Статья поступила в редакцию 27.02.12. Ред. рег. № 1257 The article has entered in publishing office 27.02.12. Ed. reg. No. 1257

УДК 621.1.01 (075.8)

НАГРЕВ ВОДЫ В СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

А.П. Баскаков, М.В. Варанкин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел./факс: (343) 375-95-70, (343) 375-45-67
E-mail: pte@fromru.com, max_varankin@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 11.03.12 Заключение совета экспертов: 15.03.12 Принято к публикации: 20.03.12

Рассчитан оптимальный угол между плоскостью коллектора и горизонталью для условий Среднего Урала при ясном и среднеоблачном небе в июне. Приведены методика расчета количества нагреваемой воды в течение дня и результаты расчета, основанные на экспериментальных данных метеостанции Верхнее Дуброво (56,7° с.ш.). Расчеты выполнены для вакуумного коллектора VTK-1140 фирмы Виссман для ясного и среднеоблачного дней для двух вариантов: без слива воды из коллектора на ночь и со сливом – при оптимальной величине угла между плоскостью коллектора и горизонтом в июне.

Ключевые слова: горячее водоснабжение, солнечный нагреватель.

WATER HEATING IN A SOLAR HEATER AT THE MIDDLE URAL

A.P. Baskakov, M.V. Varankin

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira ave., Yekaterinburg, 620002, Russia
Тел./факс: (343) 375-95-70, (343) 375-45-67
E-mail: pte@fromru.com, max_varankin@mail.ru

Referred: 11.03.12 Expertise: 15.03.12 Accepted: 20.03.12

The optimal angle β between a plane of a collector and horizontal is calculated for for Middle Ural at clear and mean-clouded sky in June. The method of calculation of flow rate of water heated during a day and results of calculation, based on experimental date for Verkhnee Dubrovo (56,7° N) are given. The calculations are executed for Vissmann vacuum collector VTK-1140 in two versions: with and without water removing from the collector at night at clear or mean-clouded sky at the optimal β in June.

Keywords: hot water supply, solar heater.



Альберт Павлович Баскаков

Сведения об авторе: профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» УрФУ, д-р техн. наук, почетный профессор УГТУ-УПИ, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

Область научных интересов: теплофизика.

Публикации: автор 4 учебников (один – на испанском языке), 11 монографий (4 – на английском языке) и более 500 статей в журналах.



Максим Викторович Варанкин

Сведения об авторе: магистрант кафедры «Промышленная теплоэнергетика» УрФУ. Лауреат именной стипендии губернатора Свердловской области.

Публикации: 3.

© Научно-технический центр «ТАТА», 2012

Введение

Солнечные коллекторы широко используются в системах горячего водоснабжения во многих странах мира с умеренным и жарким климатом [1-4]. Они находят применение и в некоторых районах России [5-6]. На среднем Урале коллекторы установлены лишь у некоторых любителей.

Ниже приведены уравнения для расчета нагрева воды в одноконтурном солнечном коллекторе, и на их основе оценивается тепловая мощность коллектора в самый длинный солнечный день (15 июня) на Среднем Урале. Рис. 1 дает интенсивность суммарного $I(\tau)$ (прямого, рассеянного и отраженного) излучения, падающего на единицу поверхности коллектора, ориентированного строго на юг и наклоненного под разными углами β к горизонту. Исходные данные заимствованы из наблюдений на метеостанции Верхнее Дуброво (около Екатеринбурга) на широте φ = 56,7° N [2]. Расчет величины $I(\tau)$ выполнен по известным формулам, приведенным в учебниках, например в [8]:

$$I(\tau) = I_{м}\cos\xi - I_{д}\frac{1+\cos\beta}{2} + \rho\frac{I_{гор}+I_{д}}{2}(1-\cos\beta)\,, \quad (1)$$

