

УДК 532.211

Накорчевский А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

РАСЧЕТ ТЕПЛОВСПРИНИМАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Запропоновано методику розрахунку теплосприймаючої властивості сонячних колекторів у залежності від сонячної активності, тривалості активного світлового дня та ККД сонячних колекторів.

A – альbedo поверхности;
 e – плотность солнечной радиации;
 q – плотность теплового потока;
 P – коэффициент положения солнечного коллектора;
 R_0 – наружный радиус грунтового теплообменника;
 T – температура;
 β – угол наклона поверхности к горизонту;
 η – КПД;
 λ – теплопроводность грунта;
 τ – временной интервал.

Індекси:

a – аккумулялирование;
 v – вода;
 vz – воздух;
 d – день;
 k – конец;
 mes – месяц;
 n – начало;
 o – отражательная;
 op – оптический;
 os – основной;
 s – солнце;
 $s.k$ – солнечный коллектор;
 sr – средний;
 d – рассеянная;

Представлена методика расчета тепловоспринимающей способности солнечных коллекторов в зависимости от солнечной активности, длительности активного светового дня и КПД солнечных коллекторов.

s – прямая;
 β – угол;
 \leftrightarrow – горизонталь;
 \updownarrow – вертикаль.

Presented methods of the calculation heat property abilities solar collectors depending on solar activity, duration of the active light day and the effect coefficient of solar collectors.

В связи с энергетическим кризисом возрастает роль нетрадиционных источников энергии. К одному из таких источников относится повсеместно доступная солнечная радиация. Использование теплоты солнечного излучения возможно путем непосредственного извлечения из верхних слоев грунта или посредством специальных устройств – солнечных коллекторов, обычно имеющих плоскую форму. Естественно, что энергетический потенциал в последнем случае будет выше. Единая общепринятая методика расчета солнечной радиации, действующей на солнечные коллекторы, отсутствует. Несмотря на принципиальную возможность строго теоретического определения этой величины, используя астрономические сведения о Солнце, с инженерной точки зрения все же следует опираться на устойчивые эмпирические данные. К таковым относятся авторитетные сведения о поместном распределении солнечной радиации, например, приведенные в справочниках для Украины [1, 2]. Причем круг литературных источников может быть расширен только в случае полного согласования с концепциями этих работ и приведенными в них дан-

ными. Ниже предлагается расчетная методика, построенная на строгом соблюдении этого принципа.

Начнем с расчета падающей радиации на наклонную поверхность. Общепринято, что горизонтальная поверхность воспринимает прямую радиацию с интенсивностью $e_{s\leftrightarrow}$ и рассеянную радиацию с интенсивностью $e_{d\leftrightarrow}$:

$$e_{\leftrightarrow} = e_{s\leftrightarrow} + e_{d\leftrightarrow} \quad (1)$$

Величина e_{\leftrightarrow} именуется суммарной радиацией. Если приемник расположен наклонно, то это отражается на значениях e_s для прямой радиации и рассеянной e_d :

$$e_{s\beta} = e_{s\downarrow} \sin \beta + e_{s\leftrightarrow} \cos \beta, \quad e_{d\beta} = e_{d\leftrightarrow} \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (2)$$

где β – угол наклона поверхности относительно горизонтальной плоскости, $e_{s\downarrow}$ – интенсивность прямой радиации на вертикальную площадку. Кроме того, на наклонную поверхность оказывает дополнительное влияние и отражательная способность земной поверхности, определяемая как

$$e_{o\beta} = A e_{\leftrightarrow} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (3)$$

где альbedo поверхности A зависит от характеристики поверхности [1]. Таким образом, результирующее действие солнечной радиации на наклонную поверхность будет

$$e_{c\beta} = e_{s\beta} + e_{d\beta} + e_{o\beta} = e_{s\downarrow} \sin \beta + e_{s\leftrightarrow} \cos \beta + e_{d\leftrightarrow} \frac{1 + \cos \beta}{2} + A(e_{s\leftrightarrow} + e_{d\leftrightarrow}) \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (4)$$

Здесь первые два слагаемых составляют прямую радиацию, третье – рассеянную, четвертое – отражательную, а их сумма – падающую радиацию. Итак, для вычисления $e_{c\beta}$ необходимо располагать сведениями о прямой радиации на горизонтальную и вертикальную поверхности, о рассеянной радиации на горизонтальную поверхность и об альbedo A . Последнее обычно колеблется в пределах $0,1 \dots 0,4$ и, как правило, действием отражательной способности пренебрегают.

