

Математическое моделирование систем солнечного теплоснабжения*

О.А. Ефремова, Л.А. Хворова

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Mathematical Modeling of Solar Heating Systems

O.A. Efremova, L.A. Khvorova

Altai State University (Barnaul, Russia)

Рассматриваются вопросы математического моделирования параметров системы теплоснабжения, основанной на преобразовании энергии солнечного излучения в тепловую энергию при помощи солнечного коллектора. Первая часть статьи касается природы излучения, испускаемого солнцем и падающего на землю. В рассмотрение включено влияние на распространение солнечного излучения атмосферы и геометрических факторов, в частности, угла падения прямого солнечного излучения на различные поверхности, количество поступающей на поверхность энергии за разные промежутки времени. Во второй части статьи рассмотрены основные идеи и расчетные методики, необходимые для понимания функционирования солнечных установок и оценки их производительности. Представлено уравнение коллектора, определяющее его производительность в зависимости от поступающего солнечного излучения и тепловых потерь, уравнение теплового баланса для бака-аккумулятора. Энергетический баланс коллектора — это положительная разница между поглощенной солнечной энергией и тепловыми потерями. Модель системы солнечного теплоснабжения разработана с помощью программного обеспечения AnyLogic. Выходными данными модели являются: полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, температура воды в баке-аккумуляторе к концу расчетного периода.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, системы солнечного теплоснабжения, интенсивность солнечной радиации, поток солнечного излучения, модель, математическое моделирование.

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-17

В последние годы в мире значительно возрос интерес к технологиям возобновляемых источников энергии (ВИЭ), особенно к технологиям преобразования солнечной энергии в тепловую и электрическую энергию [1–4].

The paper deals with the mathematical modeling of parameters of a heating system based on the conversion of solar radiation into heat energy through the solar collector. The first part of the paper is concerned with the nature of the radiation emitted by the sun and permeated through the earth's atmosphere. This includes the effects of the atmosphere on the solar radiation and geometric considerations, that is, its angle of incidence on various surfaces and the quantity of radiation received over various time spans. In the second part of the paper, the basic ideas and calculation procedures are considered. They are required to understand how solar processes work and how their performance can be predicted. Also, there are equations presented for a collector. They provide the useful output in terms of the available solar radiation and the losses, and energy balance of the water tank storage. Energy balance of the collector is the positive difference between absorbed solar energy and thermal losses.

The model of the solar heating system is created with the AnyLogic Simulation Software. The output parameters of the model are: the rate at which useful energy is collected and water temperature in the tank at the end of the calculation period.

Key words: renewable energy sources, solar heating systems, solar intensity, solar radiation flux, model, mathematical modeling.

В настоящее время во всем мире работает более 180 млн м² солнечных коллекторов, обеспечивающих теплоснабжение потребителей. Большая их часть построена в Китае (59%), на втором месте — Европа

* Работа выполнена при поддержке благотворительного Фонда В. Потанина.

(14%). Солнечные коллекторы выпускают 186 крупных фирм в 41 стране. Странами-лидерами по установленной тепловой мощности используемых солнечных водонагревателей в расчете на 1000 жителей являются Кипр (около 600 кВт), Израиль (400 кВт), Австрия (320 кВт), Греция (300 кВт) и Германия (более 100 кВт). По суммарной тепловой мощности солнечных установок на первом месте в мире находится Китай (около 120 ГВт или около 180 млн м²), на втором и третьем местах — Турция и Германия [3].

В России возобновляемые источники энергии пока не получили широкого практического применения. Однако интерес к ним неуклонно растет. В ряде регионов страны некоторые технологии практического использования ВИЭ уже доказали свою конкурентоспособность. В первую очередь это относится к потребителям, расположенным вне систем централизованного тепло- и энергоснабжения. А это около 2/3 нашей страны с населением 20 млн человек [2].

Первые законодательные шаги в России по развитию энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) предприняты Указом Президента РФ № 889 от 04.06.2008 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экономической эффективности российской экономики». Постановлением Правительства № 426 от 03.06.2008 «О квалификации генерирующего объекта, функцио-

нирующего на основе использования ВИЭ» даны поручения соответствующим министерствам о развитии энергетики с использованием ВИЭ. Распоряжением Правительства РФ № 1-р от 08.01.2009 утверждены основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования ВИЭ на период до 2020 г.

