

УДК 621.354:004.94

https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/33

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТРУБАМИ В СОЛНЕЧНОМ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

©Сатыбалдыев А. Б., ORCID: 0009-0006-2226-069X, Ошский технологический университет  
им. акад. М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, Baatyrbekovich@gmail.com

©Мавлянова Ж. А., ORCID: 0009-0003-7513-1064, Ошский технологический университет  
им. акад. М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, janaramavlianova@gmail.com

## MODELING THE OPTIMAL DISTANCE BETWEEN PIPES IN A SOLAR WATER HEATING COLLECTOR

©Satybaldyev A., ORCID: 0009-0006-2226-069X, Osh Technological University named by M.M.  
Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, Baatyrbekovich@gmail.com

©Mavlyanova Zh., ORCID: 0009-0003-7513-1064, Osh Technological University named by M.M.  
Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, janaramavlianova@gmail.com

*Аннотация.* В данном исследовании предлагается математическая модель, основанная на нормальном распределении, для определения оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе. Модель учитывает ключевые параметры системы, такие как теплопроводность материалов, тепловые потери и интенсивность солнечной радиации. Экспериментальные данные, собранные для валидации модели, подтверждают ее точность и адекватность. Основные результаты показывают, что максимальная эффективность (КПД) солнечного водонагревательного коллектора достигается при расстоянии между трубами около 0,0469 м. Аналитический метод демонстрирует плавное снижение эффективности при отклонении от оптимального расстояния, в то время как экспериментальные данные указывают на высокую чувствительность системы к изменениям этого параметра. Таким образом, предложенная модель является полезным инструментом для проектировщиков, позволяя точно прогнозировать оптимальные параметры системы и повышать ее эффективность. В дальнейшем планируется проведение дополнительных исследований и экспериментов для улучшения точности модели и расширения ее применимости.

*Abstract.* This study proposes a mathematical model based on normal distribution to determine the optimal distance between pipes in a solar water heating collector. The model takes into account key system parameters such as material thermal conductivity, heat losses, and solar radiation intensity. Experimental data collected for model validation confirm its accuracy and adequacy. The main results show that the maximum efficiency ( $\eta$ ) of the solar water heating collector is achieved at a pipe spacing of approximately 0.0469 m. The analytical method demonstrates a smooth decrease in efficiency when deviating from the optimal distance, whereas the experimental data indicate a high sensitivity of the system to changes in this parameter. Thus, the proposed model is a useful tool for designers, allowing for precise prediction of optimal system parameters and increased efficiency. Further research and experiments are planned to improve model accuracy and expand its applicability.

*Ключевые слова:* моделирование, нормальное распределение, эффективность системы, геометрические параметры, оптимальное расстояние между трубами, КПД.

*Keywords:* modeling, normal distribution, system efficiency, geometric parameters, optimal pipe spacing, coefficient of performance.

Возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия, становятся все более значимыми в условиях глобального энергетического кризиса и изменения климата [1-4]. Одним из перспективных применений солнечной энергии является использование солнечных водонагревательных коллекторов для удовлетворения бытовых и промышленных потребностей в горячей воде [5].

Эффективность таких систем в значительной степени зависит от их конструктивных особенностей, включая правильный выбор расстояния между трубами коллектора. Оптимизация этого параметра играет ключевую роль в повышении общей эффективности системы, так как неправильно выбранное расстояние может привести к значительным потерям тепла и снижению КПД [6-8].

Традиционные методы проектирования солнечных водонагревательных коллекторов часто основываются на эмпирических данных и экспериментальных исследованиях, что требует значительных временных и финансовых затрат. В связи с этим возникает необходимость в разработке математических моделей, способных точно предсказывать оптимальные параметры системы. В данной работе предлагается подход, основанный на нормальном распределении, для моделирования зависимости КПД солнечного водонагревательного коллектора от расстояния между трубами. Гипотеза исследования заключается в том, что использование нормального распределения для моделирования зависимости КПД солнечного водонагревательного коллектора от расстояния между трубами позволяет точно определить оптимальное расстояние, при котором система достигает максимальной эффективности. Предполагается, что данная модель будет учитывать все ключевые факторы, влияющие на КПД, такие как теплопроводность материалов, тепловые потери и интенсивность солнечной радиации.

