

УДК 536.248.2:532.529.5

Джамаль К. Хусейн, инженер,  
 А.Е. Денисова, д-р. техн. наук, проф.,  
 Одес. нац. политехн. ун-т  
 А.В. Дорошенко, д-р. техн. наук, проф., Одес.  
 гос. акад. холода

## ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА НАКЛОНА СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В ГЕЛИОСИСТЕМЕ

Джамаль К. Хусейн, А.Е. Денисова, А.В. Дорошенко. Оптимізація кута нахилу сонячних колекторів в геліосистемі. Розроблено методику та виконано розрахунки кута нахилу сонячного колектору з метою забезпечення максимальної інтенсивності сонячної радіації для приймальної пластини сонячного колектору за весь період (сезон) експлуатації системи горячого водопостачання

Jamal K. Husain, A.E. Denysova, A.V. Doroshenko. Optimization of a slope angle of solar collectors in a solar-heat system. The technique is developed and calculations of a slope angle of a solar collector are performed with the purpose of providing the maximal intensity of solar radiation for a reception of plate solar collector for the whole period (season) of the hot water supply system operation.

В зависимости от направления распространения, солнечное излучение бывает прямым и рассеянным (диффузным). Для расчета интенсивности потока солнечного излучения, поступающего на наклонную лучепоглощающую поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на нее. Положение некоторой точки  $A$  на земной поверхности относительно солнечных лучей в данный момент времени определяется тремя основными углами: широтой местности  $\varphi$ , часовым углом  $\omega$  и склонением Солнца  $\delta$  (рис. 1,  $a$ ).

Склонение Солнца в данный день

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right), \quad (1)$$

где  $n$  — порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января, обычно номер среднего расчетного дня месяца для I...XII месяцев года. В расчетах солнечного излучения используют также зенитный угол  $z$ , угол высоты солнцестояния  $\alpha = 90 - z$  и азимут  $a_n$  Солнца (рис. 1,  $b$ ). Связь между дополнительными и основными углами устанавливается уравнениями [1]

$$\begin{aligned} \cos z &= \cos \omega \cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta, \\ \sin a_n &= \sec \alpha \cos \delta \sin \omega. \end{aligned}$$

где  $\omega$  — часовой угол,

$\varphi$  — географическая широта местности.

Угол падения солнечных лучей на произвольно ориентированную поверхность, имеющую азимут  $a_n$  и угол наклона  $\beta$  к горизонту, определяется по формуле

$$\begin{aligned} \cos i &= \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cos a_n \cos \omega + \sin a_n \sin \omega) - \\ &- \sin \delta \cos \varphi \cos a_n] + \cos \beta (\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi). \end{aligned}$$

Это соотношение имеет важное практическое значение, т.к. при угле падения прямых солнечных лучей на прозрачное покрытие (ПП) солнечного коллектора (СК) под углом свыше  $60^\circ$  пропускная способность ПП резко уменьшается, что необходимо учитывать при проведении тепловых расчетов солнечных коллекторов [2]. Выражение (1) также может быть использовано для расчета интенсивности солнечного излучения с учетом возможного затенения гелиополя СК от различного рода объектов, расположенных вблизи. Подставив в формулу (1) значение  $\beta = 0$ , можно определить угол падения лучей на горизонтальную поверхность

$$\cos i = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi. \quad (2)$$

Для наклонной поверхности при  $a_n=0^\circ$ , т.е. постоянно ориентированной на юг,

