

УДК 621.472:636

DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-8-114-121

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОГО СОЛНЕЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ С ТЕРМОСИФОНОМ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Р.А. Омаров, М.М. Кунелбаев, Б.С. Токтоналиев, Г.А. Шабикова

Аннотация. Рассмотрено построение, тестирование и численное моделирование одноконтурного солнечного водонагревателя с термосифоном в животноводческом хозяйстве Алмаатинской области. Разработан плоский солнечный коллектор площадью 2,39 м², который используется для нагрева холодной воды, находящейся в изолированном резервуаре. Разработано численное моделирование рассматриваемой системы и составлена математическая модель каждого компонента системы. Система успешно протестирована с использованием солнечной энергии. Получено эмпирическое уравнение количества воды по сравнению с падающей солнечной радиацией. Установлено, что при использовании рассматриваемой системы один литр дистиллированной воды может стоить около 0,2 долл. США.

Ключевые слова: плоский солнечный коллектор; термосифон; численное моделирование.

МАЛ ЧАРБАЧЫЛЫГЫНДА ТЕРМОСИФОНУ БАР БИР КОНТУРЛУУ КҮН СУУ ЖЫЛЫТКЫЧЫН ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК СЫНОО ЖАНА САНДЫК МОДЕЛДӨӨ

Р.А. Омаров, М.М. Кунелбаев, Б.С. Токтоналиев, Г.А. Шабикова

Аннотация. Макалада Алматы облусунун мал чарбачылыгында термосифону бар бир контурлуу күн суу жылыткычын куруу, сыноо жана сандык моделдөө каралган. Аянты 2,39 м² болгон жалпак күн коллектору иштелип чыккан, ал изоляцияланган резервуардагы муздак сууну жылытуу үчүн колдонулат. Каралып жаткан системаны сандык моделдөө иштелип чыккан жана системанын ар бир компонентинин математикалык модели түзүлгөн. Система күн энергиясын колдонуу менен ийгиликтүү сыноодон өттү. Түшкөн күн радиациясына салыштырмалуу суунун көлөмүнүн эмпирикалык теңдемеси алынган. Каралып жаткан системаны колдонуу менен бир литр тазартылган суунун баасы болжол менен 0,2 АКШ долларын түзөрү аныкталган.

Түйүндүү сөздөр: жалпак күн коллектору; термосифон; сандык моделдөө.

EXPERIMENTAL TESTING AND NUMERICAL SIMULATION OF A SINGLE-CIRCUIT SOLAR WATER HEATER WITH A THERMOSIPHON ON A LIVESTOCK FARM

R.A. Omarov, M.M. Kunelbaev, B.S. Toktonaliev, G.A. Shabikova

Abstract. The construction, testing and numerical modeling of a single-circuit solar water heater with a thermosiphon in the animal husbandry of the Almaty region is considered. A flat solar collector with an area of 2.39 m² has been developed, which is used to heat cold water in an insulated tank. A numerical simulation of the system under consideration has been developed. A mathematical model of each component of the system was presented. The system has been successfully tested using solar energy. The annual and monthly performance of the system is presented. In addition, an empirical equation of the amount of water in comparison with the incident solar radiation is obtained. In

addition, an economic study was conducted, and it was found that one liter of distilled water can cost about 0.2 US dollars when using the system in question.

Keywords: flat solar collector; thermosiphon; numerical modeling.