В южных районах России на протяжении многих лет успешно работают солнечные водонагревательные установки, обеспечивающие горячей водой санатории, дома отдыха, больницы и жилые дома. По данным информационного бюллетеня «Возобновляемая энергия» [5] для условий Сибири за счет использования солнечной энергии можно обеспечить до 40% экономии тепла.

В связи с актуальностью теоретического исследования и практического внедрения систем солнечного теплоснабжения в энергетический рынок, их экологической безопасностью, с учетом возможности использования этого устойчивого источника энерго- и теплоснабжения в будущем возникла необходимость оценить экономическую эффективность применения солнечных установок в реальных климатических условиях Алтайского края с использованием динамической имитационной модели, описывающей процессы, происходящие в системе солнечного теплоснабжения.



Рис. 1. Схема солнечной водонагревательной установки

Простейшая солнечная водонагревательная установка (СВУ) состоит из солнечного коллектора и теплообменника-аккумулятора (рис. 1). Через солнечный коллектор циркулирует теплоноситель (специальный антифриз). Теплоноситель нагревается в солнечном коллекторе энергией солнца и отдает затем тепловую энергию воде через теплообменник. В баке-аккумуляторе горячая вода хранится до момента ее использования, поэтому он должен иметь хорошую теплоизоляцию. В первом контуре, где расположен солнечный коллектор, может использоваться естественная или принудительная циркуляция теплоносителя. В бак-аккумулятор может устанавливаться электрический нагреватель-дублер.

Для изучения работы коллектора в конкретных условиях необходимо определить зависимость его мгно-

венных характеристик от метеорологических и режимных факторов.

Для практических целей большое значение имеет определение *интенсивности солнечной радиации*, т.е. поверхностной плотности потока радиации. *Поток солнечной радиации* — это количество лучистой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади.

Геометрические соотношения между положением плоскости, определенным образом ориентированной относительно Земли в какой-либо момент времени, и направлением прямого солнечного излучения, т.е. положением Солнца относительно этой плоскости, могут быть записаны с помощью следующих углов: широты местности φ , склонения Солнца δ , наклона плоскости к горизонту β , азимутального угла плоско-

сти γ , часового угла ω и угла падения прямого солнечного излучения θ .

Склонение Солнца δ можно определить по приближенной формуле Купера [6]:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right).$$

Угол падения прямого солнечного излучения на поверхность, наклоненную к югу (распространенный случай для плоских солнечных коллекторов), определяется уравнением

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

Угол θ может превысить 90° , это означает, что Солнце находится с другой стороны поверхности. Кроме того, при использовании этого уравнения необходимо быть уверенным, что Земля не затеняет Солнце (т.е. часовой угол находится между углами восхода и заката).

Во многих задачах проектирования солнечных установок и оценки их производительности возникает необходимость вычислять энергию излучения, падающего на наклонную поверхность солнечного коллектора, на основе данных о солнечном излучении, поступающем на горизонтальную поверхность. Для этого необходимо знать составляющие солнечной энергии: прямую, рассеянную и отраженную. Если предположить, что Земля и другие поверхности, отражающие солнечную радиацию, являются источником рассеянной радиации, а рассеянная радиация рас-

пределена по небосводу равномерно, можно записать выражение для определения отношения потоков радиации, падающей на наклонную и горизонтальную поверхности [7]:

$$R = \frac{H_r}{H} = \frac{H_b}{H} R_b + \frac{H_d}{H},$$

где H_b — прямая, H_d — рассеянная составляющая солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность; R_b — отношение прямого излучения на наклонную поверхность к соответствующему излучению на горизонтальную поверхность.

Отношение энергий прямого излучения, падающего на наклонную и горизонтальную поверхности за любой промежуток времени, определяется выражением [3]

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}. \quad (1)$$

Величина θ_z — угол падения прямого солнечного излучения на горизонтальную поверхность — вычисляется с помощью уравнения

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

С помощью соотношений (1), (2) построен график (рис. 2), показывающий влияние угла наклона коллектора на R_b . Наклоняя приемную поверхность в сторону экватора, можно получить достаточно большой прирост энергии поступающего солнечного излучения.

