

УДК 662.997-534-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНО-ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ташполотов Ы., Сатыбалдыев А.Б., Матисаков Т.К.

Ошский государственный университет, Ош, e-mail: itashpolotov@rambler.ru

Получено уравнение теплового баланса для солнечной водонагревательной установки горячего водоснабжения с учетом тепловых потерь за счет конвекции, излучения и теплопроводности системы. На основе математической модели составлена программа на ЭВМ в среде Delphi 7, позволяющая определить основные характеристики и параметры солнечной водонагревательной установки. По предложенной модели были получены характеристики температуры теплоносителя и его расхода от времени суток (в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды), определены теплофизические характеристики и эффективности солнечной водонагревательной установки. Построен график зависимости нагрева от времени при различных значениях количества коллекторов. Получена зависимость изменения коэффициента теплопередачи бака-аккумулятора от толщины теплоизоляционного материала.

Ключевые слова: математическая модель, солнечно-водонагревательная установка

THE STUDY HEAT TECHNICAL FEATURES SOLAR WATER NAGREVA TELNOY INSTALLATION ON BASE OF MATHEMATICAL MODELING

Tashpolotov Y., Satybaldyev A.B., Matisakov T.K.

Osh State University, Osh, e-mail: itashpolotov@rambler.ru

An equation of heat balance for the solar water-heating domestic hot water installation, taking into account heat loss due to convection, radiation and heat conduction systems. On the basis of a mathematical model, a program on a computer in Delphi 7 environment, which allows to determine the basic characteristics and parameters of solar water heating installation. On the proposed model were obtained characteristics of the coolant temperature and flow rate from the time of day (depending on changes in the intensity of solar radiation and ambient temperature), defined thermal characteristics and performance of solar water heating installation. The built graph to dependencies of the heating from time under different importances amount collector. The dependence of the coefficient of heat transfer tank – the battery on the thickness of insulation material.

Keywords: mathematical model, Solar-water heating plant

Основой современной энергетической политики стал поиск мер, направленных на повышение эффективности использования энергии, энергосбережение, сокращение или ослабление воздействия энергетических объектов на окружающую среду. Такая стратегия характерна для нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одной из наиболее перспективных областей использования солнечной энергии является подогрев воды для использования в бытовых условиях.

Однако, как показывает анализ существующих гелиоустановок, их применению для целей горячего водоснабжения, препятствует низкая эксплуатационная надежность, которая обусловлена сложностью конструкции, нетехнологичностью, высокой материалоемкостью, что вызывает повышение себестоимости получаемой тепловой энергии [1].

Поэтому исследования, направленные на усовершенствование существующих и создание новых солнечно-водонагревательных установок (СВУ) для горячего водоснабжения, актуальны и имеют большое народнохозяйственное значение.

На эффективность работы СВУ влияние оказывают КПД солнечно-водонагреватель-

ного коллектора (СВК), значения тепловых потерь в подводящих и отводящих трубопроводах солнечного контура (зависящие от длины подводящих и отводящих трубопроводов, материала трубопроводов, материала изоляции, расхода теплоносителя), объем бака-аккумулятора, а также величины тепловых потерь через стенки бака-аккумулятора.

Существует два основных подхода к вопросу оценки эффективности работы как СВК, так и СВУ. Первый подход основан на проведении долгосрочных экспериментальных исследований эффективности работы СВУ в натуральных условиях в месте нахождения данной установки. Другой подход основан на математическом моделировании процесса теплообмена в СВУ, и, таким образом, определении производительности СВК, температурного поля поглощающей пластины, температуры теплоносителя на выходе из СВК, количества тепла, передаваемого в бак-аккумулятор и др.

Моделирование позволяет быстро рассчитывать наиболее важные выходные параметры при заданных параметрах СВУ. Позволяет также, варьируя некоторыми входными параметрами, например, размерами теплоприемника, количества коллекторов в системе, теплоемкости теплоносителя и его на-

чальной температурой, теплоизоляционные параметры бака и т.д., получать наиболее оптимальные режимы работы СВУ.