Введение. Более широкое использование возобновляемых источников энергии позволит существенно сократить потребление ископаемых видов топлива, которые наносят существенный вред окружающей среде. В работе [1] показаны различные типы возобновляемых источников энергии, наиболее значимым из них является солнечная энергия. В статье [2] представлены результаты разработки системы для нагрева воды с термосифонным эффектом. В работе [3] приведены результаты численного исследования вычислительной гидродинамики для сравнения между обычной и спиральной моделью для повышения тепловых характеристик с использованием спиральной стоячей трубы, которая увеличивает производительность и температуру теплообменника. В статье [4] приведен численный анализ процесса теплопередачи плоских пластинчатых солнечных коллекторов с ребристой трубой, которые показали увеличение теплопередачи. В работе [5] представлен солнечный водонагреватель с поперечным сечением абсорбционной трубы. Было зафиксировано, что абсорбционные трубы поглощают большое количество солнечного излучения по сравнению с другой трубой-поглотителем, в котором эффективность абсорбционной трубы увеличилась на 10–12 %. В статье [6] представлен плоский пластинчатый коллектор, в котором экспериментально проанализирован поток жидкости, а также теплопередача. В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования по улучшению производительности плоского пластинчатого коллектора, а в статье [8] по улучшению поглощения тепла солнечным коллектором. В работе [9] исследованы характеристики теплопередачи и потока устройства для сбора солнечной энергии с использованием CFD-моделирования. В статье [10] разработано и исследовано влияние использования катушек проводов в трубках поглотителя для улучшения теплопередачи и поглощения солнечной энергии. В статье [11] проведено сравнение эффективности и теплопередачи для солнечного коллектора. В работе [12] проведено экспериментальное исследование теплопередачи и тепловой эффективности солнечных коллекторов. В статье [13] приведены результаты экспериментальных работ по увеличению теплопередачи устройства для сбора солнечной энергии в климатических условиях Ирака. В работе [14] экспериментально исследованы тепловые характеристики системы солнечного теплоснабжения. Система солнечного водяного отопления с термосифоном – одна из самых «успешных» систем солнечного отопления. По сравнению с обычной системой, использующей ископаемое топливо, термосифонная система экономит до 70 % потребления ископаемого топлива [15]. По сравнению с системой солнечного отопления с принудительной циркуляцией система термосифона полагается не на циркуляционный насос, а на тепловую плавучесть потока [16].

На рисунке 1 показан одноконтурный солнечный водонагреватель с термосифоном в кампусе Юньнаньского университета, в котором были сконструированы и протестированы два комплекта одноконтурных солнечных водонагревателей с термосифоном. Каждый состоит из 18 трубок (диаметр внутренней трубки/крышки 47/58 мм, длина 1,8 м) и одного горизонтального цилиндрического резервуара для воды (объем 140 л). Обе системы были идентичны во всех аспектах, за исключением угла наклона коллектора: одна наклонена на 22° от горизонта (SWH-22), а другая – на 46° (SWH-46). Были проведены два эксперимента: первый направлен на исследование ночных рабочих характеристик одноконтурного солнечного водонагревателя с термосифоном и влияния угла наклона коллектора на обратный поток, а второй – на исследование потерь тепла от коллекторов солнечных трубок в окружающий воздух из-за обратного потока ночью. Для контроля температуры окружающего воздуха использовали датчик PT100, расположенный внутри стандартного экрана рядом с двумя солнечными водонагревателями [17].

Теоретические прогнозы расхода в термосифонных солнечных коллекторах сравнивали с экспериментальными измерениями, полученными с помощью лазерного доплеровского анемометра. Предложены модификации обычного метода анализа для повышения точности прогнозов. Результаты сопоставляли с прогнозами расхода и измерениями в других исследованиях [18]. В работе [19] были



Рисунок 1 – Одноконтурные солнечные водонагреватели

проведены экспериментальные сравнения двух комплектов одноконтурных солнечных водонагревателей с термосифоном, каждый из которых состоит из коллектора с плоской пластиной (размером 1000×2000 мм) с алюминиевым поглотителем, окрашенным в матово-черный цвет. Для обеих систем коллекторы были наклонены под углом наклона 30°, электрическое сопротивление 2 кВт было зафиксировано на дне резервуара для хранения, который находился на 12 см выше верхней части коллектора. На верхней части резервуара для хранения был установлен резервный резервуар для воды, внутри которого был оборудован клапан с плавающим шариком для контроля уровня воды в резервуаре для хранения. Для одной системы резервуар для хранения был расположен вертикально с вертикальным расстоянием 0,7 м между соединениями коллекторного контура в резервуаре, а для другой системы резервуар для хранения был расположен горизонтально с вертикальным расстоянием 0,35 м между соединениями коллекторного контура в резервуаре. Верхняя соединительная труба обеих систем была изолирована трубчатым полистиролом толщиной 30 мм.

