

УДК 621.311.25:551.521.1

В.В. Чертищев, Г.Н. Филиппова

Использование справочных метеорологических данных для расчета теплопроизводительности солнечных коллекторов

На протяжении многих столетий солнечная энергия использовалась для различных целей. Горячее водоснабжение для бытовых нужд с помощью солнечных водонагревательных установок стало нормой жизни в ряде стран, в том числе в Австралии, Израиле, Японии. Отопление помещений для создания необходимого комфорта также может осуществляться с помощью систем, использующих солнечную энергию [1].

В настоящее время из активных систем утилизации солнечной энергии для отопления и горячего водоснабжения наиболее доступными являются системы на основе солнечных коллекторов. Солнечный коллектор представляет собой теплообменное устройство, в котором происходит поглощение солнечной энергии с преобразованием ее в теплоту циркулирующего теплоносителя. Конструктивно солнечные коллекторы отличаются значительным разнообразием как формы (плоские, параболические), так и технологических параметров (с прозрачным одинарным и двойным покрытием, селективные, вакуумированные). Они работают с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя. Основным показателем эффективности солнечного коллектора – это его КПД [2]. Наибольшее влияние на КПД, как известно, оказывают:

- 1) метеорологические факторы – интенсивность солнечной радиации и температура наружного воздуха;
- 2) конструктивные характеристики – поглощательная способность абсорбера, пропускательная способность прозрачного покрытия, теплоизоляционные свойства материалов и конструкции;
- 3) монтажно-технологические параметры – ориентация, температура теплоносителя на входе в коллектор, расход теплоносителя.

Прежде чем принять решение об использовании солнечной энергии для этих целей, необходимо оценить имеющееся количество солнечной энергии, зависящее, в частности, от угла наклона облучаемой солнцем поверхности.

В работе предлагается методика оценки располагаемого количества солнечной энергии, основанная одновременно:

- а) на закономерностях взаимного движения Земли и Солнца, позволяющих рассчитывать ин-

тенсивность прямого солнечного излучения для каждого момента времени вне земной атмосферы;

- б) на использовании региональных справочных метеоданных для оценки прозрачности атмосферы и потока, рассеянного атмосферой и поверхностью Земли излучения.

Данная методика лежит в основе разработанного нами программного модуля для расчета тепловой мощности солнечного коллектора. В программном модуле для каждого момента времени вычисляется результирующая (складывающаяся из потока прямой солнечной радиации, солнечной радиации, рассеянной в атмосфере, и солнечной радиации, отраженной от поверхности) энергетическая освещенность наклонной поверхности, и по заданному (или вычисленному по соответствующему алгоритму) температурам наружного воздуха и входящего в коллектор теплоносителя вычисляется КПД; затем по соотношению (2) рассчитывается тепловая мощность коллектора.

КПД коллектора находится из балансового соотношения для энергии [2]:

$$\eta \cdot E_s + F_R \cdot U \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{наруж}}) = F_R \cdot \tau\alpha \cdot E_s, \quad (1)$$

где первое слагаемое в левой части – полезная часть энергии, которая передается потребителям; второе слагаемое – часть энергии, теряющаяся теплоотдачей в окружающую атмосферу, правая часть соотношения – та часть падающей на коллектор солнечной энергии, которая воспринимается коллектором. Здесь $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{наруж}}$ – температуры входящего в коллектор теплоносителя и наружного воздуха; $F_R \cdot U$ – произведение общего коэффициента теплопотерь коллектора и коэффициента эффективности поглощающей панели (то и другое на 1 м^2 площади поверхности коллектора); $F_R \cdot \tau\alpha$ – произведение оптического КПД и коэффициента эффективности поглощающей панели коллектора. По КПД рассчитывается тепловая мощность солнечного коллектора

$$Q_k = \eta \cdot E_s. \quad (2)$$

Суммарный поток солнечной радиации на данную поверхность складывается из потоков прямого излучения, излучения, рассеянного атмосферой, и излучения, отраженного от поверхности

Земли и различных близко расположенных предметов. Обычно (за исключением зимних месяцев и отдельных районов) наибольшую долю в суммарной радиации составляет прямая радиация [2–3].

Результирующая энергетическая освещенность E_s наклонной поверхности при безоблачном небе, если принять допущения, что небо может рассматриваться как изотропный источник радиации и что рассеяние света земной поверхностью близко к изотропному, может быть представлена в виде

$$E_s = E + E_{dh} \cdot (1 + \cos \beta) / 2 + (E_{dh} + I_m) \cdot r \cdot (1 - \cos \beta) / 2, \quad (3)$$

где первое слагаемое – энергетическая освещенность наклонной поверхности прямой солнечной радиацией; второе слагаемое – энергетическая освещенность данной поверхности рассеянной радиацией; третье слагаемое – энергетическая освещенность данной поверхности отраженной радиацией [3–5]. Первое слагаемое определяется выражением $E = I_m \cdot \cos i$.