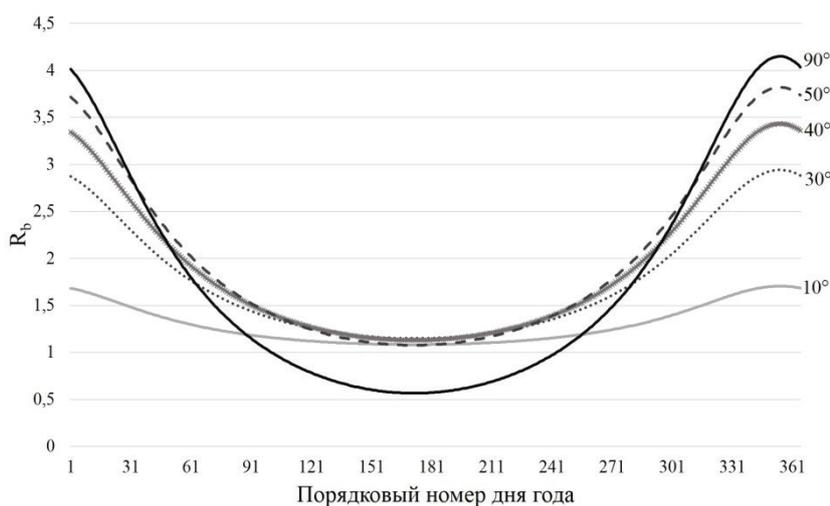


Рис. 2. Изменение отношения R_b в зависимости от угла наклона поверхности в течение года (53° с. ш.)

На рисунке 3 показано влияние угла наклона коллектора на отношении R_b в течение дня.

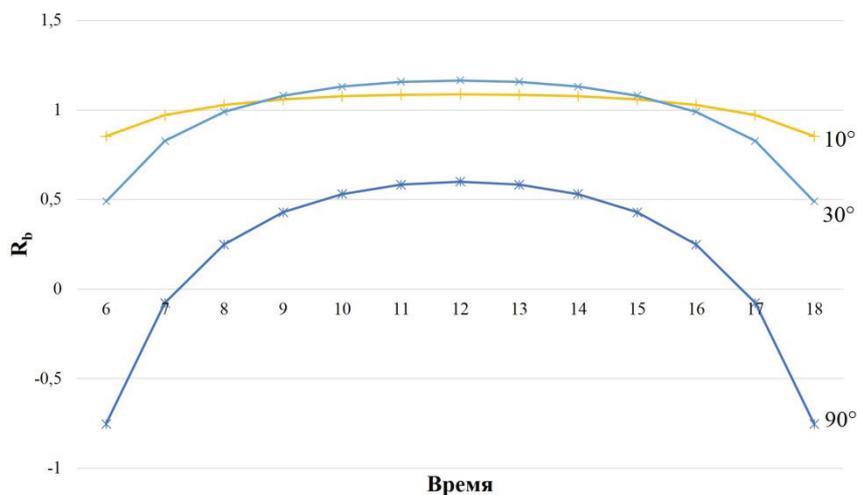


Рис. 3. Изменение отношения R_b в зависимости от угла наклона поверхности в течение дня (53° с. ш., 1 июня)

При проектировании и расчете систем, использующих солнечную энергию, необходимо определять эффективность работы системы в течение определенного промежутка времени. Для этого необходимо знать точные значения приходящей солнечной радиации в течение данного промежутка. В каждый момент времени поток солнечного излучения, поступающий на горизонтальную поверхность, может быть вычислен по формуле

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z.$$

Для оценки потока прямого излучения на горизонтальную поверхность при ясном небе можно использовать уравнение

$$G_{cb} = G_o \tau_b.$$

Коэффициент пропускания (коэффициент прозрачности) атмосферы τ_b для прямой радиации определяется по формуле

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp \left(\frac{-k}{\cos \theta_z} \right).$$

Значения постоянных a_0 , a_1 и k определяются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} a_0 &= r_0 (0.4237 - 0.00821(6 - h)^2), \\ a_1 &= r_1 (0.5055 - 0.00595(6.5 - h)^2); \\ k &= r_k (0.2711 - 0.01858(2.5 - h)^2), \end{aligned}$$

где h — высота, км. Значения поправочных коэффициентов r_0 , r_1 , r_k для различных типов климата можно приблизительно найти в справочной литературе.