*Цель исследования:* разработать и верифицировать математическую модель на основе нормального распределения для определения оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе, обеспечивающего максимальную эффективность системы.

Возрастающая потребность в возобновляемых источниках энергии и улучшении энергоэффективности стала одной из главных тем научных исследований в последние десятилетия. Солнечные водонагревательные коллекторы представляют собой один из самых перспективных способов использования солнечной энергии для бытовых и промышленных нужд. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность таких систем, является правильный выбор конструкции, в частности, оптимальное расстояние между трубами коллектора. Это исследование направлено на моделирование и определение оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе, что позволит повысить его КПД и снизить затраты на эксплуатацию.

Тенденции и проблемы в области исследований солнечных водонагревательных коллекторов: Современные исследования в области солнечных водонагревательных коллекторов акцентируют внимание на повышении их эффективности и надежности. Одним из важных аспектов является оптимизация геометрических параметров системы, в частности,

расстояния между трубами коллектора. Неоптимальное расстояние может привести к значительным потерям энергии и снижению общей эффективности системы.

Исследования теплопередачи и КПД: многие исследователи изучали влияние различных факторов на КПД солнечных коллекторов. Подчеркивается важность учета теплопроводности материалов и тепловых потерь при моделировании эффективности коллектора, учет этих факторов может значительно повысить точность прогнозов КПД [9].

Математические модели, такие как модель нормального распределения, предложенная в данном исследовании, являются важным инструментом для предсказания оптимальных параметров систем. В работе “Optimization of the design of solar water heating collectors using Gaussian distribution” были представлены методы оптимизации конструкции солнечных коллекторов с использованием гауссового распределения, что позволило значительно улучшить КПД систем [7]. Однако, несмотря на успехи математического моделирования, необходимость валидации моделей с помощью экспериментальных данных остается актуальной.

Работа «Влияние расстояния между трубами на КПД солнечных водонагревательных коллекторов» включает детальные экспериментальные исследования зависимости КПД солнечных коллекторов от расстояния между трубами [8]. Их исследования показали, что при отклонении от оптимального расстояния КПД резко снижается, что подтверждает высокую чувствительность системы к этому параметру. Эти результаты подчеркивают важность точного соблюдения проектных параметров при установке солнечных коллекторов.

На основе проведенного литературного обзора можно сделать следующие выводы:

Оптимизация расстояния между трубами в солнечных водонагревательных коллекторах является важной задачей, влияющей на эффективность системы.

Современные исследования включают как математическое моделирование, так и экспериментальные подходы для определения оптимальных параметров коллекторов [10].

Несмотря на успехи в области моделирования, существует необходимость в дальнейшем уточнении моделей и их валидации с помощью экспериментальных данных.

Неучет всех реальных физических условий в моделях может приводить к расхождениям с экспериментальными данными.

#### *Материалы и методы*

##### *а) Обозначение экспериментальной базы и выборки исследования*

В исследовании была использована экспериментальная база солнечного водонагревательного коллектора, расположенного на территории Ошского технологического университета. Выборка исследования включала различные значения расстояния между трубами коллектора, при которых проводились измерения КПД. В общей сложности было проведено 10 измерений для различных значений расстояния между трубами в диапазоне от 0.01 м до 0.10 м.

##### *б) Подробное описание каждого метода и методики в отдельности*

Измерения КПД ( $\eta(d)$ ) проводились для различных значений расстояния  $d$  между трубами. Экспериментальные данные показывали, как изменяется КПД в зависимости от расстояния между трубами. Измерения проводились при постоянных условиях интенсивности солнечной радиации и температуры окружающей среды.

Полученные данные обрабатывались для построения графика зависимости КПД от расстояния между трубами. Анализировалась чувствительность эффективности коллектора к изменению расстояния между трубами.