Значения $e_{s\downarrow}$, $e_{s\leftrightarrow}$, $e_{d\leftrightarrow}$ изменяются в течение суток, и зависят от множества плохо пред-

сказуемых погодных факторов, а $e_{s\downarrow}$ – еще и от ориентации вертикальной поверхности. Поэтому при расчетах длительного периода работы солнечных коллекторов следует опираться на среднемесячные данные, которые приводятся в руководствах [1, 2]. Что касается данных о $e_{s\downarrow}$, то, в отличие от [1], достаточно подробная информация содержится в монографии [3]. Причем, что важно, численные значения одноименных величин в [1, 3] практически совпадают.

Альтернативой зависимости (4) мог быть расчетный алгоритм, представленный в нормах проектирования [4], который базируется на данных работы [1]. Согласно [4] интенсивность падающей солнечной радиации для любого положения солнечного коллектора находится по формуле

$$e_{s\beta} = P_s e_{s\leftrightarrow} + P_d e_{d\leftrightarrow}, \quad (5)$$

где P_s , P_d – коэффициенты положения солнечного коллектора для прямой и рассеянной радиации соответственно. При расчете рассеянной радиации используется выражение для P_d , совпадающее со второй формулой (2):

$$P_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} = \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right), \quad (6)$$

а коэффициент для прямой радиации P_s выбирается согласно таблицы в Приложении 3 норм [4] в зависимости от месяца года, широты местности и угла наклона коллектора к горизонту. Однако подсчитанные таким образом значения $e_{s\downarrow}$ для вертикальных поверхностей ($\beta = 90^\circ$) не совпадают с данными, приведенными в [1, 3].

Для северного полушария оптимальной является южная ориентация солнечных коллекторов с возможными отклонениями на восток до 20° , на запад – до 30° . Согласно общепринятым рекомендациям угол наклона солнечных коллекторов к горизонту β выбирается равным широте местности при круглогодичной работе, в летний период – широте местности минус $10 \dots 15^\circ$, а в отопительный сезон – широте местности плюс $10 \dots 15^\circ$. Здесь уместно заметить, что уравнение (4) позволяет определить оптимальный угол наклона расчетным путем. Первая и вторая производные функции (4) по углу β будут:

НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

$$\frac{de_{c\beta}}{d\beta} = e_{s\downarrow} \cos \beta - e_{s\leftrightarrow} \sin \beta - 0,5e_{d\leftrightarrow} \sin \beta,$$

$$\frac{d^2e_{c\beta}}{d\beta^2} = -e_{s\downarrow} \sin \beta - (e_{s\leftrightarrow} + 0,5e_{d\leftrightarrow}) \cos \beta.$$

(7)

Поскольку вторая производная при $\beta \in [0, \pi/2]$ всегда отрицательная, то решение первого уравнения, приравненного нулю, дает значение угла, при котором $e_{c\beta}$ будет наибольшим. Результаты расчета β для г. Киева (50,5° с. ш.) при южной ориентации оказались следующими (по месяцам года, начиная с января): 53,44°; 50,21°; 38,47°; 24,91°; 16,90°; 14,06°; 15,69°; 23,12°; 35,43°; 49,47°; 50,51°; 57,18°. Среднее значение в холодный период (октябрь – март) оказалось равным 49,9°, а в теплый (апрель – сентябрь) – 21,6°. Среднегодовой угол – 35,8°. Если ориентироваться на общепринятые рекомендации, то углы должны быть: для холодного периода 60...65°, для теплого – 35... 40° при среднегодовом – 50°. Расчеты с учетом помесечного изменения указанных выше углов наклона коллекторов дали увеличение падающей радиации на 3% в течение апреля – сентября и на 2% за период октябрь – март по сравнению с данными при неизменном оптимальном среднегодовом угле 35°, что вполне объяснимо. В тоже время следует отметить существенное расхождение между значениями оптимального среднегодового угла и общепринятого по рекомендациям.