где $I_{м}$ – интенсивность прямого солнечного излучения на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам (приведена в [2]); величина $I_{м}\cos\xi$ учитывается только для отрезка времени $2\Delta\tau_{c}$, когда прямое солнечное излучение падает на наклонную поверхность. $\Delta\tau_{c} = \left|(12/180°)\arccos\left[-\mathrm{tg}\delta\mathrm{tg}(\phi-\beta)\right]\right|$, причем величина $\Delta\tau_{c}$ в часах отсчитывается от 12 часов полудни; часто коллектор устанавливается под углом β, равным широте φ местности, в этом случае $\Delta\tau_{c} = 6$ ч, т.е. для коллектора солнце «всходит» в 6 ч утра и «заходит» в 18 ч вечера (зимой на Урале истинный восход может наступать позднее рассчитанного таким образом; тогда расчет ведут по истинному времени восхода и захода, приведенному в [2] для горизонтальной поверхности); ξ – угол между направлением на солнце и нормалью к наклонной поверхности; $\cos\xi = \cos(\phi-\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi-\beta)\sin\delta$ (для поверхности, ориентированной строго на юг); $\delta = 23,45\sin\left[360°(284+n)/365\right]$ – угол склонения в градусах; $\omega = \pm 180[\tau/12]$ – часовой угол в градусах, отрицательный до полудня и положительный после полудня (солнечное время τ подставляется в часах); $I_{д}$ – интенсивность рассеянного (его называют также диффузным) излучения на горизонтальную поверхность (приведена в [2]), учитывается в течение всего светового дня; $I_{гор} = I_{м}\cos\theta$ – мощность прямого излучения, падающего на горизонтальную площадку (приведена в [2]), учитывается в течение всего светового дня; $\cos\theta = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega$ – косинус зенитного угла; $\rho\left[\left(I_{гор}+I_{д}\right)/2\right](1-\cos\beta)$ – излучение, отраженное от поверхности земли, зданий, сооружений и т.д. (так называемой «деятельной поверхности»); ρ – коэффициент отражения земной поверхности (альбедо), зависящий от многих факторов и изменяющийся в диапазоне от 0,2 (летом) до 0,8 (зимой, при наличии снежного покрова).

