

Общероссийский математический портал

M. U. Farooq, M. I. Hussain, M. Y. Naz, M. M. Makhlouf, S. Shukrullah, A. Ghaffar, K. Ibrahim, N. M. AbdEl-Salam, Изготовление и исследование характеристик новой конструкции пассивного солнечного водонагревателя термосифонного типа, *TBT*, 2023, том 61, выпуск 3, 465–472

DOI: 10.31857/S0040364423030079

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.207.160.209

14 ноября 2024 г., 14:35:14



## ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПАССИВНОГО СОЛНЕЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ТЕРМОСИФОННОГО ТИПА

© 2023 г. М. У. Фарооq<sup>1</sup> \*, М. И. Хуссейн<sup>2</sup>, М. У. Наз<sup>3</sup> \*\*, М. М. Махлуф<sup>4</sup> \*\*\*,  
С. Шукруллаh<sup>3</sup>, А. Ghaffar<sup>3</sup>, К. Ибраhим<sup>5</sup>, Н. М. АбдEl-Salam<sup>6</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Chemical Engineering,  
East China University of Science and Technology, China

<sup>2</sup>Institute of Powder Metallurgy and Advanced Ceramics, School of Material Science  
and Engineering, University of Science and Technology Beijing, China

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Agriculture, Pakistan

<sup>4</sup>Department of Sciences and Technology, Ranyah University College, Taif University, Saudi Arabia

<sup>5</sup>College of Engineering, Muzahimiyah Branch, King Saud University, Saudi Arabia

<sup>6</sup>Arriyadh Community College, King Saud University, Saudi Arabia

\*E-mail: [ufbajwa@yahoo.com](mailto:ufbajwa@yahoo.com)

\*\*E-mail: [yasin306@uaf.edu.pk](mailto:yasin306@uaf.edu.pk)

\*\*\*E-mail: [m.makhlouf@tu.edu.sa](mailto:m.makhlouf@tu.edu.sa)

Поступила в редакцию 05.01.2017 г.

После доработки 02.06.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

В работе исследуется пример пассивной системы солнечного отопления, в которой нагревается вода для бытовых нужд с помощью прямой солнечной энергии. Разработана пассивная термосифонная система отопления, изготовлена и испытана для исследования тепловых характеристик в полусухом и четырехсезонном климате (район Фейсалабад, Пакистан). В основу конструкции системы отопления положены двухступенчатый накопитель и термосифон с естественной циркуляцией воды. Возможность повышения тепловых характеристик термосифонных систем исследовалась с использованием полукруглого стального коллектора (покрытого медным водонесущим змеевиком), двухступенчатого накопителя воды и боковых зеркальных отражателей. Эксперименты проводились с апреля по июль 2014 г., когда температура окружающей среды составляла примерно от 30 до 45°C. В течение указанного времени температура холодной воды оставалась в пределах от 18 до 25°C. Максимальная температура воды при работе системы в режиме перемежающегося потока оставалась в пределах 48–88°C. В режиме непрерывного потока температура горячей воды держалась между 46 и 78°C. Представленная система позволяет получить воду с температурой как 45–50°C, которая считается пригодной для бытового использования, так и выше.

DOI: 10.31857/S0040364423030079

### ВВЕДЕНИЕ

Существование жизни на Земле полностью зависит от воды и энергии. За последние несколько десятилетий резко возрос спрос на возобновляемые источники энергии [1]. Солнечная энергия является экологически чистым источником возобновляемой энергии, которая продвигается как наиболее перспективная альтернатива традиционным источникам энергии [1–3]. Преобразование солнечного излучения в тепло является простейшим и естественным применением солнечной энергии. Проектирование и разработка первого солнечного водонагревателя для максимального использования тепловой энергии солнечного излучения стали большим прорывом, который по-

мог сохранить баланс между спросом на энергию и предложением [4, 5].

До сих пор нагрев воды с использованием дешевой солнечной энергии оставался предметом исследований. Для небольших семей солнечные водонагреватели разработаны как закрытые и открытые системы отопления и подразделяются на две группы по типу конвекции: естественной и принудительной [6, 7]. Термосифонные системы имеют много преимуществ перед системами с принудительной циркуляцией благодаря высокой надежности, длительному сроку службы, самоходной подаче воды и др. [8–10]. Хотя в литературе описано много попыток разработки модели термосифонных солнечных водонагревателей [11], в боль-

шинстве из них не удалось достичь высокой эффективности нагрева.

