяется при проектировании гелиоустановки);

t_0 – средняя температура окружающего воздуха в дневные часы расчетного месяца, определяется по формуле:

$$t_0 = t_{cp} + 0,5 \cdot A_t, \quad (13)$$

где

t_{cp} и A_t – среднесуточная температура воздуха и максимальная амплитуда колебаний суточных температур расчетного месяца.

Удельный тепловой поток, воспринимаемый абсорбером коллектора за каждый час безоблачного дня q , Вт/м², определяется по формуле:

$$q = q' \cdot \eta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (14)$$

где

η_1 – коэффициент, учитывающий степень прозрачности атмосферы, его величина колеблется от 0,8 в промышленных районах до 1 в курортной зоне, для горных курортов $\eta_1 = 1,1$;

η_2 – коэффициент, учитывающий потери тепла от солнечного коллектора до потребителя, величина этого коэффициента колеблется от 0,85 для крупных централизованных систем до 0,98 для локальных систем, или определяется расчетом в зависимости от теплоизоляции трубопроводов и температуры теплоносителя.

Воспринимаемые гелиоустановкой тепловые потоки

Среднесуточный удельный тепловой поток расчетного месяца при безоблачном небе W_c , воспринятый гелиоустановкой, равен сумме значений тепловых потоков, Вт/м², рассчитанных по формуле (14) для каждого часа:

$$W_c = \Sigma q_i, \quad (15)$$

Количество тепловой энергии W_m , кВт·час/м², выработанное одним квадратным метром солнечного коллектора при реальных условиях облачности, вычисляется отдельно для каждого месяца работы по формуле:

$$W_m = z \cdot W_c \cdot \eta_o \cdot \eta_3 \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

где

η_3 – коэффициент, учитывающий потери, обусловленные нестационарным теплообменом при переменной облачности рекомендуется принимать = 0,9;

z – количество дней в месяце;

η_o – коэффициент, учитывающий реальные условия облачности, вычисляется по формуле:

$$\eta_o = \frac{\Sigma H_p}{\Sigma(H_B + H_D)}, \quad (17)$$

где

ΣH_p – суммарная энергия прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность в населенном пункте за сутки при реальных условиях облачности (данные приводятся в климатических справочниках);

$\Sigma(H_B + H_D)$ – суммарная энергия прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность на широте населенного пункта за сутки при безоблачном небе.

Годовая удельная выработка тепла W_r , кВт·час/м², определяется как суммарное количество тепловой энергии, выработанной в каждом месяце:

$$W_r = \Sigma W_m. \quad (18)$$

Пример расчета

Для исследования зависимости приведенной поглощательной способности α_a абсорбера от угла падения солнечных лучей был взят плоский солнечный коллектор SKS4.0-S (Buderus, Германия). При этом проводилось определение оптимального угла наклона коллектора для четырех режимов работы гелиосистемы проектируемой в г. Симферополь:

- для горячего водоснабжения во время курортного сезона (период использования – май–сентябрь);
- для ГВС сезонного типа (март–ноябрь);

– для ГВС и поддержки отопления (круглогодично);

– для отопления (ноябрь–март).

Вычисления выполнялись с помощью программы Excel, значения углов тригонометрических функций задавались значениями, выраженными в радианах.

Из формул (8, 9, 10) следует, что при расчетных значениях теплотехнических параметров коллектора SKS4.0-S:

– диффузная отражательная способность $\rho_d = 0,16$, для однослойного прозрачного покрытия;

– коэффициент поглощения абсорбера $\alpha = 0,95$;

– пропускная способность прозрачного покрытия $\tau_o = 0,95$, при $i=0^\circ$;

На рис. 2 приведена зависимость, полученная по формуле (8) для абсорбера плоского солнечного коллектора SKS4.0-S.

Максимальная теплопроизводительность солнечной установки достигается при оптимальном значении угла наклона солнечного

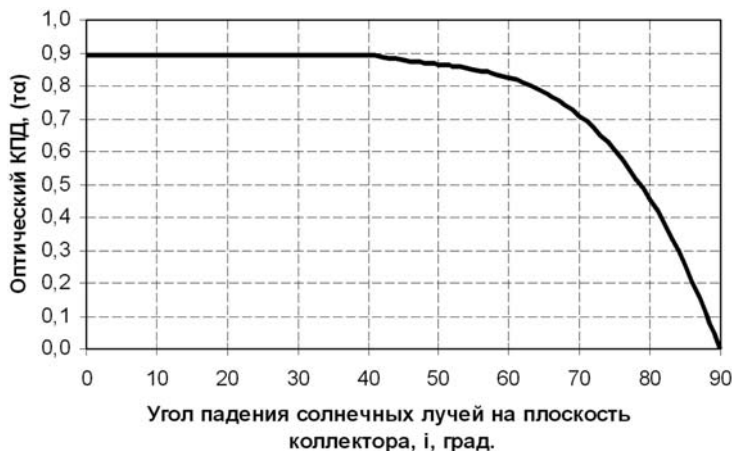


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности абсорбера коллектора SKS 4.0-S от угла падения солнечных лучей