При безоблачном небе суммарная радиация зависит от широты места, склонения и высоты Солнца, от оптических свойств атмосферы и альbedo земной поверхности. Аналитически связь суммарной радиации с высотой Солнца часто представляют в виде

$$Q_0 = \frac{S_0 \cdot \sin h_0}{1 + f \cdot \operatorname{cosech} h_0}. \quad (3)$$

Величина параметра f определяется географической широтой и временем года; обычно в течение года он изменяется от 0.06–0.07 в январе–декабре до 0.20–0.23 в мае–августе [8].

На поток суммарной радиации облачность оказывает столь же существенное влияние, как и на потоки прямой и рассеянной радиации. Зависимость потока суммарной радиации от количества облаков описывают формулой

$$Q = Q_0 (1 - f \cdot n),$$

где Q_0 — плотность потока суммарной радиации при безоблачном небе; n — количество облаков в долях единицы. Коэффициент f зависит от широты φ [8].

Режим работы солнечного коллектора описывается уравнением, которое расчленяет энергию солнечной радиации на полезную энергию и потери. Полезная энергия, отводимая из коллектора в данный момент времени, — это разность между количеством солнечной энергии, поглощенной пластиной

коллектора, и количеством энергии, теряемой в окружающую среду:

$$Q_u = F_R A [I_T (\overline{\tau\alpha}) - U_L (T_{ex} - T_o)]. \quad (4)$$

Здесь Q_u — полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, Вт; A — площадь коллектора, м²; F_R — коэффициент, связанный с эффективностью переноса тепла от пластины коллектора к жидкости, отводящей тепло; I_T — плотность потока суммарной солнечной радиации, падающего на единицу площади поверхности коллектора, Вт/м²; $(\overline{\tau\alpha})$ —

приведенная поглощательная способность, учитывающая результирующее влияние оптических свойств материалов коллектора; U_L — полный коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м²·°C); T_{ex} — температура жидкости на входе в коллектор, °C; T_o — температура окружающей среды, °C. Уравнение (4) является моделью плоского солнечного коллектора Хоттеля — Уиллера — Блисса, или моделью с нулевой теплоемкостью [9].

По уравнению (4) можно рассчитывать мгновенные характеристики коллектора; его можно использовать в компьютерном моделировании для определения долговременной работы системы путем вычисления сбора энергии в течение коротких (например, часо-

вых) промежутков времени и последующего вычисления месячных или годовых сумм.

Температуру воды в баке-аккумуляторе к концу расчетного промежутка времени можно определить по уравнению

$$T_{конечн} = T_{нач} + \frac{\Delta T}{m C_p} [Q_u - L - U_L A (T_{нач} - T_o)],$$

где L — поток энергии, отводимой к потребителю; m — масса воды в баке; $T_{нач}$ — температура воды в начале этого промежутка времени; C_p — удельная теплоемкость воды [3].

В заключение отметим, что модель системы солнечного теплоснабжения разработана и реализована с помощью программного обеспечения AnyLogic. Входными параметрами имитационной модели системы солнечного теплоснабжения являются: температура воздуха, продолжительность солнечного сияния, площадь солнечного коллектора, угол наклона коллектора к горизонту. Выходные данные: полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, температура воды в баке-аккумуляторе к концу расчетного периода.

На рисунке 4 приведены значения приходящей солнечной радиации, рассчитанные с 30-минутным интервалом по формуле (3), и фактические данные, измеренные в течение дня [10].

По рисунку 5 можно оценить зависимость мощности коллектора от потока солнечной радиации и температуры окружающего воздуха.