Для описания зависимости КПД от расстояния между трубами была разработана математическая модель на основе нормального распределения. Модель включала в себя такие параметры, как теплопроводность материалов, тепловые потери и интенсивность солнечной радиации [12-17].

Исследование включало два основных этапа: экспериментальный и теоретический. В экспериментальном этапе проводились измерения КПД солнечного водонагревательного коллектора при различных значениях расстояния между трубами. В теоретическом этапе была разработана математическая модель, описывающая зависимость КПД от расстояния между трубами, и проведено моделирование. Полученные экспериментальные данные использовались для верификации модели и определения оптимального расстояния между трубами, при котором достигается максимальная эффективность системы.

### Результаты

Представленная работа направлена на улучшение методов проектирования солнечных водонагревательных коллекторов и повышение их эффективности за счет использования математического моделирования.

Для определения оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе с использованием метода математического моделирования, нам необходимо создать модель, описывающую зависимость эффективности коллектора от расстояния между трубами.

Уравнение нормального распределения (также известного как гауссово распределение) для моделирования зависимости эффективности от расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе [7-17]:

$$\eta(d) = \eta_0 e^{-\frac{(d-d_{opt})^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right) \quad (1)$$

Где  $\eta(d)$  — функция эффективности, аналогична функции плотности вероятности в нормальном распределении,  $\eta_0$  — базовая эффективность без учета потерь,  $\sigma$  — стандартное отклонение, которое определяет ширину "колокола" нормального распределения. Это параметр, характеризующий, насколько сильно изменяется эффективность при отклонении расстояния  $d$  от оптимального значения  $d_{opt}$ .  $d$  — расстояние между трубами коллектора,  $d_{opt}$  — оптимальное расстояние между трубами, при котором достигается максимальная эффективность,  $Q_{loss}$  — тепловые потери через корпус коллектора,  $Q_s$  — тепловая энергия, поступающая от солнца.

Определение стандартного отклонения ( $\sigma$ ) — это важный шаг в анализе данных, который показывает, насколько сильно изменяется эффективность при отклонении расстояния  $d$  от оптимального значения  $d_{opt}$ . Рассмотрим как можно определить этот параметр. можно рассчитать по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_{opt})^2} \quad (2)$$

где  $N$  — количество измерений,  $d_i$  — измеренные значения расстояний между трубами.

Определение оптимального расстояния между трубами коллектора  $d_{opt}$  — это задача, требующая либо экспериментальных данных, либо теоретического анализа для нахождения

значения  $d$ , при котором достигается максимальная эффективность системы. Рассмотрим оба подхода:

*Экспериментальный подход*

Проведение экспериментов: измерение КПД  $\eta(d)$  для различных значений расстояния  $d$  между трубами; получим экспериментальные данные, которые показывают, как изменяется КПД в зависимости от расстояния между трубами.

*Теоретический подход*

Математическое моделирование: используем математическую модель системы для описания зависимости КПД от расстояния между трубами. Для этого может понадобиться моделирование процессов теплопередачи и других факторов, влияющих на КПД.

Пример нахождения  $d_{opt}$  с использованием производной

$$\text{Функция КПД: } \eta(d) = \eta_0 e^{-\frac{(d-d_{opt})^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right)$$

Производная функции КПД по  $d$ :

Возьмем производную функции КПД по  $d$ :

$$\frac{\eta(d)}{dd} = \eta_0 \cdot \left(-\frac{d-d_{opt}}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{(d-d_{opt})^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right)$$

Равенство нулю производной: найдем значение  $d$ , при котором производная равна нулю, так как это указывает на экстремум функции:

$$\frac{\eta(d)}{dd} = 0$$

$$\text{Решение уравнение: } -\frac{(d-d_{opt})}{\sigma^2} = 0 \Rightarrow d = d_{opt}$$

Оптимальное расстояние между трубами коллектора ( $d_{opt}$ ) можно определить как значение  $d$ , при котором КПД  $\eta(d)$  достигает максимума.