Что касается суточного изменения солнечной радиации, то здесь можно воспользоваться данными, приведенными в таблице 10 справочника [1]. Построенные суточные графики изменений суммарной радиации по месяцам года (см. рис.) свидетельствуют о допустимости принятия синусоидального характера изменения этой величины в течение солнечно активного дня, что разделяют и авторы работы [5].

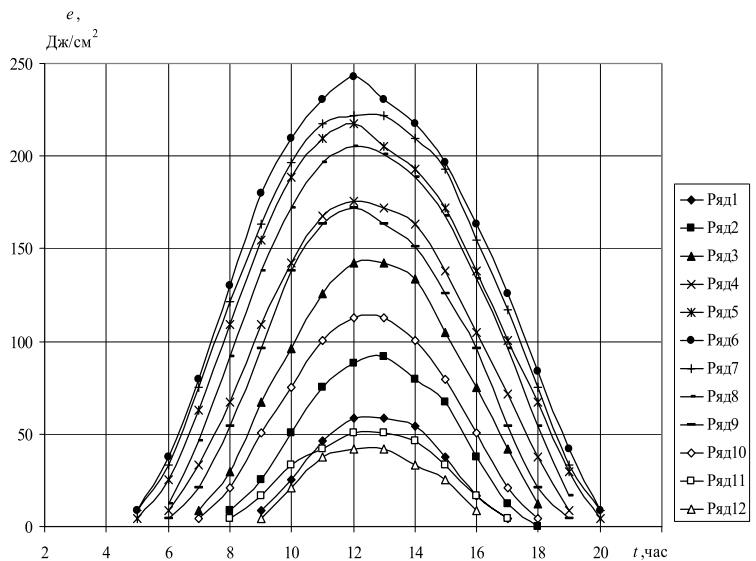


Рис. Почасовое распределение суммарной радиации для г. Киева. Номер ряда соответствует последовательности месяцев, начиная с января.

В таблице 1 представлены расчетные данные о среднесуточных и среднемесечных прямой, рассеянной и падающей радиации для г. Киева (50,5° с.ш.) при угле наклона поверхности $\beta = 35^\circ$ с южной ориентацией. Там же приведены данные о средней длительности активного светового дня [1] и о средней температуре наружного воздуха на этом временном интервале дня для метеостанции Киев, Обсерватория [2]. За шесть «теплых» месяцев (апрель – октябрь) суммарная плотность падающей радиации составит 916418 Вт·ч/м², а на остальные шесть «холодных» приходится 337969 Вт·ч/м², что составляет 36,9 % от первого значения. Таким образом, не следует пренебрегать солнечной энергией в холодный период года.

Согласно изложенному выше, наиболее достоверными характеристиками солнечной активности являются сведения о среднемесечных их показателях. Поэтому и расчет предсказуемой теплоты, воспринимаемой солнечными коллекторами, работающими в течение длительного периода, должен быть ориентирован на среднемесечные данные. Такой подход должен распространяться и на теплоту,

отдаваемую коллектором промежуточному теплоносителю. Среди ряда методик, определяющих КПД солнечных коллекторов $\eta_{с.к.}$, представляется предпочтительной зависимость, рекомендуемая фирмой Viessmann [6]:

$$\eta_{с.к.} = \eta_{оп} - k_1 \frac{T_{с.к.} - T_{вз}}{q_c} - k_2 \frac{(T_{с.к.} - T_{вз})^2}{q_c}, \quad (8)$$