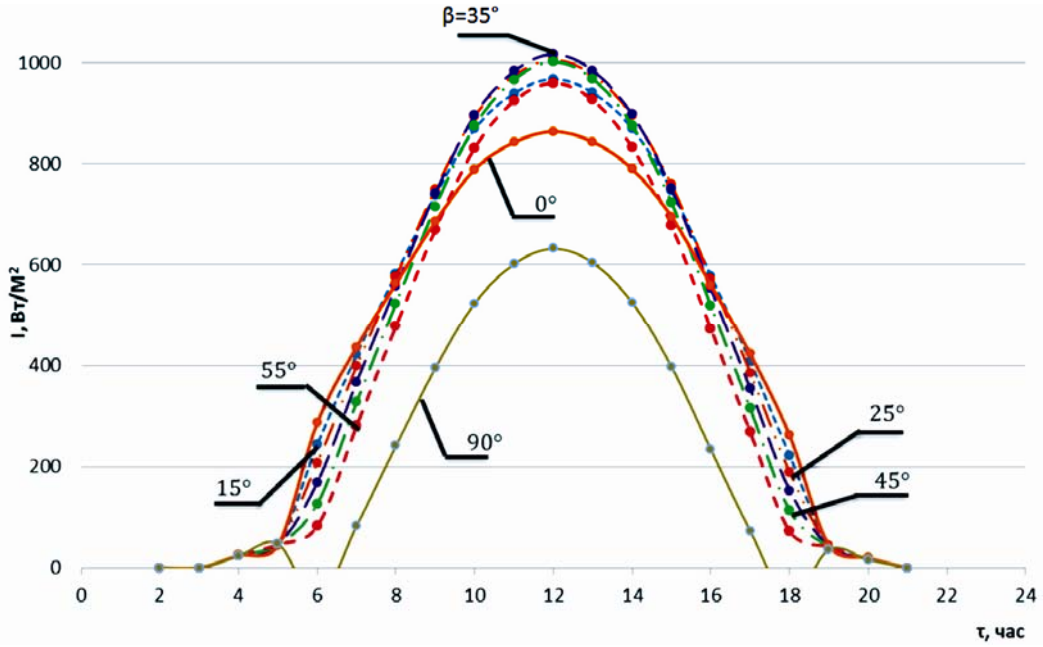


Рис. 1. Изменение энергетической освещенности коллектора, наклоненного под углом β к горизонту, в течение ясного светового дня
Fig. 1. Change of solar irradiation on the tilted collector during the clear day

© Scientific Technical Centre «TATA», 2012

Из рис. 1 видно, что энергетическая освещенность коллектора при различных углах его наклона к горизонту почти не меняется в данных условиях, при изменении β от 15 до 55°. Оптимальное значение β, посчитанное по суммарному количеству полученной за день энергии, составляет для ясного дня 25°. Такие же расчеты показали, что для среднеоблачного дня оптимальное значение β = 20°, но, как и в ясный день, максимум оказался чрезвычайно пологим. В дальнейшем расчеты выполнены для этих углов.

Рассмотрим нагрев воды для ГВС в одноконтурной установке (рис. 2).

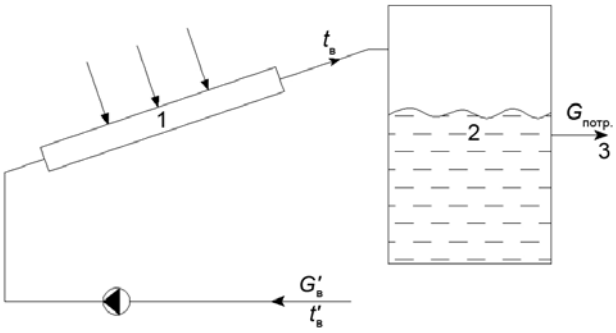


Рис. 2. Схема одноконтурного солнечного нагревателя: 1 – коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – горячая вода к потребителю
Fig. 2. The scheme of a one-circuit solar heater: 1 – collector; 2 – accumulator; 3 – heated water to consumer

Холодная вода с температурой $t'_в$ проходит через коллектор, нагревается в нем до заданной температуры $t_в$ и поступает в бак-аккумулятор. Расход воды изменяется в соответствии с изменением интенсивности поглощаемого коллектором солнечного излучения. Далее рассматриваются два случая.

1. На ночь вода из коллектора сливается в бак-аккумулятор, в котором поддерживается заданная температура воды, а утром, когда теплоприход от солнца становится равным теплопотерям от коллектора, включается насос и через него начинает циркулировать вода с расходом $G'_в$, соответствующим количеству q поглощаемой коллектором энергии.

2. На ночь коллектор отключается от бака-аккумулятора, вода в нем до восхода солнца охлаждается до температуры окружающей среды t_0, которую для простоты расчетов будем считать постоянной в течение светового дня (ее изменение за это время не сильно влияет на КПД коллектора). После восхода солнца неподвижная вода в коллекторе нагревается до заданной температуры, после чего включается насос.

По мере увеличения интенсивности поглощаемого излучения подача насоса автоматически увеличивается. Задача системы автоматического регулирования подачи – поддерживать постоянную температуру поступающей в бак-аккумулятор воды. Зная изменение интенсивности I излучения на коллектор, нетрудно рассчитать изменение подачи насоса во времени в течение светового дня. Для этого необходимо найти время нагрева воды в коллекторе с момента $\tau = \tau_{восх.}$ (начала обогрева коллектора солнцем) до $\tau = \tau_{прогр.}$, когда вода нагреется до заданной температуры $t_в$ (для второго случая), и зависимость расхода воды на входе в установку, соответствующего интенсивности падающего на коллектор теплового потока, от времени $G'_в(\tau)$.