Концентрирующий солнечный коллектор на основе линейной линзы Френеля разработан для повышения эффективности солнечных коллекторов по сравнению с обычно используемыми трубчатыми коллекторами [12]. Для проведения анализа в [13] представлены численные и экспериментальные модели коллекторов солнечных тарелок. Результаты показывают, что эффективность теплопередачи тепловых коллекторов хорошо согласуется с экспериментальными данными. Зеркально-симметричная плоскость коллектора вводилась под нужным углом на нижний отражатель для тестирования и проверки ограничений модели в стационарных и квазидинамических условиях [14].

Данные результаты показывают, что эффективность тепловых коллекторов в оптимальном положении как неотъемлемых элементов современных зданий можно повысить за счет использования отражателей солнечного излучения, особенно в декабре и июне [2], что, как ожидается, сократит период демонтажа. В соответствии с данной концепцией также исследованы конфигурация резервуара для хранения горячей воды и влияние объема на эффективность [15]. Несомненно, эти результаты позволяют предположить, что производительность и эффективность солнечного водонагревателя можно повысить за счет увеличения площади резервуара для хранения горячей воды. Однако, несмотря на все эти многообещающие достижения, потребность в разработке эффективных моделей отопления все еще существует. Разные исследователи выявили нестыкующиеся результаты, что связано главным образом с изменением местности и местных атмосферных условий.

Ключевыми параметрами солнечных водонагревателей являются изоляция накопителя и производительность коллектора. Высокоэффективный коллектор и хорошо изолированное хранилище являются признаками прибыльности систем солнечного отопления в течение всего года, особенно в странах с прохладными днями и обильным солнечным светом. Пакистан — одна из тех стран, где большую часть дней в году есть много солнечного света. В районе Фейсалабад в Пакистане полусезонный четырехсезонный климат с температурами от очень низких до высоких и почти 320 солнечных дней в году. Жители Фейсалабада используют плоские солнечные коллекторы, обычно изготовленные из металлических листов с высокой теплопроводностью, помещенные в изолированный короб. Для максимального поглощения лучистой энергии поглощающая поверхность покрывается черным (химически обработанным) хромом для повышения производительности коллектора [16, 17]. Однако такие модели не работают в самые малосолнечные дни зимнего сезона,

когда люди остро нуждаются в горячей воде. Низкая производительность таких моделей коллекторов объясняется геометрическим несовершенством солнечных водонагревательных систем.

## СИСТЕМЫ ТЕРМОСИФОНОВ

По конструкции солнечные водонагреватели подразделяются на активные и пассивные. В неактивных системах для циркуляции воды необходим электрический насос, клапаны и контроллеры, тогда как в пассивных системах не требуется внешней откачки для циркуляции воды. Обычно системы прямого нагрева сложны, дороги, чувствительны к условиям замерзания и могут нагревать воду только до умеренных температур в диапазоне от 50 до 60°C [18, 19]. Тем не менее для преодоления проблем с замерзанием можно внести лишь несколько изменений в конструкцию. В пассивных системах солнечного отопления передача тепла происходит за счет конвекции. Циркуляция воды осуществляется посредством естественного процесса, а не принудительной циркуляции. Такие системы дешевы, просты в использовании и гибки по сравнению с активными системами.

Пассивные системы подразделяются на интегрированные коллекторно-аккумулирующие и термосифонные системы. В интегрированных коллекторно-аккумулирующих обогревателях бак для хранения воды работает так же, как солнечный коллектор. Однако такие обогреватели склонны к тепловым потерям. Эти потери велики в ночное время. Термосифонные системы, как правило, являются более надежными из пассивных систем отопления из-за простоты установки, низких затрат на техническое обслуживание и длительного срока службы [19]. Для анализа характеристик термосифонных солнечных водонагревательных систем уже проведено множество экспериментальных и аналитических исследований на различных пассивных системах [5, 17–19]. В данной работе представлен пример термосифонной системы отопления, основанной на двухступенчатом хранении и естественной термосифонной циркуляции воды. Изготовлена пассивная термосифонная система отопления, и протестированы ее тепловые характеристики при различных методах солнечной теплопередачи. Цель работы состояла в том, чтобы повысить эффективность нагрева термосифонной системы за счет использования круглого коллектора, двойных резервуаров для хранения и отражателей боковых зеркал.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Изменение положения солнечного коллектора таким образом, чтобы он следовал за траекторией движения Солнца, называется “слежением” за Солнцем. Проектирование и эконо-

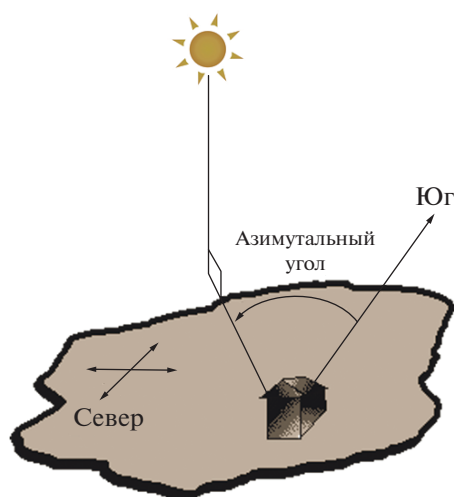


Рис. 1. Схема азимутального угла Солнца.