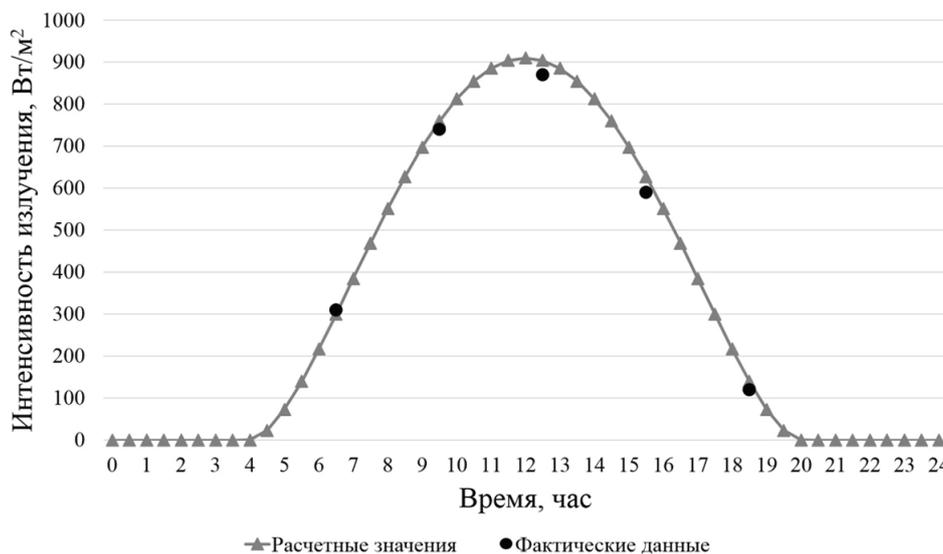


Рис. 4. Суточный ход суммарной солнечной радиации

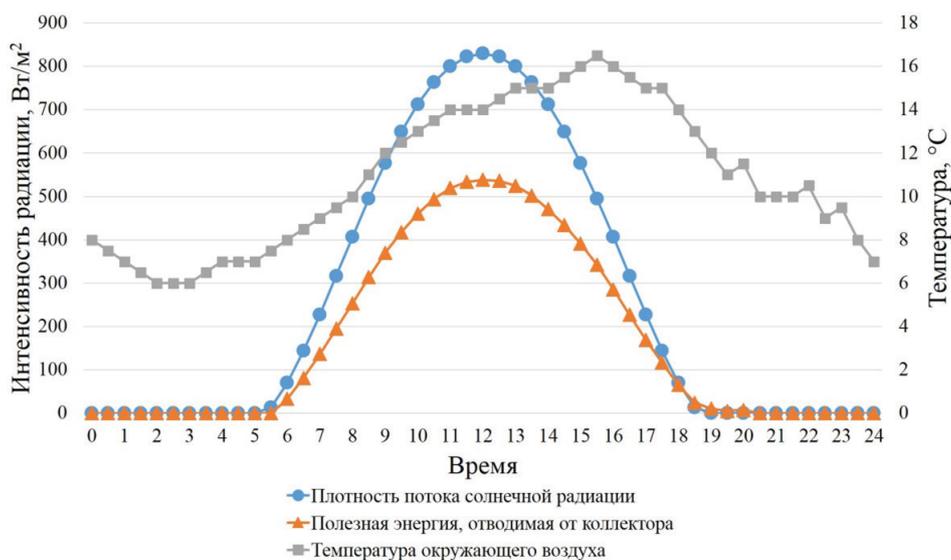


Рис. 5. Зависимость мощности коллектора от потока солнечной радиации и температуры окружающего воздуха

Библиографический список

1. Бастрон А.В. Теоретические модели поля солнечной радиации и результаты исследований солнечного водонагревателя в климатических условиях Красноярского края // Вестник КрасГАУ. — 2008. — №4.
2. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в мире // Новости теплоснабжения. — 2014. — № 1.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. — New Jersey, 2013.
4. Sun energy / Sun energy. 2011 [Electronic resource]. — URL: <http://www.sunenergys.ru>.
5. Возобновляемая энергия : ежеквартальный информационный бюллетень [Электронный ресурс]. — URL: http://www.intersolar.ru/downloads/bulletin/Bulletin_Jul_04.pdf.
6. Duffett-Smith P. Practical astronomy with your calculator. — New York, 1988.
7. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. — М., 1977.
8. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. — Л., 1984.
9. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar heating design. — New York, 1977.
10. Гриценко А.А., Рудова Л.Н., Сукачева В.В., Хворова Л.А. Моделирование радиационного режима // Известия Алтайского гос. ун-та. — 1999. — №1.