Величина теплового потока q, воспринимаемого теплоносителем в коллекторе, зависит от времени через интенсивность I падающего излучения, а от $\overline{t}$ – из-за изменения КПД коллектора [7]:

$$q = I(\tau)\eta_{опт} - \left(k_1 + k_2\right)\left(\overline{t} - t_0\right), \qquad (2)$$

где $\eta_{опт}$ – оптический КПД коллектора (является величиной постоянной и равняется 0,8–0,9 у лучших коллекторов). В дальнейших расчетах принят $\eta_{опт}$ = = 0,8 – для вакуумного коллектора фирмы Виссман [8]; $k_1 + k_2$ – коэффициенты теплопередачи от верхней (лучепринимающей) и нижней (теплоизолированной) поверхностей коллектора. Для упрощения записи обозначим $k_1 + k_2 =$ æ. Для вакуумного коллектора фирмы Виссман æ = 1,7 Вт/(м^2·К) [8].

В качестве примера на рис. 3 приведено изменение интенсивности суммарного (прямого плюс рассеянного плюс отраженного) солнечного излучения в течение светового дня, падающего на наклонную поверхность в ясный и среднеоблачный дни июня на метеостанции Верхнее Дуброво, рассчитанное по приведенным выше формулам по данным [2]. Расчеты для среднеоблачного дня позволяют оценить среднюю за длительный срок производительность коллектора. Расчеты для ясного дня нужны, чтобы предусмотреть работу оборудования на максимальных параметрах.

Полученные зависимости для ясного и среднеоблачного дней июня можно аппроксимировать функциями (штрихпунктирные линии):

На начальном участке кривой:

$$I = \psi e^{m\tau}, \qquad (3)$$

где ψ = 1 Вт/м^2.

Коэффициент m в ясный и среднеоблачный дни равен 2,09·10^{-4} с$^{-1}$ и 2,21·10^{-4} с$^{-1}$ соответственно.

Основной участок кривой:

$$I = I_{макс} \sin \frac{\pi}{\tau_{зах} - \tau_{восх}} (\tau - \tau_{восх}), \qquad (3')$$

где $I_{макс}$ равен 1000 и 627 Вт/м^2 в ясный и среднеоблачный дни июня соответственно.

В этой формуле моменты времени $\tau_{восх}$ и $\tau_{зах}$ являются условными временами восхода и захода солнца в соответствии с аппроксимацией (3′) и для среднеоблачного дня июня равны 5 и 19 ч, а для ясного дня 5,2 и 18,8 ч.