В одноконтурном солнечном водонагревателе основными компонентами являются: солнечный коллектор, резервуар для воды, соединительные трубы и теплообменник. Как показано на рисунке 2, в данной работе в качестве горизонтального солнечного коллектора был выбран коллектор с вакуумированной трубкой «вода в стекле» из-за его низкой стоимости и высокой эффективности. Коллектор, использующий воду в качестве рабочей жидкости, напрямую соединен с новым резервуаром для воды переменного объема, который оснащен тремя выходными отверстиями. Динамический переключатель рабочего выходного отверстия резервуара автоматически включается электрическими клапанами, установленными в каждом выходном отверстии. Теплообменник, передающий накопленное тепло в резервуар для использования, представляет собой погруженный плоский змеевик. Погруженная катушка подключена к нагревательной клемме. Рабочая жидкость внутри змеевика и нагревательного терминала состоит из 40 % этиленгликоля в воде. Температура рабочей жидкости, подаваемой на нагревательные клеммы, называется температурой подачи, а температура, возвращающаяся с клемм, – температурой возврата. Труба соединяет выходное отверстие коллектора и входное отверстие резервуара, называемое верхней соединительной трубой. Вода в верхней соединительной трубе – это вода, нагреваемая коллектором. Труба соединяет выходное отверстие резервуара и входное отверстие коллектора, называемое соединительной трубой. Вода в нижней соединительной трубе – это вода, вытекающая из бака и ожидающая нагрева. Температура воды в верхних и нижних соединительных трубах

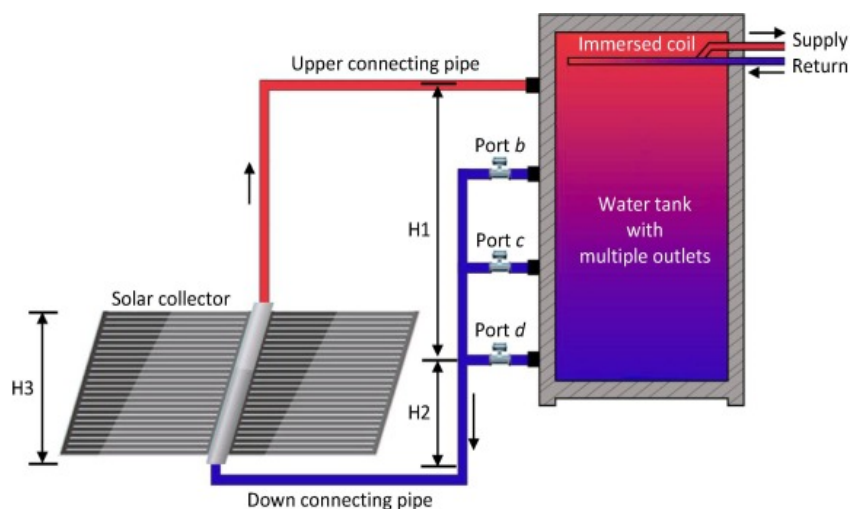


Рисунок 2 – Одноконтурные солнечные системы теплоснабжения с термосифоном

и конструкция труб в значительной степени зависят от скорости естественного циркуляционного потока [20].

Методы исследования. Одноконтурный солнечный водонагреватель с термосифоном сконструирован и установлен в Институте информационных и компьютерных технологий Министерства образования и науки Республики Казахстан (МОН РК), г. Алматы (77° восточной долготы и 43° северной широты), как показано на рисунке 1. Установка имеет трубки над пластиной абсорбера, которые действуют по принципу термосифона (рисунки 1 и 2). Угол наклона плоского коллектора составляет 45°, направленный на юг. Вода поступает в коллектор через впускную трубу из резервуара для воды и отводит тепло от пластины поглотителя.