где $T_{с.к.}$ – температура коллектора, $T_{вз}$ – температура окружающей среды, $\eta_{оп}$ – оптический КПД коллектора, q_c – плотность теплового потока, воспринимаемого коллектором, k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты. Например, для коллекторов Vitoso1 типа s/w 2,5 значения $\eta_{оп} = 0,826, k_1 = 3,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), k_2 = 0,011 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$. Среднемесячный КПД по (8) определяется среднемесячными значениями величин, входящих в это уравнение. Средние значения для $T_{вз}$ известны, а для q_c легко подсчитываются по данным таблицы 1 с учетом длительности активного светового дня. Что касается температуры $T_{с.к.}$, то она практически соответствует температуре промежуточного теплоносителя T_b . Значение последней можно оценить, исходя из следующих соображений.

Если осуществляется аккумуляция теплоты контактом промежуточного теплоносителя с грунтовым аккумулятором [7], то T_b практически не отличается от температуры на наружной стенке теплообменника T_0 . Разность между T_b и температурой основной области аккумулятора $T_{ос}$ можно оценить посредством зависимости

$$T_b - T_{ос} = \frac{q_0 R_0}{\lambda_m}, \quad (9)$$

где обычно плотность теплового потока на стенке грунтового теплообменника $q_0 \approx 100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ при его радиусе $R_0 \approx 0,1 \text{ м}$. Допустимо принять почти линейным характер изменения $T_{ос}(t)$ при аккумуляции длительностью τ_a . Тогда, зная начальную $T_{ос}(0) \approx T_m$ и конечную $T_{ос}(\tau_a)$ температуры, просто находятся среднемесячные значения температур:

$$T_{ос}(t_{ср.мес}) = T_{ос}(0) + \frac{T_{ос}(\tau_a) - T_{ос}(0)}{\tau_a} t_{ср.мес}, \quad (10)$$

$$T_b(t_{ср.мес}) = T_{ос}(t_{ср.мес}) + \frac{q_0 R_0}{\lambda_m}.$$

Здесь $t_{ср.мес}$ – отсчет времени середины месяца от начала аккумуляции. Подставляя $T_b(t_{ср.мес})$ в (8), находим среднемесячный КПД солнечных коллекторов. В случае существенного отклонения динамики изменения $T_b(t_{ср.мес})$ по (10) от значений в результате детального расчета этого процесса согласно [7] вносятся итерационные коррективы.

Если энергия, полученная от солнечного коллектора, полностью извлекается из промежуточного теплоносителя и его потенциал снижается до исходного уровня, то температура T_b должна соответствовать $T_{вз}$. Такой режим характерен при работе без грунтового аккумулятора в циркуляционной системе промежуточного теплоносителя, например, в круглогодичных системах горячего водоснабжения с тепловым насосом. В таком случае КПД оказывается наибольшим и определяется значением $\eta_{оп}$.

Вычислив среднемесячный КПД солнечных коллекторов $\eta_{с.к.}$, устанавливается среднемесячное $e_{с.к.мес}$ количество солнечной энергии, воспринятой промежуточным теплоносителем. Для анализа предполагаемой посуточной динамики работы солнечных коллекторов в системе с промежуточным теплоносителем предлагается такой алгоритм. Рассчитывается среднедневная полезная производительность солнечных коллекторов $e_{с.к.д.}$:

$$e_{с.к.д.} = \frac{e_{с.к.мес}}{\tau_{мес}} \eta_{с.к.}, \quad (11)$$

где $\tau_{мес}$ – число дней в месяце. Зная длительность активного светового дня τ_c , устанавливается средняя плотность теплового потока, приходящегося на единицу поверхности коллекторов $\langle q_{с.к.} \rangle$:

$$\langle q_{с.к.} \rangle = \frac{e_{с.к.д.}}{\tau_c}. \quad (12)$$

Затем по синусоидальному закону вычисляется предполагаемое максимальное его значение $q_{с.к.макс}$ и записывается характер изменения $q_{с.к.}(t)$ в интервале $[t_n, t_k]$:

НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

$$q_{c.k.max} = \frac{\pi \langle q_{c.k} \rangle}{2}, \quad q_{c.k} = q_{c.k.max} \sin \left(\pi \frac{t - t_H}{\tau_c} \right), \quad (13)$$

где t_H – начало светового дня и $t_K = t_H + \tau_c$ – его конец. В качестве примера в таблице 2, являющейся расширением таблицы 1, приведены необходимые исходные данные для расчета параметров промежуточного теплоносителя солнечных коллекторов.