мическая оценка систем солнечного отопления во многом основаны на интенсивности солнечного излучения в любом месте. Прямая солнечная радиация и ориентация коллекторов рассчитываются по положению Солнца. Информацию о положении Солнца как функции времени, широты и угла наклона можно получить, исходя из основ солнечной геометрии, как показано на рис. 1.

Угол наклона постоянно меняется при вращении Земли вокруг Солнца и из-за наклона Земли вокруг своей оси вращения. Если бы Земля не имела наклона своей оси вращения, угол наклона был бы равен 0°. Однако Земля наклоняется на 23.45°, и соответствующее изменение угла наклона формулируется как [20]

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ (d - 80) \frac{360}{365} \right],$$

где  $\delta$  – угол наклона,  $d$  – день года с 1 января ( $d = 1$ ). Угол наклона равен 0° в дни равноденствия, положительный летом в северном полушарии и отрицательный зимой в северном полушарии. Азимутальный угол поверхности, который представляет собой горизонтальный угол между солнечными лучами и стенкой, можно использовать для расчета азимутального угла Солнца. Угловое расстояние между югом и проекцией луча зрения на Солнце на Земле называется азимутальным углом Солнца, который получается с помощью следующего уравнения:

$$\sin \Psi = \frac{\cos \delta \sin \tau}{\cos \beta},$$

где  $\Psi$  – азимутальный угол Солнца,  $\tau$  – часовой угол,  $\beta$  – высота Солнца. Азимутальный угол поверхности равен нулю, если коллектор обращен на юг. В этом случае интенсивность Солнца на поверхности коллектора рассчитывается как [20, 21]:

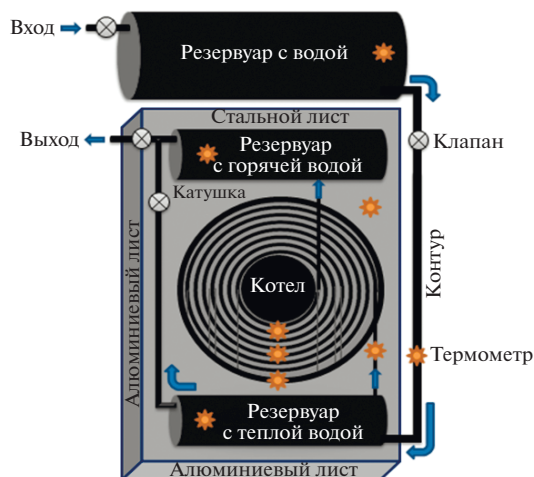


Рис. 2. Подробная схема пассивного термосифона с двухступенчатым хранением воды.

$$I = ae^{-b/\sin \beta} \cos \theta,$$

где  $a, b$  – параметры, зависящие от месяца [20, 22]. Интенсивность солнечной радиации зависит от времени суток, дня года, широты в пункте наблюдения и чистоты атмосферы. Земля совершает один полный оборот на 360° за 24 ч. За 1 ч она перемещается на 360°/24 = 15°. Чтобы отражатели находились на одной линии с солнечными лучами, направление отражателя необходимо менять в зависимости от географического положения и времени года. Земля также влияет на угол благодаря своему суточному вращению на востоке по азимуту примерно 90°, тогда как в полдень она расположена по азимуту почти на 0°.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСИФОНА

Пассивная термосифонная система отопления спроектирована и изготовлена с использованием доступных неспециальных материалов. Подробные характеристики конструкции системы приведены в табл. 1. Круглый котел помещен в герметичную коробку и покрыт спиральными полукруглыми медными трубками, соединенными поперек резервуаров с водой таким образом, чтобы образовать термосифонную систему, как показано на рис. 2. Внешняя коробка изготовлена из листа оргалита толщиной 2.5 см. Прямоугольный ящик имеет длину 2 м, ширину 1 м и высоту 0.5 м. Общий объем деревянного ящика составлял около 25 м³. Суммарная емкость цилиндрических баков в боксе составляла около 56.52 л, тогда как емкость внешнего бака около 729 л.