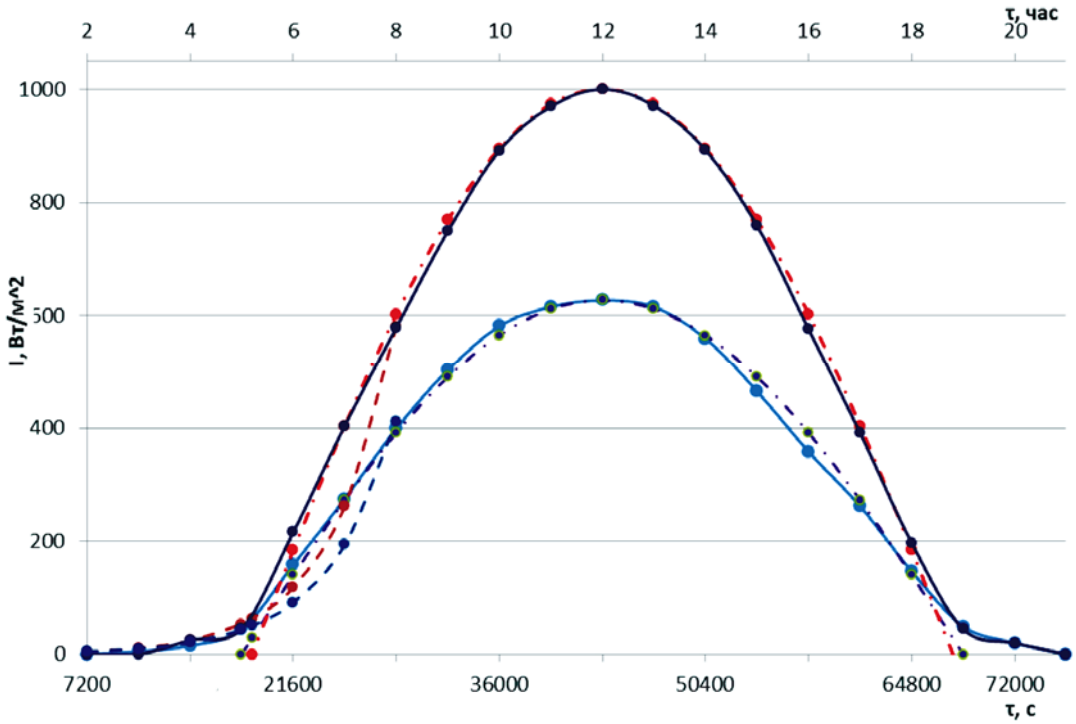


Рис. 3. Изменения интенсивности суммарного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность в ясный и среднеоблачный дни июня: сплошные линии – рассчитанные значения; штрих-пунктирные – аппроксимация по уравнению (3′); пунктирные – аппроксимация начальных участков кривых по уравнению (3)
Fig. 3. Change of intensity of total solar radiation during the day of the June on inclined surface with clear and mean-cloudy sky: solid lines – calculated date; line-with-points – according to eq. (3′); dotted lines – according to eq. (3)

Режим со сливом воды из контура

Уравнение теплового баланса коллектора при непрерывной подаче через него потока воды $G'_в$ запишем в виде:

$$G'_в c_в (t_в - t'_в) d\tau = q F_{кол} d\tau , \qquad (4)$$

где $c_в$ – теплоемкость воды, а $F_{кол}$ – лучепоглощающая поверхность коллектора.

В этом уравнении величину q следует подсчитывать по формуле (5):

$$q = I(\tau)\eta_{опт} - æ\overline{\Delta t} , \qquad (5)$$

где $\overline{\Delta t}$ – средняя разность температур между водой в коллекторе (она входит в него с температурой $t'_в$ и выходит с температурой $t_в$) и окружающей средой.

В стационарном режиме [7, 8]

$$\overline{\Delta t} = t_м - t_0 - \frac{t_в - t'_в}{\ln\left((t_м - t'_в)/(t_м - t_в)\right)} , \qquad (6)$$

где $t_м - t_0 = I\eta_{опт}/æ$.

В рассматриваемом случае величина I, а синхронно с нею и $t_м$ меняются во времени, что затрудняет использование формулы (6). В то же время, среднеарифметическая разность температур, как показывают расчеты, в нашем случае мало отличается от рассчитанной по формуле (6).

Поэтому примем $\overline{\Delta t} = 0,5(t_в + t'_в) - t_0$, поскольку все входящие в $\overline{\Delta t}$ величины заданы.

Насос включится в момент $\tau = \tau_{вкл}$, когда теплоприход на коллектор (с учетом его КПД) сравняется с теплопотерями от него, т.е. в уравнении (5) $q = 0$. Подставив в него величину I из уравнения (3′) и среднеарифметическое значение $\overline{\Delta t}$, получим

$$\tau_{вкл} = \tau_{восх} + \frac{\tau_{зах} - \tau_{восх}}{\pi} \arcsin \frac{æ\left[0,5(t_в + t'_в) - t_0\right]}{I_{макс}\eta_{опт}} .$$

В ясный и среднеоблачный дни июня $\tau_{вкл}$ равен 5,36 и 5,26 часа соответственно.