Резервуар для воды: – это изолированный резервуар, содержащий воду, используемый для поддержания потока воды в коллектор и из него. Изменение плотности воды внутри резервуара создает термосифонную активность.

На рисунке 3 показана модель плоского солнечного коллектора. Принцип и новизна установки заключается в ее отличии от известного принципа проектирования, коллектор содержит прозрачный стеклопакет 2 с пониженным давлением, а также параметрическую раму 1. Дно деревянного каркаса 7 изготовлено из фанеры толщиной 8 мм и к нему прикреплена термосвариваемая пленка 5 с фольгой. В зазор между стеклопакетом и дном рамы уложена тонкостенная гибкая нержавеющая гофрированная труба 4 с размерами 16 мм в виде спирали. Края трубок прикреплены к входным и выходным выступающим трубкам 6.

Математическая модель системы. Термосифонный солнечный водонагреватель. Одноконтурный солнечный водонагреватель с термосифоном состоит из плоского солнечного коллектора, многослойного резервуара для хранения, обратного клапана для предотвращения обратного потока и воды в качестве рабочей жидкости (рисунок 4). Поток в контуре предполагается стационарным. Система анализируется путем разделения термосифона, который разбивают на несколько сегментов, перпендикулярных направлению потока, и используется уравнение Бернулли для несжимаемого потока к каждому сегменту. Скорость потока определяется численным решением результирующего набора уравнений. Применение уравнения Бернулли к любому узлу i в контуре термосифона приводит к следующему выражению для перепада давления:

$$\Delta P_i = \rho_i g \Delta h_i + \rho_i g \Delta h_{Li}. \quad (1)$$

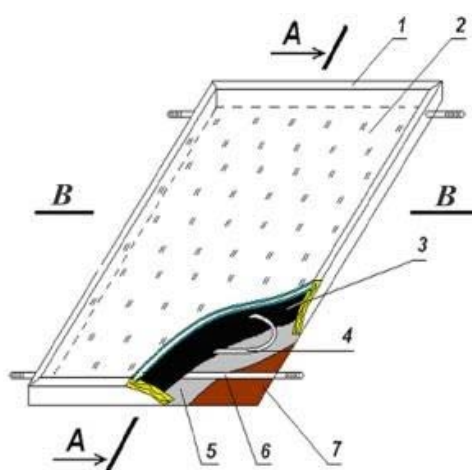


Рисунок 3 – Плоский солнечный коллектор

Данная модель включает численное решение для скорости потока, удовлетворяющей приведенному выше уравнению. Плотность жидкости оценивается при местной температуре с использованием корреляции для воды. Температуры и потери напора на трение в каждом узле плоского солнечного коллектора и труб определяются, как описано ниже. Входные и выходные патрубки коллектора считаются отдельными узлами с незначительной тепловой емкостью:

$$T_{po} = T_a + (T_{pi} - T_a) \exp \left[-\frac{(UA)_p}{mC_p} \right]. \quad (2)$$

Потери напора на трение в трубе определяются как

$$H_p = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2d} + \frac{Kv^2}{2}, \quad (3)$$

где K – коэффициент трения для трубных соединений; f – коэффициент трения определяется следующим образом:

$$f = \frac{64}{Re} \text{ для } Re < 2000; \quad f = 0,032 \text{ для } Re > 2000.$$

Таким образом, падение давления может быть оценено по трубам, коллекторным стоякам, где потерями напора на трение в резервуаре пренебрегают.