Математическое моделирование солнечной водонагревательной установки, со-

бранной из n коллекторов, основывалось на расчете её теплового баланса.

Суммарный поток тепла, поступающий к приёмным поверхностям коллекторов, определялся балансом [2]:

$$ES_{\text{пр}}\eta_{\text{опт}}nd\tau = \left[V_6\rho c + \pi\rho_{\text{ст}}c_{\text{ст}}(r_{\text{н}}^2h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2h_{\text{в}}) \right] dT + \left[\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3}d_c H\alpha_{\text{с.о}} \right) + K_6 S_6 + K_{\text{тр}}\pi d_{\text{тр}}l_{\text{тр}} \right] (T - T_0) d\tau. \quad (1)$$

Полученная энергия от солнечного излучения расходуется на нагревание теплоносителя, стенок бака и коллектора, а также потери тепла коллектора и бака-аккумулятора в окружающую среду за период времени $d\tau$. Уравнение баланса СВУ записано в предположении, что температура теплоприемника и стенки бака аккумулятора равна средней температуре $T(\tau)$ теплоносителя. В этом уравнении приняты следующие обозначения: E – солнечная суммарная радиация; $S_{\text{пр}}$ и $\eta_{\text{опт}}$ – площадь и оптический КПД коллектора; V_6 – объем теплоносителя в баке, м^3 ; c , $c_{\text{ст}}$ – теплоемкость теплоносителя и стенки бака, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ , $\rho_{\text{ст}}$ – плотность теплоносителя и ограждения, $\text{кг}/\text{м}^3$; $r_{\text{н}}$, $r_{\text{в}}$, $h_{\text{н}}$, $h_{\text{в}}$ – наружные, внутренние радиусы и высоты бака аккумулятора, м ; T , T_0 – температуры теплоносителя и окружающей среды, К ; R – радиус основания стеклянного корпуса, м ; H – высота стеклянного корпуса, м ; S_6 – площадь теплообменной поверхности бака-аккумулятора, м^2 ; $d_{\text{тр}}$, $l_{\text{тр}}$ – диаметр и длина соединительного трубопрово-

да СВУ, м ; K , K_6 и $K_{\text{тр}}$ – коэффициенты теплопередачи коллектора, бака-аккумулятора и соединительного трубопровода СВУ, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Для определения коэффициентов теплопередачи бака-аккумулятора и соединительного трубопровода СВУ теплопередачи K_6 , $K_{\text{тр}}$ используем формулу, предложенную в [3]:

$$k_6 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{внб}}} + \sum_1^n \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{\text{нб}}}}; \quad (2)$$

$$k_{\text{тр}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{внтр}}} \frac{d_{\text{тр2}}}{d_{\text{тр1}}} + \frac{d_{\text{тр2}}}{2\lambda_{\text{изтр}}} \ln \frac{d_{\text{тр2}}}{d_{\text{тр1}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нтр}}}}. \quad (3)$$

где δ_n , $\delta_{\text{изтр}}$, λ_n , $\lambda_{\text{изтр}}$ – толщины и коэффициенты теплопроводности n -й изоляции бака аккумулятора и соединительного трубопровода; $\alpha_{\text{нб}}$, $\alpha_{\text{нтр}}$, $\alpha_{\text{внб}}$, $\alpha_{\text{внтр}}$ – коэффициенты тепловосприятости и теплоотдачи внутренней и наружной поверхности бака аккумулятора и соединительного трубопровода.