Зеркальные отражатели использовались на задней стороне верхних и нижних резервуаров для хранения внутри короба, чтобы фокусировать

**Таблица 1.** Материалы, используемые для изготовления пассивного термосифона

Деталь	Количество	Характеристики		
		длина, см	ширина, см	толщина, см
Лист стали	1	150	120	26 размеров
Лист стекла	1	150	120	0.5
Трубка медная	5	150	1.27 (диаметр)	—
Доска	2	150	120	—
Стекловолокно	4 кг	—	—	—
Железная подставка	1	—	—	—
Наклонная железная подставка	1	—	—	—
Резервуары для воды	3	—	—	—
Цифровой таймер	1	—	—	—
Ручной клапан	2	—	—	—
Сопло для пара	1	—	—	—
Односторонний клапан	1	—	—	—
Болты и гайки	50	—	—	—
Термометр	9	—	—	—
Силиконовый клей	2	—	—	—
Лист пеноизоляции	1	150	120	2.5
Круглый железный котел	1	—	30 (диаметр)	0.3
Черная краска	1/2 л	—	—	—
Гибкая трубка	1.25	150	—	1.27 (диаметр)
Резиновая трубка	1.25	300	—	1.27 (диаметр)
Ниппель для бочки	4	—	—	1.27 (диаметр)
Зеркала	4	—	—	—

солнечные лучи на резервуарах для воды. В основании короба использовался стальной отражатель для отражения солнечных лучей. В качестве поглотителя тепла использовался круглый стальной котел диаметром 30 см. Верхняя шероховатая поверхность котла окрашена в черный цвет, чтобы максимизировать поглощение излучения, а боковые стороны котла отполированы серебряным буфером для высокого отражения излучения. Медная труба длиной 150 см и внутренним диаметром 1.27 см использовалась для формирования спирального полукруглого кольца над железным котлом. Такое расположение помогло обеспечить максимальное воздействие солнечной радиации на воду, содержащуюся в трубах. Верхняя сторона спиральной медной трубы соединена с верхним резервуаром для хранения, а нижняя сторона — с нижним резервуаром для хранения в коробе. Медная труба и аккумулятор соединены внутри, образуя термосифон. Медная труба и аккумулятор также окрашены в черный цвет для максимального поглощения тепла.

Девять термометров использовались в разных местах для мониторинга пространственных температур, а именно температуры окружающей сре-

ды, основания, внутреннего пространства, верхнего резервуара, нижнего резервуара, полукруглого резервуара, температуры воды на входе в медную трубу и на выходе. Стеклопанель толщиной 5 мм помещена на деревянную раму и герметично закрыта, чтобы сделать систему водо- и пыленепроницаемой. Весь аппарат установлен на передвижной стальной тележке. Работоспособность установки протестирована в различных климатических условиях с апреля по июль на физическом факультете Сельскохозяйственного университета Фейсалабада, Пакистан.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе протестирована новая конфигурация пассивного солнечного водонагревателя с группой термосифонных эффектов, также известных как гравитационные тепловые трубы. Термосифон относится к методу пассивного теплообмена за счет естественной конвекции, при котором жидкость циркулирует в замкнутой сети без использования обычных насосов. Медные трубы для циркуляции воды выбирались для применения в реальных условиях. Естественный процесс цирку-

ляции воды использован для обеспечения низкой стоимости строительства солнечного водонагревателя. Работа обогревателя основана на принципе излучения черного тела и парниковом эффекте. Солнечные лучи попадают в круглый котел через воздухонепроницаемое стеклянное полотно, накрытое деревянным ящиком. Емкость, окрашенная в темный цвет, поглощает излучение, повышая температуру воды в подающем трубопроводе. Энергия прямого излучения Солнца использовалась для нагрева воды для бытовых нужд. Менее плотная горячая вода по спиральному медному трубопроводу перемещается вверх в верхний накопительный бак внутри короба. Соответствующие параметры процесса изучались в апреле, мае, июне и июле 2014 г. в различных погодных условиях Фейсалабада. Контроль за работой подогревателя осуществлялся каждый день с 8:00 до 18:00.

Представленная конструкция является примером термосифонной системы отопления, основанной на двухступенчатом хранении и естественной термосифонной циркуляции воды. Давление воды во внешнем резервуаре при полной емкости рассчитывалось как

$$P_T = \rho g W H_T, \tag{1}$$

где  $P_T$  — давление в резервуаре для холодной воды,  $g$  — ускорение свободного падения ( $m/c^2$ ),  $\rho$  — плотность холодной воды ( $kg/m^3$ ),  $W$  — вес,  $H_T$  — высота резервуара для воды из земли. Уравнение (1) показывает, что давление воды увеличивается линейно с высотой резервуара для воды. Это увеличение давления внутри бака вызывает увеличение расхода воды через плоский коллектор. Оно предопределяет улучшение производительности системы за счет более быстрой передачи тепла от коллектора к воде, тем самым минимизируя конвекцию и другие потери от коллектора.