Чистый вес жидкости в коллекторе определяется путем деления коллектора на N_x узлов одинакового размера. Тепловые характеристики моделируются в соответствии с уравнением Хоттеля–Виллиера. Температура в средней точке любого узла коллектора, k , равна:

$$T_{ck} = T_a + \frac{I_T F_R (\tau\alpha)}{F_R U_L} + \left(-T_a - \frac{I_T F_R (\tau\alpha)}{F_R U_L} \right) \exp \left[\frac{F' U_L}{G C_p} \left(\frac{k-1}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Параметр коллектора $F' U_L$ рассчитывается из значений $F_R U_L$ и G в условиях испытаний:

$$F'U_L = -G_{test} C_p \ln \left(1 - \frac{F_R U_L}{G_{test} C_p} \right). \quad (5)$$

Общее количество теплоты в системе составляет:

$$Q_u = r_c A (F_R (\tau \alpha) I_T - F_R U_L (T_{Cl} - T_a)), \quad (6)$$

где

$$r_c = \frac{F_{R,use}}{F_{R,test}} = \frac{G(1 - \exp\left(\frac{U_L \dot{F}}{G C_p}\right))}{G_{test}(1 - \exp\left(\frac{U_L F}{G_{test} C_p}\right))}. \quad (7)$$

Математическая модель. Бак-аккумулятор. Средняя температура, подаваемая на нагрузку, составляет:

$$T_d = \frac{V_h T_h + (V_L - V_h) T_1}{V \cdot L}. \quad (8)$$

Потери при хранении в баке-аккумуляторе и проводимость между сегментами оцениваются до того, как температурный профиль будет скорректирован для потоков. Это достигается путем решения следующего дифференциального уравнения для каждого сегмента:

$$\rho C_p V_i \frac{dT_i}{dt} = -(UA)_i (T_i - T_{env}) + (k_s A)_{i-1} \frac{(T_{i-1} - T_i)}{\Delta h_{i-1}} - (k_s A)_i \frac{(T_i - T_{i+1})}{\Delta h_{i+1}}, \quad (9)$$

где Δh_{i-1} – расстояние между центрами сегментов $i-1$ и i ; Δh_{i+1} – расстояние между центрами сегментов i и $i+1$.

Энергия, поступающая в резервуар за счет горячего входного потока, составляет:

$$Q_{in} = m_h C_p (T_h - T_R).$$

Энергия, подаваемая на нагрузку, составляет:

$$Q_{sup} = m_L C_p (T_D - T_L).$$

Результаты и обсуждение. С помощью математической модели и программы MatLab был получен численный анализ для одноконтурного солнечного водонагревателя с термосифоном.

На рисунке 4 показано распределение температуры внутри солнечного коллектора при постоянной температуре нагрева. Как видно на рисунке, между разными местоположениями обнаруживается небольшая разница. Это объясняется тем, что температура хорошо распределена внутри коллектора. Максимальные температуры получаются вдоль центральной линии и принимаются с точки зрения теплопередачи.

Как показано на рисунке 5, максимальная относительная влажность составляет около 80 %, она еще не насыщена. Таким образом, учет принудительного теплообмена внутри коллектора обеспечивается успешно. Кроме того, количество дистиллированной воды остается относительно постоянным после процесса прогрева примерно через пятнадцать минут.

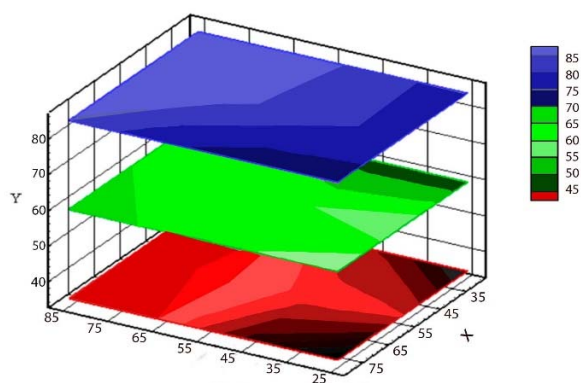


Рисунок 4 – Распределение температуры внутри солнечного коллектора при постоянной температуре нагрева