коллектора β , значение которого зависит от сезона работы установки. При определении оптимального значения угла наклона рассчитывались усредненные значения удельной суточной

теплопроизводительности W_{cp} , кВт·час/сут, плоского солнечного коллектора SKS4.0-S для четырех режимов работы, с шагом угла наклона коллектора $h=10^\circ$:

$$W_{cp}(\beta) = \frac{1}{i \cdot z} \sum W_M, \quad (19)$$

где

i – месяцы года;

z – количество дней в месяце.

Для расчетных условий города Симферополя среднесуточное количество тепловой энергии W_M , кВт·час/м², выработанное квадратным метром солнечного коллектора при реальных условиях облачности для четырех режимов работы гелиосистемы в зависимости от угла наклона приведено в табл. 1.

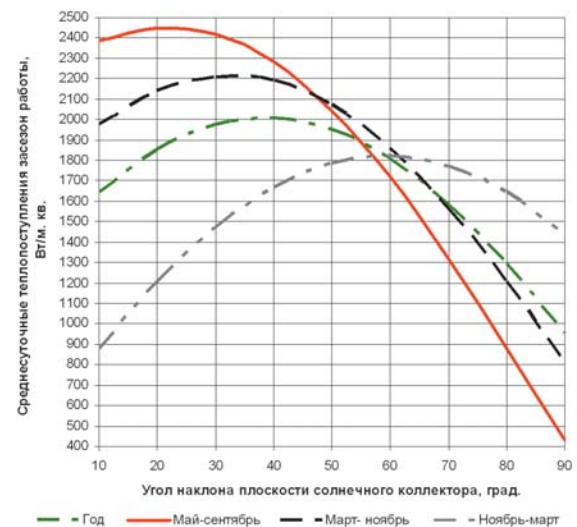


Рис. 3. Зависимость усредненных значений удельной суточной теплопроизводительности плоского СК от угла наклона коллектора

На рис. 2 приведена зависимость средних значений удельной суточной теплопроизводительности плоского солнечного коллектора SKS4.0-S от угла его наклона для различных режимов работы гелиоустановки при расчетных условиях.

Таблица 1. Удельное количество среднесуточной тепловой энергии для разных углов наклона коллектора, Вт·час/м²

Период работы	Угол наклона плоскости солнечного коллектора, β , град.								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
год	1647	1853	1973	2008	1952	1810	1583	1294	957
с мая по сентябрь	2385	2451	2416	2282	2044	1724	1311	878	432
с марта по ноябрь	1973	2139	2209	2190	2071	1863	1565	1209	814
с ноября по март	874	1214	1468	1670	1783	1821	1764	1652	1448

Таблица 2. Оптимальные углы наклона солнечного коллектора для расчетных условий г. Симферополь

Способ вычисления	Углы наклона (β) плоскости солнечного коллектора, для разных режимов работы установки, град.			
	С мая по июнь	С марта по ноябрь	В течение года	С ноября по март
Традиционный	30	30	45	60
Приведенный в работе	22	34	38	62

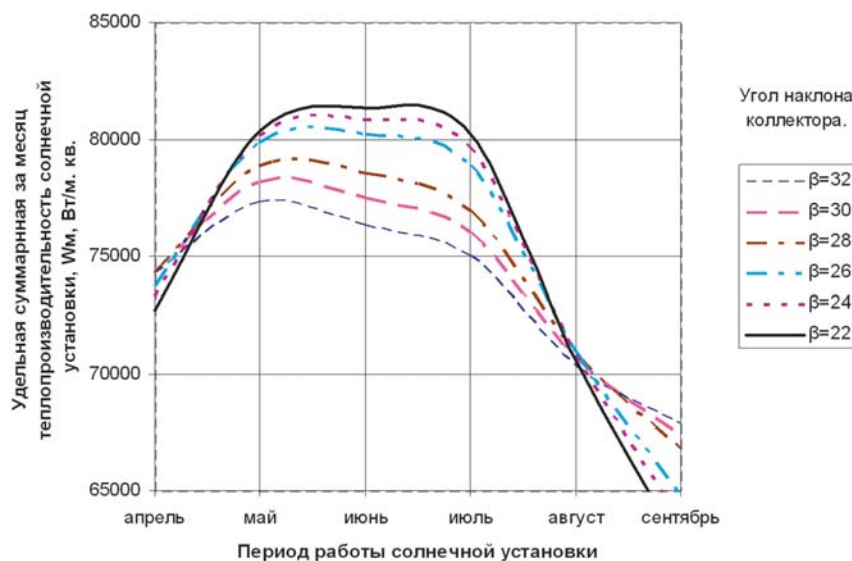


Рис. 4. Зависимость теплопроизводительности от угла наклона солнечного коллектора