Анализ напряжений резервуара для воды приведен в табл. 2. Коэффициент объемного расширения воды определялся при различных температурах. Цилиндрические резервуары для воды, изготовленные из мягкой стали, подвергались внутреннему давлению воды при разных температурах. Замечено, что коэффициент объемного расширения линейно увеличивается с ростом температуры воды. Давление обычно считается равномерно распределенным по внутренней поверхности резервуара. Если толщина стенки равна или меньше  $1/20$  внутреннего диаметра, сосуд называется тонкостенным. В противном случае он считается толстостенным. В данной работе резервуары для воды изготовлены из мягкой стали с пределом текучести 176 МПа. Высота бака с холодной водой от земли составляла 0.9 м, высота бака с горячей водой — 0.2 м, толщина стенок бака — 0.5 мм, т.е. для тонкостенного цилиндра толщина стенки связана с диаметром следующим неравенством  $t \leq (1/20)D_T$ . Это соотношение справедливо как для резервуара с холод-

**Таблица 2.** Коэффициент объемного расширения воды при различных температурах

Температура, °C	$\gamma, 10^{-4} K^{-1}$
5–10	0.53
10–20	1.5
20–40	3.02
40–60	4.58
60–80	5.87

ной водой, так и для резервуара с горячей водой. Следовательно, из-за давления воды на стенке цилиндрического резервуара возникает разрушающее напряжение, также известное как касательное или окружное напряжение. Тангенциальное напряжение для резервуара с холодной водой можно определить по соотношению

$$2\sigma_t H_T t - P_T D_T H_T, \quad \sigma_t = P_T D_T / 2t,$$

где  $\sigma_t$  — касательное напряжение для резервуара с холодной водой,  $t$  — толщина,  $D_T$  — диаметр. То же соотношение применимо и для касательного напряжения  $\sigma_t'$  в баке горячей воды. В данной конструкции нагревателя  $P_T, P_T', \sigma_t, \sigma_t'$  равны примерно 8820 Н/м<sup>2</sup>, 1910.6, 7.9 МПа и 3.8 соответственно. Поскольку резервуары для воды закрыты, учитывалось также продольное напряжение  $\sigma_l$ , обусловленное давлением воды на торцах резервуаров. В предположении равномерного распределения напряжений  $\sigma_l = 9$  МПа.

С учетом рассмотренных выше параметров и типичных метеорологических данных города Фейсалабад исследованы характеристики нагрева воды данной конструкции. Среднемесячный поток солнечной радиации в зависимости от времени рассчитан на основе данных, предоставленных отделением сельскохозяйственной метеорологии кафедры физиологии сельскохозяйственных культур Фейсалабадского сельскохозяйственного университета (рис. 3). Эти данные показывают, что поток солнечной радиации был на пике с 12:00 до 13:00 почти каждый день в году. Ранним утром солнечный поток был почти нулевым до 6 ч утра, после этого он начал линейно увеличиваться со временем и достигал нуля в 20:00. Эти данные показывают, что Солнце светит над городом Фейсалабад  $14 \pm 1$  ч/день. Это делает данный город лучшим местом для установки солнечных батарей в течение всего года.

Эффективность солнечного коллектора описывает взаимосвязь между полезным приростом тепла и поступлением солнечной энергии. Полукруглый змеевик из медной трубы использовался для подачи воды и покрытия котла для теплооб-

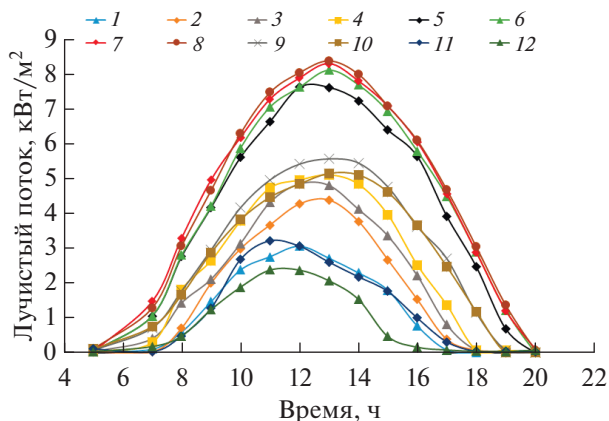


Рис. 3. Излучение Солнца во времени в городе Фейсабад: 1–12 – январь–декабрь.