После включения насоса расход циркулирующей воды $G'_в$ определяется из уравнения (4), которое после сокращения на $d\tau$ и подстановки величины q из уравнения (5) преобразуется к виду:

$$G'_в = \frac{\left(I\eta_{опт} - æ\left[0,5(t_в + t'_в) - t_0\right]\right)F_{кол}}{c_в(t_в - t'_в)} =$$
$$= \frac{I\eta_{опт}F_{кол}}{c_в(t_в - t'_в)} - \frac{æF_{кол}(t_в + t'_в)}{2c_в(t_в - t'_в)} + \frac{æF_{кол}t_0}{c_в(t_в - t'_в)} . \qquad (7)$$

© Scientific Technical Centre «TATA», 2012

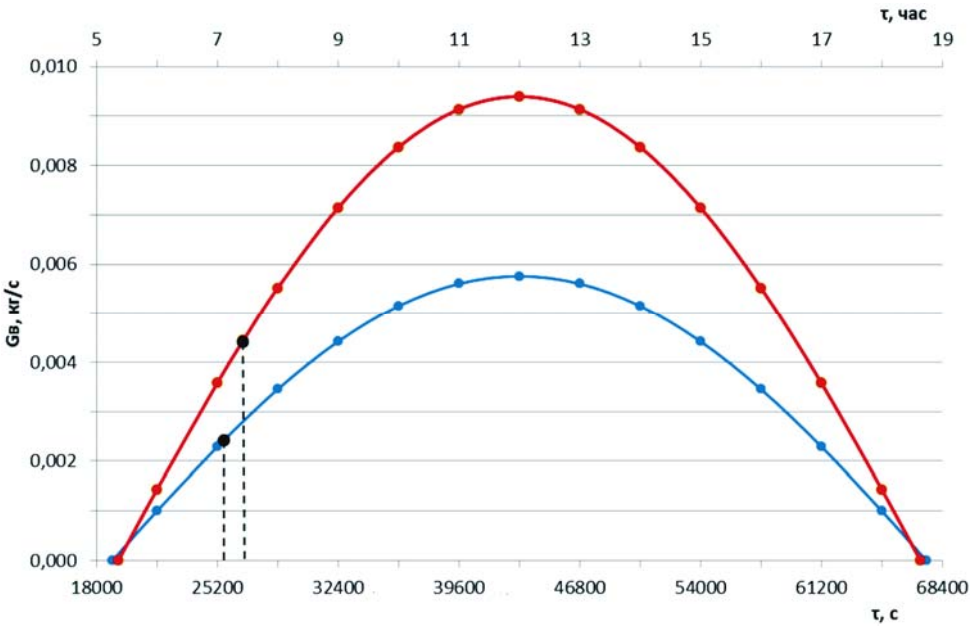


Рис. 4. Изменение расхода воды через коллектор VTK-1140 за световой день без слива и со сливом воды из коллектора
Fig. 4. Change of water flow rate through the collector VTK-1140 during a day with and without water removing from the collector

На рис. 4 приведены рассчитанные по формуле (7) зависимости для коллектора VTK-1140 фирмы Виссман в ясный и среднеоблачный дни июня при следующих параметрах: $M_в = 8{,}5$ кг; $c_в = 4{,}19$ кДж/(кг·К); $t'_в = 15$ °С; $t_0 = 20$ °С; $t_в = 60$ °С; $\eta_{опт} = 0{,}8$; $F_{кол} = 2{,}3$ м^2; æ = 1,7 Вт/(м^2·К).

Насос выключится в момент $\tau = \tau_{вкл}$, когда поглощаемый коллектором тепловой поток сравняется с теплопотерями от него, т.е. $G'_в = 0$:

$$\tau_{выкл} = \tau_{зах} - \frac{\tau_{зах} - \tau_{восх}}{\pi} \arcsin \frac{æ\left[0{,}5(t_в + t'_в) - t_0\right]}{I_{макс}\eta_{опт}}.$$

Для ясного и среднеоблачного дней июня $\tau_{выкл}$ равен 18,64 и 18,74 ч соответственно.