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

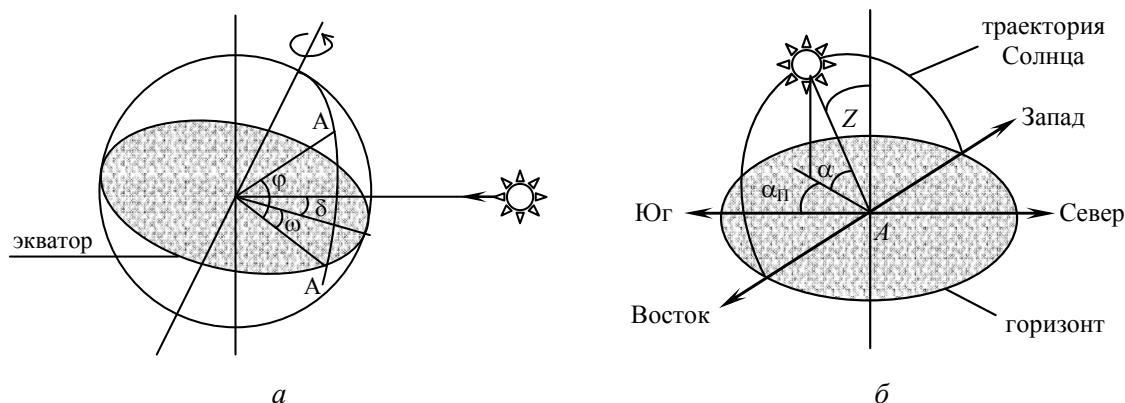


Рис. 1. Основные и дополнительные углы движения Солнца: а — схема кажущегося движения солнца по небосводу; б — углы, определяющие положение точки А на земной поверхности относительно солнечных лучей

Интенсивность потока солнечной радиации для любого пространственного положения солнечного коллектора в произвольный момент времени можно определить по формуле [1]

$$J = J_S P_S + J_D P_D,$$

где  $J_S$  и  $J_D$  — интенсивности потоков прямого и рассеянного солнечного излучения, падающих на горизонтальную поверхность, соответственно;

$$P_S = \frac{\cos i}{\sin \alpha} \text{ и } P_D = \cos^2 \frac{\beta}{2} \text{ — коэффициенты положения СК для прямого и рассеянного сол-}$$

нечного излучения, соответственно.

Для улавливания максимального (за расчетный период) количества солнечной энергии коллектор устанавливают в наклонном положении с оптимальным углом наклона к горизонту  $\beta$ , который определяется расчетным путем и зависит от периода эксплуатации. При южной ориентации СК для круглогодичных гелиосистем  $\beta = \varphi$ , для сезонных гелиосистем (период эксплуатации апрель — октябрь)  $\beta = \varphi - 15^\circ$ .

Для сезонных гелиосистем соотношение (2) примет вид

$$\cos i = 0,259 \sin \delta + 0,966 \cos \delta \cos \omega,$$

для круглогодичных

$$\cos i = \cos \delta \cos \omega.$$

Количество солнечной энергии, падающей на поверхность СК, зависит от его ориентации относительно южного направления, т.е. от азимута  $a_n$ . При  $a_n = \pm 15^\circ$  среднегодовое поступление солнечной энергии на поверхность солнечного коллектора всего на 2% меньше, чем для  $a_n = 0$ . При  $a_n = \pm 40^\circ$  эта разница составляет 13 %, причем наибольшее отклонение 25 % имеет место в январе, а наименьшее 5% — в июне и июле.

Для определения оптимального наклона солнечного коллектора для системы горячего водоснабжения расчет интенсивности солнечной энергии проводится по формуле

$$J = (H_b R_b + H_d) (\tau \alpha), \quad (3)$$

где  $H_b$ ,  $H_d$  — прямая и рассеянная составляющие солнечного излучения на горизонтальной поверхности, Вт·ч/м<sup>2</sup>.

Приведенная поглощательная способность поглощающей пластины

$$(\tau\dot{\alpha}) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - a)\rho_d}, \quad (4)$$

где  $\rho_d$  — диффузная отражательная способность ПП, для системы ПП из одного, двух, трех и четырех прозрачных листов  $\rho_d$  равно 0,16; 0,24; 0,29; 0,32, соответственно [1];

$a = 0,94 \dots 0,95$  — направленная поглощательная способность ПП [1];

$\tau = \tau_r \tau_a$  — пропускная способность ПП;

$\tau_r$  — пропускная способность ПП без учета поглощения;

Для одного ПП

$$\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + \rho},$$

где  $\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]$  — отражательная способность ПП;

$\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы падения и преломления (рис. 2, а) на поверхности раздела сред, связанные с соответствующими показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  [1]:  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$ . Если среда 1 — воздух,

то  $n_1 = 1$ , а показатель преломления стекла  $n_2 = 1,526$ ;

$\tau_a = e^{-KL}$  — пропускная способность ПП с учетом только поглощения;

$L$  — толщина прозрачного покрытия ПП, см;

$K$  — коэффициент ослабления стекла,  $\text{см}^{-1}$ . В случае использования в качестве ПП стекла, значения  $K$  изменяются от  $\sim 0,04 \text{ см}^{-1}$  для высокопрозрачного стекла (с бесцветной кромкой) до  $\sim 0,32 \text{ см}^{-1}$  для плохого (с зеленоватым оттенком кромки) стекла. Для обычного оконного стекла  $L = 0,32 \text{ см}$ ,  $K = 0,161 \text{ см}^{-1}$ .