мена. Между баком и змеевиком происходил обмен тепла, в результате чего горячая вода поднималась в верхний резервуар внутри корпуса. Температура воды повышалась за счет тепловой энергии, поглощенной котлом. Необходимые параметры регистрировались через каждые 30 мин с помощью ртутных термометров. Температура в резервуаре для хранения воды зависела от потока нагретой воды из водонагревателя, вызванного плавучестью. При очень низких скоростях потока, вызванных плавучестью, вдоль резервуара вниз распространялся фронт нагретой воды. Скорость прогрессирования показала зависимость от силы термосифонного эффекта [21–23].

Эффективность данной конструкции солнечного водонагревателя проверялась путем отбора 1500 мл воды каждые 30 мин в дневное время, с 8:00 до 18:00. При работе в прерывистом режиме общий объем воды, отобранной за 10 ч, составил 30 л. Температура холодной воды сохранялась в пределах от 18 до 28°C в течение заявленного времени. На рис. 4 максимальная температура воды сохранялась в пределах от 48 до 88°C при температуре окружающей среды от 32 до 44°C [15–17, 23]. Сравнение температуры окружающей среды и температуры воды, нагретой солнечной энергией, по времени приведено на рис. 5. КПД солнечного водонагревателя с принудительной циркуляцией обычно остается в диапазоне от 50 до 60%, однако солнечный водонагреватель с естественной циркуляцией показывает меньший КПД, примерно в диапазоне от 34 до 38%. Вода при температуре от 45 до 50°C считается пригодной для бытового использования. Представленная конструкция легко достигает температур, даже превышающих те, которые считаются пригодными для бытового использования (рис. 4).

Также измерялась температура воды в непрерывном проточном режиме работы термосифонной системы, как показано на рис. 6. Расход воды

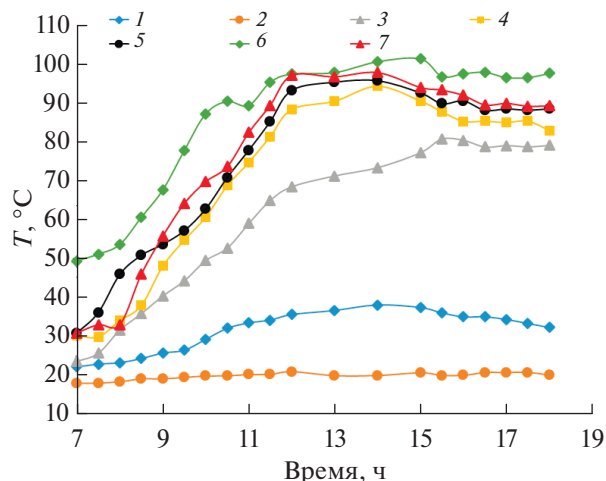


Рис. 4. Изменение температуры во времени в разных точках солнечного водонагревателя при прерывистом потоке воды: 1 – окружающая температура, 2 – холодная вода, 3 – горячая вода, 4 – нижний резервуар, 5 – верхний резервуар, 6 – котел, 7 – основание.

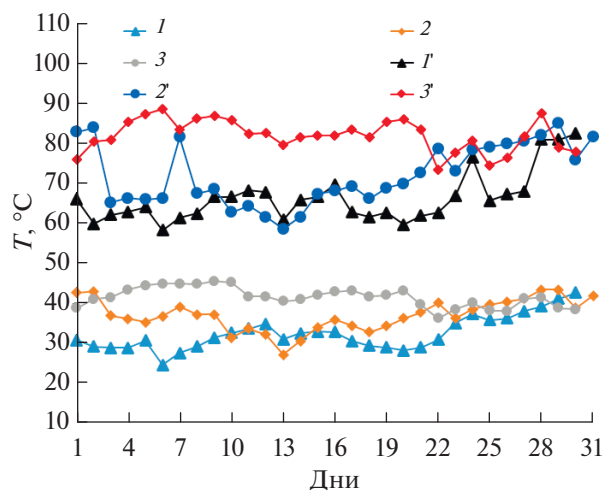
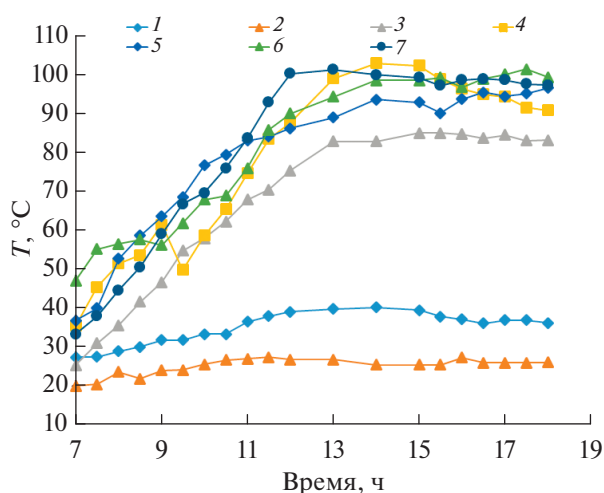


Рис. 5. Сравнение температур окружающей среды ( $T$ – $T'$ ) и горячей воды ( $T$ – $T'$ ) во времени: 1,  $T'$  – в апреле; 2,  $T'$  – мае; 3,  $T'$  – июне.