Представим уравнение (1) в виде

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{ES_{\text{пр}}\eta_{\text{опт}}n}{V_6\rho c + \pi\rho_{\text{ст}}c_{\text{ст}}(r_{\text{н}}^2h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2h_{\text{в}})} - \left[\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3}d_c H\alpha_{\text{с.о}} \right) + K_6 S_6 + K_{\text{тр}}\pi d_{\text{тр}}l_{\text{тр}} \right] (T - T_0) \quad (4)$$

введем обозначения –

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \frac{ES_{\text{пр}}\eta_{\text{опт}}n}{V_6\rho c + \pi\rho_{\text{ст}}c_{\text{ст}}(r_{\text{н}}^2h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2h_{\text{в}})}; \\ A = \frac{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3}d_c H\alpha_{\text{с.о}} \right) + K_6 S_6 + K_{\text{тр}}\pi d_{\text{тр}}l_{\text{тр}}}{V_6\rho c + \pi\rho_{\text{ст}}c_{\text{ст}}(r_{\text{н}}^2h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2h_{\text{в}})}; \\ y = T - T_0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Получим линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dy}{d\tau} + Ay = B. \quad (6)$$

При начальном условии $T(0) = T_x$, решение этого уравнения описывает изменение во времени температуры теплоносителя в баке-аккумуляторе СВУ

$$y = \left(y_0 - \frac{B}{A} \right) \exp(-A\tau) + \frac{B}{A}. \quad (7)$$

$$T_{\Gamma} = T_{\circ}^{\text{cp}} + \left(T_x - T_{\circ}^{\text{cp}} - \frac{ES_{\text{пр}} \eta_{\text{опт}} n}{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}} \right) \times \\ \times \exp \left(\frac{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}}{V_{\circ} \rho c + \pi \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} (r_{\text{н}}^2 h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2 h_{\text{в}})} \tau \right) + \\ + \frac{ES_{\text{пр}} \eta_{\text{опт}} n}{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}}, \quad (8)$$

где T_{\circ}^{cp} – средняя температура окружающей среды.

Продолжительность нагрева теплоносителя в СВУ до заданной температуры T_{Γ}

$$\tau_{\Gamma} = \frac{V_{\circ} \rho c + \pi \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} (r_{\text{н}}^2 h_{\text{н}} - r_{\text{в}}^2 h_{\text{в}})}{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}} \times \\ \times \ln \left(T_{\Gamma} - T_{\circ}^{\text{cp}} - \frac{ES_{\text{пр}} \eta_{\text{опт}} n}{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}} \right) - \\ - \ln \left(T_x - T_{\circ}^{\text{cp}} - \frac{ES_{\text{пр}} \eta_{\text{опт}} n}{\pi n \left(K(d_c H + R^2) + \frac{1}{3} d_c H \alpha_{\text{с.о}} \right) + K_{\circ} S_{\circ} + K_{\text{тр}} \pi d_{\text{тр}} l_{\text{тр}}} \right). \quad (9)$$

Переданное тепло – потребителю в течение светового дня продолжительностью τ с температурой T_{Γ} Дж,

$$Q = V_{\circ} c_{\text{р}} (T_{\Gamma} - T_x). \quad (10)$$

Вычисление характеристик и моделирование параметров СВУ производились по специализированной программе, написанной в среде Delphi 7.

В начальном моменте времени (при $\tau = 0$) температура теплоносителя $T(0) = T_x$. Нагревание холодного теплоносителя начинается с восходом Солнца и продолжается весь световой день, в течение которого его температура повышается от T_x до T_{Γ} .

Используя уравнения (4), (5) и (7), определяем температуру теплоносителя в баке после облучения коллектора в течение светового дня продолжительностью τ

В расчетах использовались следующие исходные данные [4–6]:

$$T_{\circ}^{\text{cp}} = 293\text{--}298\text{K}; T_x = 290\text{K}; \\ S_{\text{пр}} = 0,125\text{ м}^2; E = 100\text{--}900\text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2; \\ n = 12\text{--}36; d_c = 0,15\text{ м}; H = 0,2\text{ м}; \\ v = 0\text{--}5\text{ м}/\text{с}; S_{\circ} = 1,25\text{--}2,55\text{ м}^2; \\ V_{\circ} = 0,1\text{--}0,3\text{ м}^3; d_{\text{тр}} = 0,015\text{ м}; l_{\text{тр}} = 6\text{ м};$$