Входящий в эту формулу i –угол между солнечными лучами и нормалью к облучаемой поверхности рассчитывается по соотношению [3, 6]

$$\cos i = \sin \nu \cdot \cos \alpha \cdot \cos(a - a_n) + \cos \nu \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где произведение $\cos \alpha \cdot \cos(a - a_n)$ определяется по выражению

$$\begin{aligned} \cos \alpha \cos(a - a_n) = & \cos a_n (\sin \varphi (\cos \Omega \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \omega) - \cos \varphi \sin \delta) - \sin a_n \\ & (\cos \delta \cos \omega - \cos \Omega \sin \omega) + \sin \varphi \sin \delta, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь; φ – широта местоположения точки; φ – дневной часовой угол, α – угол склонения Солнца и угловая высота Солнца над горизонтом определяются по формулам

$$\sin \delta = \sin \Omega \cdot \sin \varepsilon, \quad \cos \delta = \sin \Omega \cdot \cos \varepsilon \quad (6)$$

(ε – угол наклона земной оси);

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

I_m – интенсивность солнечной радиации у земной поверхности;

$$I_m = I_0 \cdot e_s \cdot P^m, \quad m = 1 / \sin \alpha \quad (8)$$

оптическая масса атмосферы;

$$I_0 = 1,353 \text{ кВт/м}^2 \text{ – солнечная постоянная;}$$

$$e_s = 1 - 0,034 \cdot \sin \Omega \quad (9)$$

– коэффициент эксцентриситеты орбиты, Ω – часовой угол.

Поток солнечного излучения, достигающий поверхности Земли, зависит не только от времени суток, времени года и месторасположения, но также и от погоды, и в облачную погоду не может быть рассчитан по формуле (3). Такие параметры, как коэффициент прозрачности атмосферы, коэффициент отражения излучения земной поверхностью, диффузная составляющая инсоляции, рассчитываются по данным соответствующих метеорологических измерений. Они различны для разных регионов.

При разработке методики оценки прихода солнечной радиации на наклонную площадку было отдано предпочтение наиболее полному использованию основных справочных метеоданных, приведенных в «Справочнике по климату СССР» [7] для каждого месяца, для времени суток с трехчасовым интервалом, а также данных по облачности и по альбедо земной поверхности. С учетом облачности расчетная формула приняла вид

$$E_s = E \cdot P_{ис} + E_{dh} \cdot (1 + \cos \beta) / 2 + (E_{dh} + I_m \cdot P_{ис} \cdot (1 + \cos(a - a_n)) / 2) \cdot r \cdot (1 - \cos \beta) / 2, \quad (10)$$

где $a - a_n$ – разность азимутов солнца и нормали к облучаемой поверхности, β – угол между наклонной поверхностью и горизонтальной плоскостью, r – коэффициент отражения радиации земной поверхностью.

Коэффициент прозрачности атмосферы рассчитывается по метеоданным об интенсивности прямого солнечного излучения с использованием соотношения

$$P = \exp(\sin \alpha \cdot \ln(I_m / (I_0 \cdot e_s))). \quad (11)$$

Энергетическая освещенность горизонтальной поверхности рассеянной в атмосфере солнечной радиацией может быть рассчитана по формуле

$$E_{dh} = D \cdot P_{ис} + I_m \cdot D_i \cdot (1 - P_{ис}). \quad (12)$$

Здесь $P_{ис}$ – вероятность того, что солнце не закрыто облаками, и диффузная составляющая энергетической освещенности при безоблачном небе берутся непосредственно из метеорологических данных за длительный срок наблюдений. Диффузная составляющая энергетической освещенности при облачной погоде представляется в виде произведения интенсивности света у поверхности Земли I_m и некоторой функции двух переменных – времени суток и времени года, эта

функция рассчитывается по соотношению

$$D_i = (Q - (E + D) \cdot P_{ис}) / (I_m \cdot (1 - P_{ис})), \quad (13)$$

где Q – суммарная солнечная радиация при средних условиях облачности, усредненная по метеорологическим данным за десятилетний период для каждого месяца, для времени суток с трехчасовым интервалом.

Приведенные формулы лежат в основе разработанного программного модуля расчета энергетической освещенности произвольно ориентированной площадки, в нашем случае – воспринимающей плоской поверхности солнечного коллектора. При

вычислении $P, P_{ис}, E_{dh}$ для всех промежуточных моментов времени используется двумерная интерполяция.

Расчет по описанной методике позволяет найти теплопроизводительность солнечного коллектора для заданного угла наклона к горизонту и оценить располагаемое количество энергии, а для различных углов наклона солнечного коллектора позволяет выбрать оптимальный для предполагаемого сезона использования угол наклона коллектора в любой местности, для которой известны перечисленные выше метеоданные.

Литература

1. Даффи Дж. А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Малевского. М., 1977.
2. Валов М.И., Казанджан Б.И. Использование солнечной энергии в системах теплоснабжения: Монография. М., 1991.
3. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М., 1991.
4. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей: Монография/ Под ред. К.Я. Кондратьева. Л., 1978.
5. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. М., 1983.
6. Бринкворт Б. Дж. Солнечная энергия для человека. М., 1976.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 20: Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край и Горно-Алтайская автономная область. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. 1: Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Новосибирск, 1977.