зафиксирован на уровне 10 л/ч. Максимальная температура 78°C достигалась, когда температура окружающей среды находилась в диапазоне от 36 до 43°C. Высокая тепловая мощность нагревателя объясняется шероховатостью и темнотой поверхности котла. Медные трубки, покрывающие котел, также способствовали максимальному преобразованию энергии в процессе нагрева [24, 25]. Большая часть лучистой энергии, падающей на котел, поглощалась его поверхностью. Отраженная часть лучистой энергии улавливалась медью, несущей воду. Герметичный короб со стеклянной крышкой также минимизировал потери тепла и излучения из деревянного корпуса.





**Рис. 6.** Изменение температуры воды со временем в разных точках водонагревателя при непрерывном течении: 1 — окружающая температура, 2 — холодная вода, 3 — горячая вода, 4 — нижний резервуар, 5 — верхний резервуар, 6 — котел, 7 — основание.

Рабочие характеристики термосифонных солнечных водонагревателей также могут оказывать существенное влияние на эффективность системы, поскольку производительность системы зависит от расхода из коллектора, температуры пластины абсорбера и повышения температуры воды от входа до выхода [24, 25]. Солнечная система нагрева воды на основе листов и труб является более распространенным и подходящим методом нагрева воды для бытового использования [26].

Исследовалась эффективность двухпроходного листового и трубчатого солнечного водонагревателя с ребрами, прикрепленными с различным шагом. Кроме того, настоящие экспериментальные результаты определяют влияние количества воздухопроводов исходя из общего массового расхода. Проанализированные расчеты показали, что более высокая эффективность коллектора возможна за счет оптимизации конструкции и эксплуатационных параметров системы. В данной работе внесены значительные улучшения в конструкцию коллектора для повышения его производительности, а также увеличения энергопотребления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложены результаты проектирования, изготовления и исследования характеристик пассивного солнечного водонагревателя термосифонного типа. Механизм нагрева основан на двухступенчатом хранении и естественной термосифонной циркуляции воды. Эффективность теплового нагрева системы улучшена за счет использования коллектора с шероховатой внешней поверхностью, полукруглой медной крышки змеевика, двухступенчатого накопителя воды и боковых зеркал. Эк-

перименты проводились с апреля по июль 2014 г., когда температура окружающей среды составляла от 32 до 44°C. За заявленное время температура холодной воды сохранялась в пределах от 18 до 28°C. Максимальная температура воды, поддерживаемая системой в прерывистом режиме работы, оставалась в пределах от 48 до 88°C.

В режиме непрерывного потока температура горячей воды достигала от 46 до 78°C. Вода, хранящаяся при температуре от 45 до 50°C, считается пригодной для бытового использования. Однако исследование показало, что представленная конструкция может легко достигать температур, даже превышающих приемлемые для бытового использования воды. Высокая эффективность представленной конструкции нагревателя объясняется шероховатой и темной поверхностью котла и полукруглой формой змеевика. Медный змеевик также обеспечил максимальное преобразование энергии в процессе нагрева. Большая часть лучистой энергии, падающей на котел, поглощалась его окрашенной в черный цвет поверхностью. Отраженная часть лучистой энергии улавливалась медью, несущей воду. Герметичный короб со стеклянной крышкой также помог минимизировать потери тепла и излучения.

Авторы выражают искреннюю признательность за финансовую поддержку Таифскому исследовательскому университету, номер проекта TURSP-2020/165 (Таифский университет, Таиф, Саудовская Аравия).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ziapour B.M., Aghamiri A.* Simulation of an Enhanced Integrated. Collector–Storage Solar Water Heater // *Energy Conv. Manag.* 2014. V. 78. P. 193.
2. *Kostić L.T., Pavlović Z.T.* Optimal Position of Flat Plate Reflectors of Solar Thermal Collector // *Energy Build.* 2012. V. 45. P. 161.
3. *Taheri Y., Ziapour B.M., Alimardani K.* Study of an Efficient Compact Solar Water Heater // *Energy Conv. Manag.* 2013. V. 70. P. 187.
4. *Ong K.S.* A Finite-difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater // *Solar Energy.* 1974. V. 16. P. 137.
5. *Kumaresan G., Sridhar R., Velraj R.* Performance Studies of a Solar Parabolic Trough Collector with a Thermal Energy Storage System // *Energy.* 2012. V. 47. № 1. P. 395.
6. *Hobson P.A., Norton B.* Verified Accurate Performance Simulation Model of Direct Thermosyphon Solar Energy Water Heaters // *Solar Energy Eng.* 1988. V. 110. № 4. P. 282.
7. *Huang B.J., Hsieh C.T.* A Simulation Method for Solar Thermosyphon Collector // *Solar Energy.* 1985. V. 35. № 1. P. 31.
8. *Kalogirou S.* Thermal Performance, Economic, and Environmental Life Cycle Analysis of Thermosyphon Solar Water Heaters // *Solar Energy.* 2009. V. 83. № 1. P. 39.