$$\begin{aligned} \tau &= 1-12 \text{ ч}; \delta_{\text{ст}} = 0,04 \text{ м}; \delta_n = 0,4-0,8 \text{ м}; \\ \delta_{\text{изтр}} &= 0,02-0,04 \text{ м}; \lambda_{\text{ст}} = 0,74 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; \\ \lambda_n &= 0,42-0,9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; \lambda_{\text{изтр}} = 0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; \\ \alpha_{\text{вст}} &= 8,14 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}; \alpha_{\text{нст}} = 23,26 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}; \\ \alpha_{\text{вб}} &= 10-20 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}; \\ \alpha_{\text{нб}} &= 100-300 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}. \end{aligned}$$

Результаты расчета T в зависимости от времени нагрева при различных значениях количества коллекторов n приведены на рис. 1. Видно, что температура воды в баке-аккумуляторе зависит от количества коллекторов и с увеличением n резко возрастает температура теплоносителя.

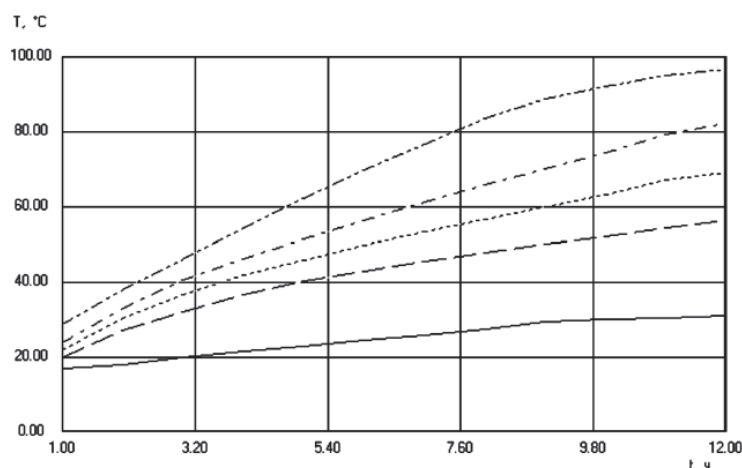


Рис. 1. Зависимость изменения температуры воды в баке-аккумуляторе от времени нагрева при различных значениях количества коллекторов:
 - - - - - $n = 12$, - - - - - $n = 18$, - - - - - $n = 24$, - - - - - $n = 30$, — температура окружающей среды

Для правильного выбора теплоизоляционного материала и его толщины проведен расчет, и его результаты приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, например, при увеличении толщины войлочного покрытия $\delta_{\text{из}}$ от

1 до 4 величина $K_{\text{из}}$ уменьшается примерно в 2 раза, а дальнейшее его увеличение (с 4 до 15 см) приводит к незначительному изменению коэффициента теплопроводности теплоизоляционного войлочного материала.

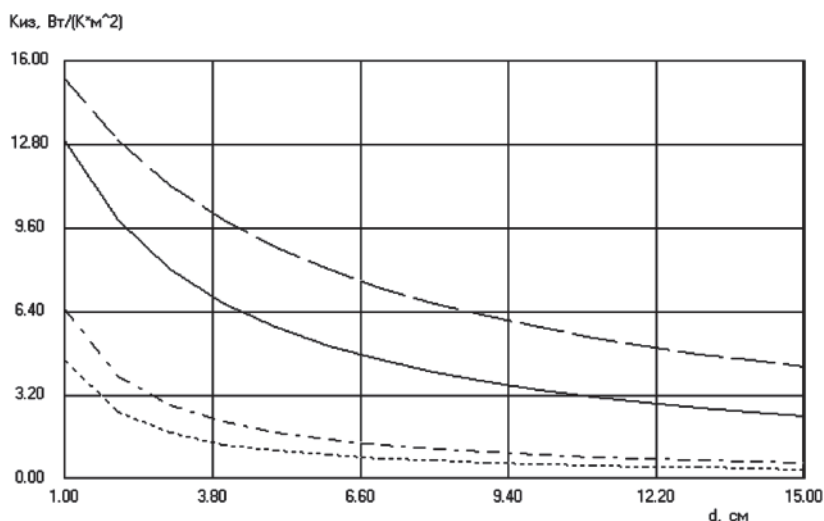


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента теплопередачи бака-аккумулятора от толщины теплоизоляционного материала:
 - - - - - войлок, - - - - - древесноволокнистые плиты (ДВП), — дерево, - - - - - бетон