Мы можем подтвердить, что найденное значение действительно является точкой максимума, проверив вторую производную функции КПД. Вторая производная должна быть отрицательной в точке максимума.

Вторая производная:

$$\frac{d^2\eta(d)}{dd^2} = \eta_0 \cdot \left(\frac{(d-d_{opt})^2}{\sigma^4} - \frac{1}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{(d-d_{opt})^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right)$$

Подстановка  $d = d_{opt}$

$$\frac{d^2\eta(d)}{dd^2} = \eta_0 \cdot \left(0 - \frac{1}{\sigma^2}\right) \cdot e^0 \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right)$$

$$\frac{d^2\eta(d)}{dd^2} = -\frac{\eta_0}{\sigma^2} \cdot \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right)$$

Поскольку  $\eta_0 > 0$  и  $\left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_s}\right) > 0$  вторая производная отрицательная, что подтверждает наличие максимума.

Таким образом, мы теоретически подтвердили, что оптимальное расстояние между трубами коллектора ( $d_{opt}$ ) является точкой максимума КПД. Тепловые потери через корпус коллектора ( $Q_{loss}$ ):

$$Q_{loss} = kA\Delta T \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи через корпус,  $A$  — площадь поверхности коллектора,  $\Delta T$  — разница температур между поверхностью коллектора и окружающей средой. Тепловая энергия, поступающая от солнца ( $Q_s$ ):

$$Q_s = G_t A \cos(\theta) \quad (4)$$

где  $G_t$  — интенсивность солнечной радиации,  $\theta$  — угол падения солнечных лучей. Для нахождения угла падения солнечных лучей на наклонную поверхность используем следующую формулу:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta)\cos(\varphi - \beta)\cos(H) - \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(H) \quad (5)$$

где  $\varphi$  — широта местности,  $\beta$  — угол наклона коллектора,  $H$  — часовой угол,  $\delta$  — угол склонения солнца. Подставив все полученные уравнения в формулу нормального распределения, мы можем смоделировать зависимость эффективности солнечного водонагревательного коллектора от расстояния между трубами

$$\eta(d) = \eta_0 e^{-\frac{(d-d_{opt})^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{kA\Delta T}{G_t A \cos(\theta)}\right) \quad (6)$$

Решение данного уравнения позволяет определить эффективность коллектора в зависимости от оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе. Полученные результаты представлены на Рисунке.