9. Norton B., Edmonds J.E.J., Kovelos E. Dynamic Simulation of Indirect Thermosyphon Solar Energy Heaters // *Renew. Energy*. 1992. V. 3. P. 283.
10. Prapas D.E., Psimmenos S., Sotiropoulos B.A. On the Beneficial Interconnection of the Thermosiphon DHW Solar Systems // *Appl. Energy*. 1994. V. 49. P. 47.
11. Kalogirou S.A., Panteliou S. Thermosiphon Solar Domestic Water Heating Systems: Long-term Performance Prediction Using Artificial Neural Networks // *Solar Energy*. 2000. V. 69. № 2. P. 163.
12. Zhai H., Dai Y.J., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhang L.Y. Experimental Investigation and Analysis on a Concentrating Solar Collector Using Linear Fresnel Lens // *Energy Conv. Manag.* 2010. V. 51. № 1. P. 48.
13. Tao Y.B., He Y.L., Cui F.Q., Lin C.H. Numerical Study on Coupling Phase Change Heat Transfer Performance of Solar Dish Collector // *Solar Energy*. 2013. V. 90. P. 84.
14. Tanaka H. // *Energy Reports*. 2015. V. 1. P. 80.
15. Hasan A. Thermosyphon Solar Water Heaters: Effect of Storage Tank Volume and Configuration on Efficiency // *Energy Conv. Manag.* 1997. V. 38. № 9. P. 847.
16. Tang R., Cheng Y., Wu M., Li Z., Yu Y. Experimental and Modeling Studies on Thermosiphon Domestic Solar Water Heaters With Flat-plate Collectors at Clear Nights // *Energy Conv. Manag.* 2010. V. 51. № 12. P. 2548.
17. Sakhrieh A., Al-Ghandoor A. Experimental Investigation of the Performance of Five Types of Solar Collectors // *Energy Conv. Manag.* 2013. V. 65. P. 715.
18. Kumar R., Rosen M.A. Thermal Performance of Integrated Collector Storage Solar Water Heater with Corrugated Absorber Surface // *Appl. Therm. Eng.* 2010. V. 30. № 13. P. 1764.
19. Kalogirou S.A. Solar Thermal Collectors and Applications // *Progress Energy Comb. Sci.* 2004. V. 30. № 3. P. 231.
20. Saleh M.A., Kaseb S., El-Refaie M.F. Glass—Azimuth Modification to Reform Direct Solar Heat Gain // *Building and Environment*. 2004. V. 39. № 6. P. 653.
21. Budihardjo I., Morrison G.L. Performance of Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters // *Solar Energy*. 2009. V. 83. № 1. P. 49.
22. Morrison G.L., Budihardjo I., Behnia M. Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters // *Solar Energy*. 2004. V. 76. № 3. P. 135.
23. Huang J., Pu S., Gao W., Que Y. Experimental Investigation on Thermal Performance of Thermosyphon Flat-plate Solar Water Heater With a Mantle Heat Exchanger // *Energy*. 2010. V. 35. № 9. P. 3563.
24. Jaisankar S., Radhakrishnan T.K., Sheeba K.N. Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Forced Circulation Solar Water Heater System Fitted with Helical Twisted Tapes // *Solar Energy*. 2009. V. 83. № 11. P. 1943.
25. Jaisankar S., Radhakrishnan T.K., Sheeba K.N., Suresh S. Experimental Investigation of Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Thermosyphon Solar Water Heater System Fitted With Spacer at the Trailing Edge of Left—Right Twisted Tapes // *Energy Conv. Manag.* 2009. V. 50. № 10. P. 2638.
26. Ho C.D., Chen T.C. Collector Efficiency Improvement of Recyclic Double-pass Sheet-and-tube Solar Water Heaters with Internal Fins Attached // *Renew. Energy*. 2008. V. 33. № 4. P. 655.