Нами выполнены также расчеты суточной теплопроизводительности солнечной водонагревательной установки при изменении площади коллектора от 1 до 4 м² и полученные результаты приведены на рис. 3.

Результаты расчетов показали, что увеличение площади коллектора более 3 м² в расчете на 200-литровый бак приводит к повышению максимальной температуры воды в баке и более раннему в течение дня дости-

жению выбранных контрольных температур, но при этом вероятность ежедневного нагрева воды до требуемой температуры не возрастает. Таким образом, исходя из назна-

чения установки, увеличение площади солнечного коллектора более 3 м² оказывается нецелесообразно, так как неоправданно повышает стоимость установки.

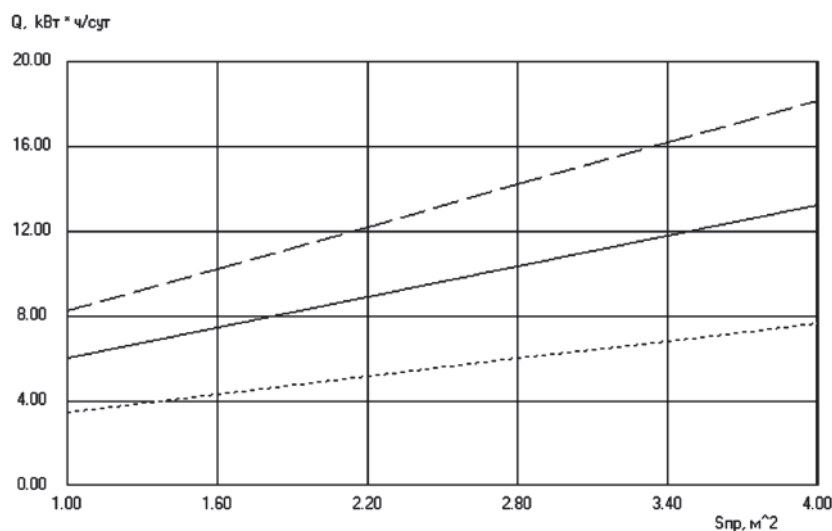


Рис. 3. Зависимость изменения полезной энергии от площади теплопринимающей поверхности коллекторов СВУ при разных объемах бака-аккумулятора:

----- 0,1 м³, — 0,2 м³, - - - - 0,3 м³

Таким образом, на основе математического моделирования можно оптимизировать теплоизоляции бака-аккумулятора, количество коллекторов в СВУ и максимально возможную температуру воды в баке.

Список литературы

1. Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. – Ашхабад: Ылым, 1987. – С. 44–48.
2. Сатыбалдиев А.Б., Матисаков Т.К. Теоретическое исследование теплофизических характеристик СВК на основе математического моделирования // Наука новые технологии. – 2010. – №3. – С. 23–25.
3. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. – Т.: Фан, 1988. – С. 36–68.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – С. 123–168.

5. Исманжанов А.И., Сатыбалдиев А.Б., Матисаков Т.К. Численное исследование суточного прихода суммарной солнечной радиации на произвольно ориентированную поверхность // НОТ КУУ. – 2008. – №3. – С. 246–248.

6. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный расчет наклонных поверхностей. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – С. 167–169.

Рецензенты:

Арапов Б.А., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Ошского государственного университета, г. Ош.

Сопуев А.С., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Программирование» Ошского государственного университета, г. Ош.

Работа поступила в редакцию 02.12.2011.