Подставляя соответствующие значения  $\alpha = 0,94$ ,  $\rho_d = 0,16$  (для одиночного ПП),  $\tau_a = 0,9498$  в формулу (3), получим

$$(\tau\alpha) = 0,9014 \frac{1 - \rho}{1 + \rho}.$$

В выражении (2)

$$R_b = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta},$$

где  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  — углы падения соответственно для наклонной и горизонтальной поверхностей (рис. 2, б);

$\varphi$  — широта местности (для Одессы  $\varphi = 46,5^\circ$ );

$\beta$  — угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью, т.е. угол наклона СК (рис. 2, в);

$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right)$  — склонение (угловое положение Солнца) [1];

$n$  — порядковый номер дня года;

$\omega = 180 - 15\tau$  — часовой угол;

$t$  — время эксплуатации суток, ч.

Таким образом, с учетом полученных зависимостей интенсивность потока солнечной энергии, поступающей в СК,

$$J = J(n, \tau, \beta).$$

При расчете оптимального значения угла наклона  $\beta$  за период использования системы горячего водоснабжения, например, для гелиосистем сезонного типа в течение года в соответст-

вии с формулой (3) рассматривается усредненное по времени значение интенсивности солнечной энергии

$$J_{cp}(\beta) = \frac{1}{7 \cdot 13} \sum_{i=1}^7 \sum_{k=1}^{13} S(i, k, \beta),$$

где  $i$  — число месяцев эксплуатации в год (апрель — октябрь);

$t=13$  — количество эксплуатации СК с 6 до 19 ч. Для Одессы ( $\varphi = 46,5^\circ$  северной широты).

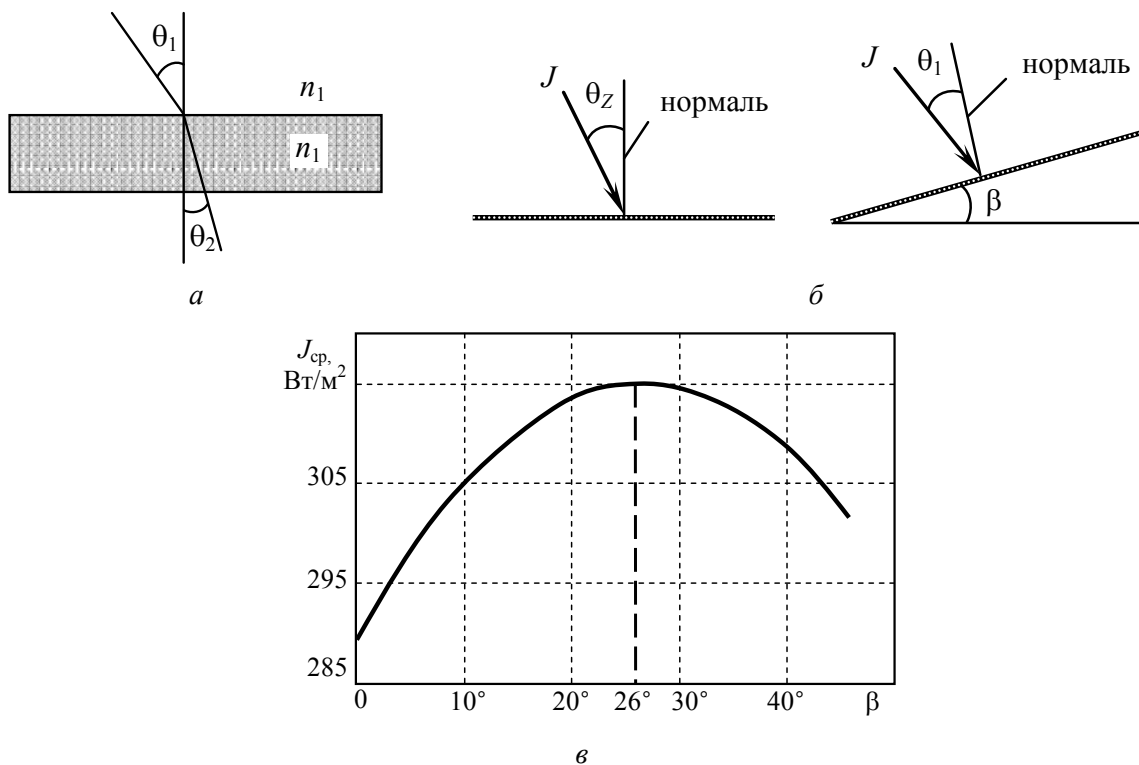


Рис. 2. Определение оптимального угла наклона  $\beta$  СК для системы горячего водоснабжения: а — преломление луча на границе двух сред; б — углы падения солнечных лучей на горизонтальную и наклонную поверхности; в — расчетная зависимость средней интенсивности солнечного излучения от угла наклона  $J_{cp}(\beta)$  СК