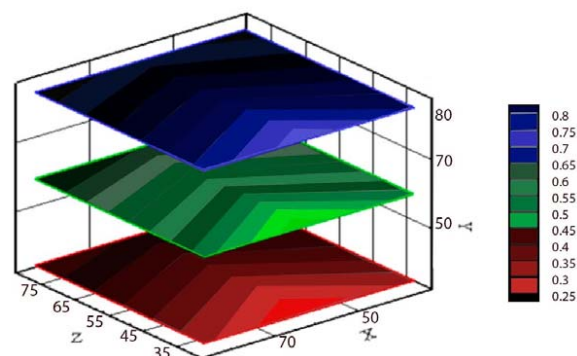


Рисунок 5 – Распределение относительной влажности внутри солнечного коллектора для системы с постоянной температурой нагрева

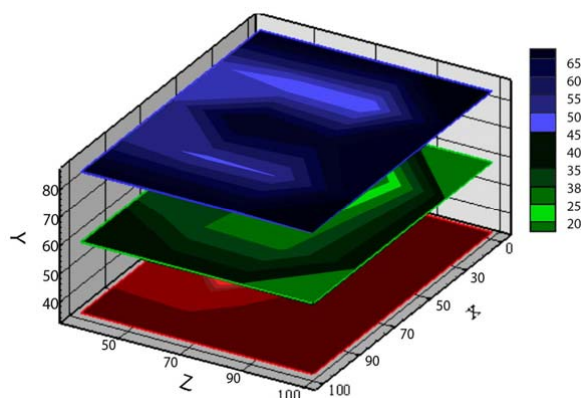


Рисунок 6 – Распределение температуры верхнего уровня внутри солнечного коллектора

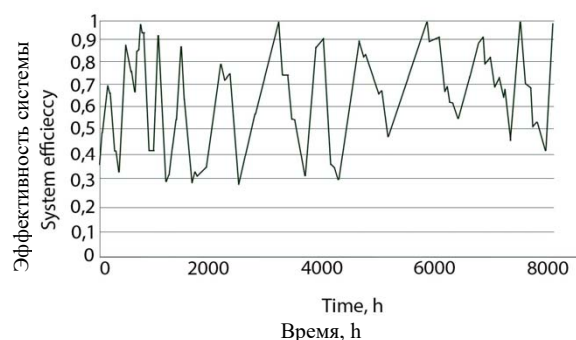


Рисунок 7 – Ежегодное изменение эффективности системы

На рисунке 6 показано распределение температуры верхнего уровня внутри солнечного коллектора. Как видно на рисунке, верхний уровень имеет более высокие температуры, в то время как нижний уровень – более низкие. Также было установлено, что в системе повышается эффективность коллектора, которая приводит к улучшению производительности.

На рисунке 7 представлено годовое изменение эффективности системы. Эффективность системы меняется изо дня в день в зависимости от входного солнечного излучения и температуры окружающей среды. Поэтому у него нет определенной тенденции в течение года и у него нет сезонных показателей.

Его среднее значение не сильно улучшается в летние месяцы из-за более высокой температуры окружающей среды, так как температура окружающей среды не имеет большего значения для производительности системы.

Закключение. Одноконтурная система солнечного теплоснабжения была разработана, установлена и протестирована в Казахстане, в г. Алматы. В качестве источника тепла использован плоский солнечный коллектор с термосифонной циркуляцией. Система может работать непрерывно. Было разработано численное моделирование системы. Прогнозируемые результаты близки с измеренными параметрами. Производительность системы представлялась ежегодно и ежемесячно. Было получено

эмпирическое уравнение с помощью математической модели. В результате тестирования системы было установлено, что использование системы термосифонной циркуляции увеличивает эффективность и КПД работы системы и обеспечивает хорошую конденсацию.

Поступила: 02.08.22; рецензирована: 16.08.22; принята: 18.08.22.