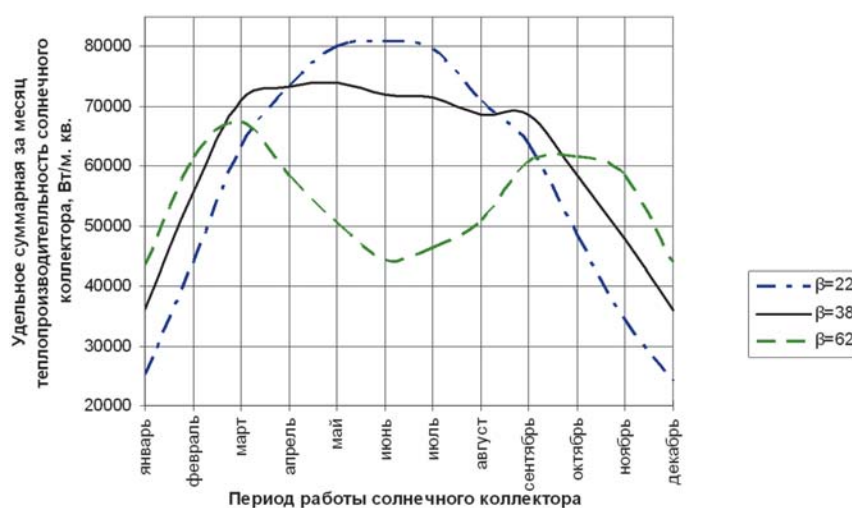


Рис. 5. Теплопроизводительность солнечного коллектора при оптимальных углах наклона

Из графиков видно, что рассматриваемые значения W_m для каждого режима работы при прочих равных условиях имеет свой, явно выраженный максимум, который соответствует оптимальному значению угла наклона солнечного коллектора.

Значения оптимального угла наклона СК, определенные традиционно принятым способом приводятся в справочной литературе. Для систем круглогодичного действия угол β равен широте местности φ , для систем, работающих только в отопительный сезон $\beta = \varphi + 15^\circ$, и для систем, работающих только в летний период $\beta = \varphi - 15^\circ$. Оптимальные значения углов наклона β солнечного коллектора представлены в табл. 2.

На рис. 4 приведена зависимость удельной суммарной месячной теплопроизводительности солнечной установки от угла наклона солнечного коллектора с шагом $h=2^\circ$ для режима работы апрель-сентябрь. Анализируя зависимости, представленные на рисунке, можно сделать вывод, что для летнего режима работы сезонная выработка тепловой

энергии солнечной установкой СК которой расположены под оптимальным углом наклона, определенным по выше представленной методике $\beta=22^\circ$ выше, чем под углом $\beta=30^\circ$, представленным в справочной литературе. Это различие можно объяснить тем, что методика, позволяет учесть дополнительные условия, при которых работает установка, (реальные условия облачности, изменение оптического КПД от угла падения солнечных лучей на плоскость и др.), а также оптимизировать выбор угла наклона коллекторов для повышения общей выработки тепловой энергии гелиоустановкой в течение сезона.

Годовая теплопроизводительность 1 м^2 солнечного коллектора SKS4.0-S, W_r , при расчетных параметрах Симферополя, с оптимальными углами наклона, β для трех сезонных режимов работы солнечной установки, приведена на рис. 5. Из графика видно, что, увеличивая угол наклона СК, можно снизить мощность теплового потока снимаемого гелиоустановкой в летние месяцы и повысить в зимние. Суммарная за год удельная теплопроизводительность солнечного коллектора при этом изменяется незначительно. Повысить ее возможно сезонным изменением угла наклона коллекторов или устройством систем, следящих за движением солнца и, в соответствии с этим, изменяющих положение коллекторного поля.

Таким образом, оптимальные значения угла наклона β солнечного коллектора SKS4.0-S в условиях Симферополя составляют: для ГВС во время курортного сезона – 22° ; для ГВС в период использования март–ноябрь – 34° ; для ГВС и поддержки отопления при круглогодичном использовании – 38° ; для отопления в период с ноября по март – 62° . Значения годовой суммарной теплопроизводительности одного квадратного метра гелиоколлектора при этом находятся в пределах от 646 до 733 кВт·час/м².

Представленная методика расчета оптимальных углов наклона распространяется на все плоские солнечные коллекторы различных производителей.

Однако нельзя забывать, что солнечные коллекторы являются частью гелиосистемы и находятся не в самых благоприятных условиях эксплуатации. Таким образом на суммарную выработку тепловой энергии всей солнечной установки влияет достаточно большое количество дополнительных факторов.