В таблицах 1 и 2 приведены значения прямой  $H_b$  и рассеянной  $H_d$  составляющих солнечно-го излучения на горизонтальной поверхности, входящие в формулу (2).

Таблица 1

Значения прямого солнечного излучения  $H_b$ ,  $Втч/м^2$

Часы	Месяцы						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
6	0	22	47	36	11	0	0
7	36	94	127	127	80	22	0
8	116	185	244	244	185	116	36
9	197	290	349	371	313	221	94
10	266	371	440	476	407	313	138
11	338	440	509	555	497	382	185
12	360	465	545	580	522	418	208
13	349	476	522	555	497	407	208
14	313	429	476	509	451	360	185
15	255	349	407	429	382	290	127

16	174	266	302	338	279	185	69
17	105	174	208	221	174	94	11
18	36	80	116	116	80	22	0
19	0	22	36	36	11	0	0

Таблица 2

Значения рассеянного солнечного излучения  $H_d$ , Втч/м<sup>2</sup>

Часы	Месяцы						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
6	22	47	69	58	38	0	0
7	69	105	116	105	80	47	11
8	127	152	152	138	116	94	47
9	174	185	185	174	152	127	105
10	208	221	208	199	174	152	138
11	232	232	232	208	185	185	163
12	244	244	232	221	199	185	174
13	244	244	232	221	199	185	174
14	232	232	208	199	185	174	163
15	208	221	208	199	174	152	127
16	163	185	185	163	152	129	94
17	116	138	152	138	116	80	47
18	69	94	105	94	69	36	11
19	11	47	58	47	22	0	0

Из результатов расчетов средних значений интенсивности солнечной энергии в зависимости от угла наклона  $\beta$  СК ( см. рисунок 2, в) видно, что рассматриваемая функция  $J_{cp}(\beta)$  имеет максимум, который соответствует  $\beta = 26^\circ$ . В таблице 3 приведены значения интенсивности солнечного излучения, поступающего на поверхность СК за весь период (сезон) эксплуатации системы горячего водоснабжения (апрель — октябрь с 6 до 19 ч, г. Одесса) для данного угла наклона.

Таблица 3

Суммарная интенсивность солнечного излучения на поглощающей пластине СК, установленного с оптимальным углом наклона  $\beta^* = 26^\circ$  (для Одессы,  $\varphi = 46,5^\circ$ )

Часы	Месяцы						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
6	3,2	15,6	29,8	23,1	9,3	0	0
7	61,2	116,9	141,7	134,6	93,4	39,3	4,6
8	195,5	259,1	296,5	288,4	237,8	178,3	76,5
9	330,2	401,9	440,1	454,2	407,6	331,5	201,8
10	437,1	519,8	555,8	585,8	529,6	459,7	287,4
11	534,1	600,0	646,2	674,2	632,7	565,0	367,2
12	567,6	635,5	681,3	710,7	670,7	604,8	404,8
13	555,1	643,4	657,8	684,9	644,2	592,0	403,2
14	503,8	581,6	587,2	615,1	580,4	528,1	367,4
15	413,5	482,4	506,9	523,4	488,1	423,3	261,0
16	272,5	346,7	364,6	377,7	341,1	268,8	149,4
17	128,8	180,8	207,4	205,4	167,7	103,1	32,3
18	12,5	36,0	52,4	46,0	23,1	2,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0

Полученные результаты позволяют рассчитывать оптимальный угол наклона СК с учетом места расположения гелиосистемы и возможных затенений коллекторов.

### **Литература**

1. Бекман У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. — М. — Энергоиздат, 1982. — 80 с.
2. Горин А. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха / Горин А., Дорошенко А. — Донецк: Норд-Пресс, 2006. — 341 с.

Поступила в редакцию 11 декабря 2007 г.