Литература

1. *Jones G.G.* Power from sunshine: a business history of solar energy / G.G. Jones, L. Bouamane // Harvard Business School Operating Paper Series. 2012.
2. *Duffie J.A.* Solar engineering of thermal processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. Wiley, 1991.
3. *Freegah B.* Effect of the shape of connecting pipes on the performance output of a closed-loop hot water solar Thermo-syphon / B. Freegah, T. Asim, D. Albarzenji, S. Pradhan, R. Mishra // In 3rd International Workshop and Congress of Maintenance. 2014.
4. *Manjunath M.S.* Three dimensional numerical analysis of conjugate heat transfer for enhancement of thermal performance using finned tubes in an economical unglazed solar flat plate collector / M.S. Manjunath, K.V. Karanth, N.Y. Sharma // In Proceedings of World Congress on Engineering. 2011. Vol. 3. Pp. 2245–2249.
5. *Shrirao P.N.* Comparative thermal analysis of a flat plate solar collector using aerofoil absorber tube with conventional circular absorber tubes / P.N. Shrirao, S.S. Pente, A.N. Mahure // Int J Basic Appl Res. 7 (12). Pp. 98–107.
6. *Balachandar M.* Experimental investigation of solar flat plate collector with inner grooved copper tube / M. Balachandar, A. Narendran // Int J Eng Res. 2016, 5(9). Pp. 695–700.
7. *Hussein H.M.S.* Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipes cross sections geometries and filling ratios / H.M.S. Hussein, H.H. El-Ghetany, S.A. Nada // Energy Convers Manag. 2006; 47 (11–12). Pp. 1539–1549.
8. *Bute J.V.* Experimental investigation of a solar flat plate collector / J.V. Bute, S.C. Kongre // Int Eng J Res Dev. 2015; 2(5). Pp. 36–46.
9. *Yao K.* Performance evaluation of all-glass evacuated tube solar water heater with twist tape inserts using CFD / K. Yao, T. Li, H. Tao, J. Wei, K. Feng // Energy Procedia. 2015; 70. Pp. 332–339.
10. *Herrero Martin R.* Experimental heat transfer research in enhanced flat-plate solar collectors / Martin R. Herrero, A.G. Pinar, J.P. Garcia // World Renewable Energy Congress. Vol 57. Linköping University Electronic Press; 2011. Pp. 3844–3851.
11. *Khargotra R.* Performance investigation and comparison of different turbulator shapes in solar water heating collector system / R. Khargotra, S. Dhingra, R. Chauhan, T. Singh // AIP Conf Proc. 2018; 1953. Pp. 130029.
12. *Sharma C.* Experimental study on an enhanced performance solar water heater / C. Sharma, R. Karwa // IJCA J. 2014; 1. Pp. 20–25.
13. *Ameen B.K.* Heat transfer enhancement of flat plate solar collectors for water heating in Iraq climatic conditions / B.K. Ameen, M.B. Al-hadithi // Al-Nahrain Univ Coll En J. 2015; 18(2). Pp. 259–272.
14. *Hobbi A.* Experimental study on the effect of heat transfer enhancement devices in flat-plate solar collectors / A. Hobbi, K. Siddiqui // Int J Heat Mass Transfer. 2009; 52(19–20). Pp. 4650–4658.
15. *Kalogirou S.* Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters / S. Kalogirou // Sol. Energy. 2009. № 83. Pp. 39–48.
16. *Norton B.D.* Natural-circulation solar-energy stimulated systems for heating water / B. Norton, S. D. Probert // Appl. Energy. 1982. № 11. P. 167–196.
17. *Tang R.* Nocturnal reverse flow in water-in-glass evacuated tube solar water heaters / R. Tang, Y. Yang // Energy Convers. Manag. 2014. № 80. P. 173–177.
18. *Morrison G.L.* Thermosyphon circulation in solar collectors / G.L. Morrison, D.B.J. Ranatunga // Sol. Energy. 1980. № 24. Pp. 191–198.
19. *Tang R.* Experimental and modeling studies on thermosiphon domestic solar water heaters with flat-plate collectors at clear nights / R. Tang, Y. Cheng, M. Wu, Z. Li, Y. Yu // Energy Convers. Manag. 2010. № 51. Pp. 2548–2556.
20. *Morrison G.L.* Reverse circulation in thermosiphon solar water heaters / G.L. Morrison // Sol. Energy. 1986. № 36. Pp. 377–379.