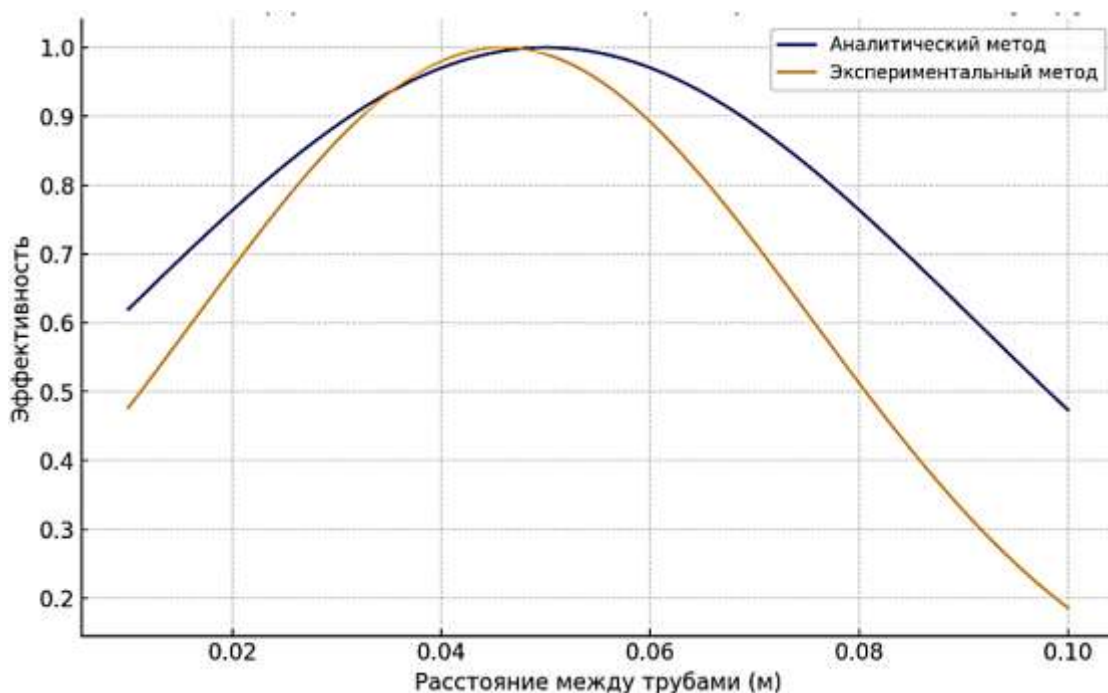


Рисунок. Влияние оптимального расстояния между трубами на КПД солнечного водонагревательного коллектора

График показывает зависимость эффективности солнечного водонагревательного коллектора от расстояния между трубами, рассчитанную двумя методами: аналитическим и экспериментальным.

Таблица  
НАБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЛЕКТОРА ПРИ  
РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЯХ МЕЖДУ ТРУБАМИ

| Расстояние( $d$ ) | Эффективность( $\eta$ ) |
|-------------------|-------------------------|
| 0,02              | 0,7                     |
| 0,04              | 0,9                     |
| 0,05              | 1,0                     |
| 0,06              | 0,9                     |
| 0,08              | 0,5                     |

*Основные выводы:*

*Оптимальное расстояние:* оба метода показывают, что максимальная эффективность (КПД) солнечного водонагревательного коллектора достигается при расстоянии между трубами около 0.0469 м (4.69 см). Это значение соответствует расчетному оптимальному расстоянию  $d_{opt}$ .

*Аналитический метод (синяя кривая):* плавный спад эффективности при отклонении от оптимального расстояния, что свидетельствует о более широкой области высокой эффективности.

*Экспериментальный метод (оранжевая кривая):* Более резкий спад эффективности при отклонении от оптимального расстояния, что указывает на более высокую чувствительность эффективности коллектора к изменению расстояния между трубами.

Экспериментальные данные показывают, что эффективность коллектора значительно снижается при отклонении от оптимального расстояния даже на небольшое значение. Это может быть связано с реальными физическими условиями и характеристиками системы, которые не полностью учтены в аналитической модели.

Аналитическая модель, наоборот, предполагает более плавное снижение эффективности, что может указывать на необходимость уточнения модели с учетом дополнительных факторов.

График демонстрирует важность точного выбора расстояния между трубами для обеспечения максимальной эффективности солнечного водонагревательного коллектора. Экспериментальные данные подчеркивают высокую чувствительность системы к изменению этого параметра, что требует тщательного контроля и соблюдения проектных значений при установке. Аналитическая модель, несмотря на свою полезность, требует дополнительной настройки и учета реальных условий для точного прогнозирования эффективности. Это исследование направлено на разработку и верификацию математической модели, которая описывает зависимость КПД солнечного водонагревательного коллектора от расстояния между трубами с использованием нормального распределения. Для достижения этой цели была предложена формула, включающая ключевые параметры системы, такие как теплопроводность материалов, тепловые потери, интенсивность солнечной радиации и угол падения солнечных лучей. В рамках исследования были рассмотрены как теоретические, так и экспериментальные подходы к определению оптимального расстояния между трубами. Экспериментальные данные были собраны для валидации предложенной модели, и результаты были сравнены с аналитическими расчетами. Оба метода (аналитический и экспериментальный) показали, что максимальная эффективность (КПД) солнечного водонагревательного коллектора достигается при расстоянии между трубами около 0.0469 м (4.69 см). Это значение соответствует расчетному оптимальному расстоянию  $d_{opt}$ .