Табл. 1. Расчетные данные солнечной активности

Месяц	Число дней	Прямая радиация, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{м}^2\cdot\text{сут.}}$			Прямая радиация, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{м}^2\cdot\text{мес.}}$	Рассеянная радиация, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{м}^2\cdot\text{мес.}}$	Падающая радиация, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{час}}{\text{м}^2\cdot\text{мес.}}$	Средняя температур. воздуха, °С	Длит. свет. дня, час
		$e_{st}\cos\beta$	$e_{sb}\sin\beta$	$e_{s\beta}$					
I	31	184,34	420,25	604,59	18742	17983	36723	-5,6	8
II	28	442,04	700,42	1142,46	31989	24330	56319	-4,3	10
III	31	952,67	880,53	1833,20	56829	43371	100200	0,7	11
IV	30	1460,45	753,79	2214,24	66426	57123	123549	8,9	13
V	31	2181,62	687,08	2868,70	88930	71933	160863	16,3	15
VI	30	2698,92	673,74	3372,66	101180	76164	177344	19,7	15
VII	31	2519,82	707,09	3229,91	100034	74049	174083	21,7	15
VIII	31	2181,62	913,88	3095,50	95961	60297	156258	20,4	14
IX	30	1555,72	1107,34	2663,06	79892	44429	124321	15,9	13
X	31	767,86	993,93	1761,79	54616	30677	85293	9,0	11
XI	30	190,53	366,89	557,42	16723	15868	32591	1,9	9
XII	31	122,89	333,53	456,42	14149	12694	26843	-3,0	7

Табл. 2. Характеристики плотности солнечного теплового потока

Месяц	Падающая радиация за месяц 10^6 Дж/м ²	Падающая радиация за день 10^6 Дж/м ²	Длительность инсоляции, час	Дневной интервал инсоляции, час	Средняя плотность радиации, Вт/м ²	Максимальная плотность радиации, Вт/м ²
I	132,200	4,265	8	9-17	148,09	232,62
II	202,750	7,241	10	8-18	201,14	315,95
III	360,720	11,636	11	7-18	293,84	461,56
IV	444,776	14,826	13	6-19	316,79	497,62
V	579,107	18,681	15	5-20	345,94	543,41
VI	638,438	21,281	15	5-20	394,09	619,04
VII	626,699	20,216	15	5-20	374,37	588,06
VIII	562,529	18,146	14	6-19	360,04	565,55
IX	447,556	14,918	13	6-19	318,76	500,71
X	307,055	9,905	11	7-18	250,13	392,90
XI	117,328	3,911	9	8-17	120,71	189,61
XII	96,635	3,117	7	9-16	123,69	194,29

Выводы

Предложен метод определения интенсивности воздействия солнечной радиации на наклонную поверхность и алгоритмы расчета тепловосприятости ее солнечными коллекторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по климату СССР*. Вып. 10. УССР. ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 124 с.
2. *Справочник по климату СССР*. Вып. 10. УССР. ч. II. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 608 с.
3. *Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П.* Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 216 с.
4. *Установки солнечного горячего водоснабжения: ВСН 52 – 86 / Госгражданстрой*. – М.: Стройиздат, 1988. – 16 с.
5. *Сиворакиа В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.С.* та інші. Теплові розрахунки геліосистем. Дніпропетровськ: Вид. Дніпр. ун-ту, 2003. – 124 с.
6. *Системы тепловых насосов*. Инструкция по проектированию. Viessmann. 2000. – 48 с.
7. *Накорчевский А.И.* Теоретические и прикладные аспекты грунтового аккумулирования и извлечения теплоты. Киев.: Наук. думка, 2008. – 150 с.

Получено 21.10.2008 г.