В бак-аккумулятор за время $d\tau$ добавится $dM = G'_в d\tau$ воды. Подставив в это соотношение величину $G'_в$ из (7) и проинтегрировав от $\tau_{вкл}$ до $\tau_{выкл}$, найдем полное количество воды, нагретой за световой день от $t'_в = 15$ °С до $t_в = 60$ °С.

$$M = \int_{\tau_{вкл}}^{\tau_{выкл}} G'_в d\tau =$$

$$= \int_{\tau_{вкл}}^{\tau_{выкл}} \left[\frac{I\eta_{опт}F_{кол}}{c_в(t_в - t'_в)} - \frac{æF_{кол}(t_в + t'_в)}{2c_в(t_в - t'_в)} + \frac{æF_{кол}t_0}{c_в(t_в - t'_в)} \right] d\tau .$$

Величина M для ясного и среднеоблачного дней равна 268,5 и 161,3 кг воды соответственно.

Попутно заметим, что СанПиН 2.1.2496-09 от 07.04.2009 г. требуют, чтобы температура горячей воды в местах водозабора была не ниже 60 °С во избежание размножения в системе ГВС легионеллы. В большинстве зарубежных стран практикуется нагрев воды в коллекторах до 45-50 °С, поскольку снижение температуры нагрева увеличивает КПД коллектора.

С легионеллой можно бороться, например, периодическим прогревом системы до 60 °С (при этой температуре она погибает в течение 25 минут [9]) во время минимального водоразбора и максимального прихода солнечной энергии.

Режим без слива воды из контура

В этом случае насос включится в момент $\tau = \tau_{вкл}$, когда неподвижная вода в коллекторе нагреется до температуры $t_в = 60$ °С.

Уравнение теплового баланса коллектора, отключенного от бака-аккумулятора, имеет вид

$$c_в M_в d\tau = q(\tau, t) F_{кол} d\tau , \qquad (8)$$

где $M_в$ – масса воды в коллекторе и прогреваемых вместе с ним конструкций. Считаем, что температура воды по длине трубок отключенного коллектора одинакова.

Обозначив $t - t_0 = y$, подставив в него уравнения (2) и (3) и поделив его на $c_в M_в$, получим:

$$dy = \left[\frac{\eta_{опт}}{c_в M_в} \psi e^{m\tau} - \frac{æ}{c_в M_в} y \right] F_{кол} d\tau .$$

Поделив левую и правую части уравнения на $d\tau$ и обозначив $dy/d\tau = y'(\tau)$, $\eta_{опт}F_{кол}\psi / c_в M_в = A$, $æF_{кол} / c_в M_в = B$, запишем:

$$y' = Ae^{m\tau} - By . \qquad (9)$$

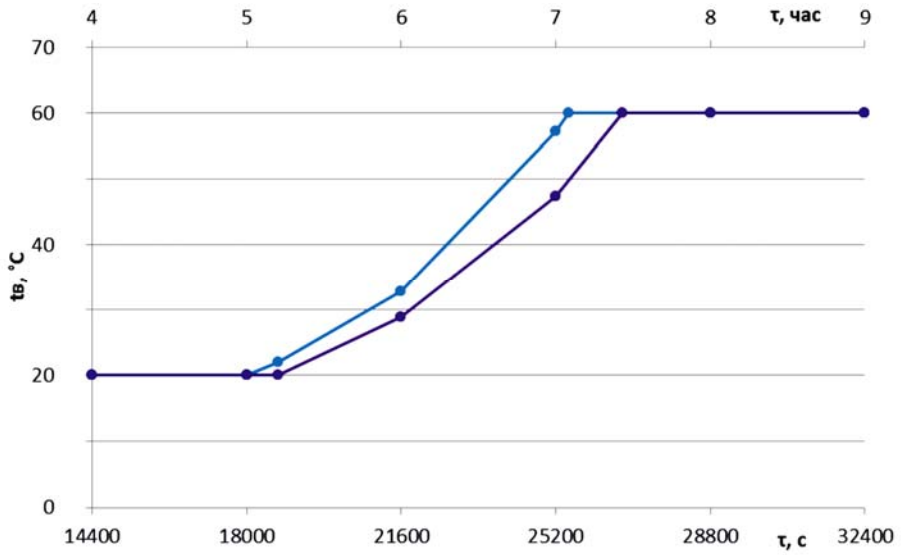


Рис. 5. Изменение температуры воды в коллекторе для ясного и среднеоблачного дней июня
Fig. 5. Change of water temperature in collector at clear or mean-cloudy sky in June

Общее решение линейного однородного уравнения (9) имеет вид:

$$y = Ce^{-B\tau} + Ae^{-B\tau}\int e^{m\tau}e^{B\tau}d\tau\,. \qquad (10)$$

Интеграл в уравнении (10) равен: $\int e^{m\tau}e^{B\tau}d\tau = \frac{e^{(B+m)\tau}}{B+m}$.

Подставив полученное выражение в уравнение (10), получим:

$$y = Ce^{-B\tau} + A\frac{e^{m\tau}}{B+m}\,. \qquad (11)$$

Найдем постоянную интегрирования C, исходя из начальных условий: при $\tau - \tau_{вкл} = 0 \Rightarrow y = t - t_0 = 0$.

Выразив из уравнения (11) постоянную интегрирования C, получим: $C = -A\frac{e^{(B+m)\tau_{восх}}}{B+m}$; $A = 5{,}17\cdot10^{-5}$ °C/с; $B = 11\cdot10^{-5}$ с$^{-1}$.

Постоянная интегрирования C равна -63 и -60 °C в ясный и среднеоблачный дни соответственно; $\tau_{восх}$ = 5,2 ч и 5 ч в ясный и среднеоблачный дни июня соответственно.

Подставив полученную постоянную интегрирования C в уравнение (11), приведем уравнение к виду

$$t = t_0 + \frac{A}{B+m}\left(e^{m\tau} - e^{(B+m)\tau_{восх}}e^{-B\tau}\right).$$

Полученное решение дает зависимость $t = f(\tau)$ (рис. 5). В момент времени $\tau = \tau_{прогр}$ (равное 7,4 и 7,1 часа для ясного и среднеоблачного дней соответственно), когда температура воды достигнет $t_в = 60$ °C, включается насос и вода начинает циркулировать через коллектор.

В этом случае зависимости, рассчитанные по формуле (7) для коллектора VTK-1140 фирмы Виссман в ясный и среднеоблачный дни июня, при тех же параметрах, что и в предыдущем случае, будут иметь аналогичный вид, только будут начинаться от $G'_в = 0{,}0044$ и 0,0024 кг/с соответственно (рис. 4).

Полное количество воды, нагретой за ясный и среднеоблачный световой день от $t_0 = 15$ °C до $t_в = 60$ °C, равно 257,2 и 158,2 кг соответственно.

Список литературы

1. Безруких М.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб.: Наука, 2002.

2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1990.

3. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1977.

4. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982.

5. Бутузов В.А., Брянцева Е.В., Бутузов В.В., Гнатюк И.С. Энергетический потенциал солнечной радиации и экономическая целесообразность применения гелиоустановок в Якутии // Промышленная энергетика. 2009. № 6. С. 48-53.

6. Бутузов В.А. Солнечные коллекторы в России и на Украине: конструкции и технические характеристики // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 37-40.

7. Баскаков А.П., Соколова Т.А., Зинченко Д.А. Расчет КПД прямоточного солнечного коллектора // Промышленная энергетика. 2010. № 8. С. 53-57.

8. Баскаков А.П. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, учебное пособие, ч.1. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.

9. Постановление № 20 Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека «Об утверждении СанПиН 2.1.4.2496-09» от 07.04.2009 г.

© Scientific Technical Centre «TATA», 2012