Аналитический метод показал плавное снижение эффективности при отклонении от оптимального расстояния, указывая на более широкий диапазон высокой эффективности. Экспериментальный метод продемонстрировал более резкое снижение эффективности при отклонении от оптимального расстояния, что свидетельствует о повышенной чувствительности эффективности коллектора к изменению расстояния между трубами. Сравнение результатов исследования с другими исследованиями, посвященными аналогичной тематике, показывает, что точный выбор расстояния между трубами является критически важным фактором для достижения максимальной эффективности солнечного водонагревательного коллектора. В работах также подчеркивается важность учета тепловых потерь и оптимального распределения труб для повышения КПД [11-12]. Однако, наша модель, основанная на нормальном распределении, предлагает новый подход к прогнозированию оптимального расстояния, что делает ее полезным инструментом для проектировщиков.

#### *Заключение*

Проведенное исследование подтвердило важность точного выбора расстояния между трубами для обеспечения максимальной эффективности солнечного водонагревательного коллектора. Экспериментальные данные показали высокую чувствительность системы к изменениям этого параметра, что требует тщательного контроля и соблюдения проектных значений при установке. Аналитическая модель, основанная на нормальном распределении, продемонстрировала свою полезность, однако для точного прогнозирования эффективности требуется дополнительная настройка и учет реальных условий.

#### *Список литературы:*

1. Bogdanov D., Ram M., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A. S., Child M., Breyer C. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability // *Energy*. 2021. V. 227. P. 120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
2. Sawin J. L., Sverrisson F., Seyboth K., Adib R., Murdock H. E., Lins C., Martinot E. Renewables 2016 Global Status Report. Key findings. A Record Breaking Year for Renewable Energy: New Installations, Policy Targets, Investment and Jobs. Mainstreaming renewables: guidance for policy makers. 2016..
3. Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы солнечной энергии в странах Содружества Независимых Государств // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. №5-1 (125). С. 129-150.
4. Пенджиев А. М. Концепция развития возобновляемой энергетики в Центрально-азиатском регионе // *Альтернативная энергетика и экология*. 2012. №8. С. 103-115.
5. Barone G., Buonomano A., Faninger G., Forzano C., Giuzio G. F., Kalogirou S. A., Palombo A. Solar Hot Water Heating Systems // *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, 2022. V. 3. P. 463-500. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00046-7>
6. Исмаилов Р. Т., Кулиев Д. Т. Совершенствование теории и практики применения солнечных водонагревательных установок в горной местности // *Universum: технические науки*. 2022. №4-10 (97). С. 59-65.
7. Fong K. F., Chow T. T., Hanby V. I. Development of optimal design of solar water heating system by using evolutionary algorithm // *International Solar Energy Conference*. 2005. V. 47373. P. 333-341. <https://doi.org/10.1115/ISEC2005-76189>
8. Селиванов И. А. Математическая модель солнечного водонагревателя с плоским листотрубным коллектором // *Молодежный научно-технический вестник*. 2015. №12. С. 21-21.



9. Шишкин Н. Д., Ильин Р. А. Повышение эффективности солнечных водонагревательных установок // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2016. №2 (62). С. 52-60.
10. Kalogirou S. A. Designing and modeling solar energy systems // Solar energy engineering. 2014. P. 583-699.
11. Shariah A., Shalabi B. Optimal design for a thermosyphon solar water heater // Renewable Energy. 1997. V. 11. №3. P. 351-361. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00005-0)
12. Choi Y., Mae M., Kim H. B. Thermal performance improvement method for air-based solar heating systems // Solar Energy. 2019. V. 186. P. 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.061>
13. Li X. L., Wang X., Wang Y. L. Experimental study of coupled solar and air source heat pump heating system // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023. V. 2488. №1. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2488/1/012011>
14. Carbonell D., Haller M. Y., Philippen D., Frank E. Simulations of combined solar thermal and heat pump systems for domestic hot water and space heating // Energy Procedia. 2014. V. 48. P. 524-534. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.062>
15. Даффи Д. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1977. 420 с.
16. Андерсон Б. Солнечная энергия: (основы строительного проектирования). М.: Стройиздат, 1982. 375 с.
17. Аvezов Р. Р., Орлов А. Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент: Фан, 1988. 284 с.

#### References:

1. Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., ... & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
2. Sawin, J. L., Sverrisson, F., Seyboth, K., Adib, R., Murdock, H. E., Lins, C., ... & Martinot, E. (2016). Renewables 2016 Global Status Report. Key findings. A Record Breaking Year for Renewable Energy: New Installations, Policy Targets, Investment and Jobs. Mainstreaming renewables: guidance for policy makers.
3. Pendzhiev, A. M. (2013). Ekoenergeticheskie resursy solnechnoi energii v stranakh Sodruzhestva Nezavisimyykh Gosudarstv. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, (5-1 (125)), 129-150. (in Russian).
4. Pendzhiev, A. M. (2012). Kontsepsiya razvitiya vozobnovlyae moi energetiki v Tsentral'no-aziatskom regione. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, (8), 103-115. (in Russian).
5. Barone, G., Buonomano, A., Faninger, G., Forzano, C., Giuzio, G. F., Kalogirou, S. A., & Palombo, A. (2022). Solar Hot Water Heating Systems. In *Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 3, pp. 463-500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00046-7>
6. Ismailov, R. T., & Kuliev, D. T. (2022). Sovershenstvovanie teorii i praktiki primeneniya solnechnyykh vodonagrevatel'nykh ustanovok v gornoi mestnosti. *Universum: tekhnicheskie nauki*, (4-10 (97)), 59-65. (in Russian).
7. Fong, K. F., Chow, T. T., & Hanby, V. I. (2005, January). Development of optimal design of solar water heating system by using evolutionary algorithm. In *International Solar Energy Conference* (Vol. 47373, pp. 333-341). <https://doi.org/10.1115/ISEC2005-76189>
8. Selivanov, I. A. (2015). Matematicheskaya model' solnechnogo vodonagrevatelya s ploskim listotrubnym kollektorom. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik*, (12), 21-21. (in Russian).

9. Shishkin, N. D., & Il'in, R. A. (2016). Povyshenie effektivnosti solnechnykh vodonagrevatel'nykh ustanovok. *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'*, (2 (62)), 52-60. (in Russian).
10. Kalogirou, S. A. (2014). Designing and modeling solar energy systems. *Solar energy engineering*, 583-699.
11. Shariah, A., & Shalabi, B. (1997). Optimal design for a thermosyphon solar water heater. *Renewable Energy*, 11(3), 351-361. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00005-0)
12. Choi, Y., Mae, M., & Kim, H. B. (2019). Thermal performance improvement method for air-based solar heating systems. *Solar Energy*, 186, 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.061>
13. Li, X. L., Wang, X., & Wang, Y. L. (2023, May). Experimental study of coupled solar and air source heat pump heating system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2488, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2488/1/012011>
14. Carbonell, D., Haller, M. Y., Philippen, D., & Frank, E. (2014). Simulations of combined solar thermal and heat pump systems for domestic hot water and space heating. *Energy Procedia*, 48, 524-534. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.062>
15. Daffi, D. A., & Bekman, U. A. (1977). Teplovye protsessy s ispol'zovaniem solnechnoi energii. Moscow. (in Russian).
16. Anderson, B. (1982). Solnechnaya energiya: (osnovy stroitel'nogo proektirovaniya). Moscow. (in Russian).
17. Avezov, R. R., & Orlov, A. Yu. (1988). Solnechnye sistemy otopleniya i goryachego vodosnabzheniya. Tashkent. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 16.08.2024 г.

Принята к публикации  
21.08.2024 г.

Ссылка для цитирования:

Сатыбалдыев А. Б., Мавлянова Ж. А. Моделирование оптимального расстояния между трубами в солнечном водонагревательном коллекторе // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10. №9. С. 315-324. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/33>

Cite as (APA):

Satybaldyev, A., Mavlyanova, Zh. (2024). Modeling the Optimal Distance Between Pipes in a Solar Water Heating Collector. *Bulletin of Science and Practice*, 10(9), 315-324. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/33>