

TEHNIKA FANLARI / TECHNICAL SCIENCE

УДК 631.358

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПЛОСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА УСТРОЙСТВА ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НЕПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ СУШИЛКИ И ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ

Мирзаев Шавкат Мустакимович¹ – профессор, доктор технических наук, e-mail: mirzayevshavkat53@mail.ru

Кодиров Жобир Рузимаатович¹ - преподаватель, e-mail: godirov.jobir@mail.ru
Хакимова Сабина Шамсиддинова² - докторант, e-mail: hakimovasabina1986@gmail.com

¹Бухарский государственный университет. г. Бухара, Республика Узбекистан.

²Бухарский инженерно-технологический институт. г. Бухара, Республика Узбекистан.

Аннотация. На сегодняшний день солнечная сушка плодов является востребованной, так как считается одной из самых экономически выгодных решений проблемы обеспечения продовольствием населения. Но устройства, применяемые при таком способе сохранения продуктов, имеют ряд особенных недостатков, решению которых посвящена данная статья. В статье предлагается разработанный авторами метод определения геометрических размеров солнечного плоского коллектора: длина – L , ширина – H прозрачной поверхности, толщина – B и линейные размеры (по отношению площади прозрачной поверхности – $S_{\text{проз}}$ окон для входящего воздуха в коллектор и выходящего воздуха из коллектора – $R_{\text{окно}}$. Разработан метод расчета, по которому установлена эмпирическая формула определения теплового КПД коллектора, экспериментально выявлен в диапазоне потребляемой солнечной энергии и под естественной циркуляцией воздуха. Установлен режим работы коллектора с разницей температур воздуха между входящего и выходящего окон ($2 \div 8$) °C, также установлен режим работы коллектора с разницей температур воздуха между поверхностью аккумулятора и в окружающей среде. Установлены уравнения для определения энергии и мощности, передаваемые воздуху от коллектора. В результате получены данные необходимые для разработки усовершенствованной солнечной сушилки с естественной конвекцией косвенного действия.

Ключевые слова: солнечный плоский коллектор, высушенные продукты, аккумулятор тепла, галечник, стеклянная крышка, солнечно-нагреваемый коллектор.

Abstract. Today, solar drying of fruits is in demand, as it is considered one of the most economically beneficial solutions to the problem of providing food to the population. But the devices used with this method of preserving products have a number of special advantages, the solution of which is devoted to this article. The article proposes a method developed by the authors for determining the geometric dimensions of a solar flat collector: length - L , width - H of the transparent surface, thickness - B and linear dimensions (in relation to the area of the transparent surface - S_{proz} windows for incoming air into the collector and outgoing air from the collector - R_{window}). A calculation method has been developed, according to which an empirical formula for determining the thermal efficiency of a collector is established, experimentally revealed in the range of consumed solar energy and under natural air circulation. The collector operation mode is set with the air temperature difference between the inlet and outlet windows ($2 \div 8$) °C, the collector operation mode is also set with the air temperature difference between the battery surface and in the environment. Established equations for determining the energy and power transferred to the air from the collector. As a result, the data necessary for the development of an improved indirect solar dryer with natural convection were obtained.

Keywords: *solar flat collector, dried products, heat accumulator, gravel, glass cover, solar-heated collector.*

Введение. В настоящее время потребность в сушеной сельскохозяйственной продукции в мире значительно возросла. Почти 80% от общего количества эти продукты выращиваются мелкими фермерами. Эти фермеры используют обычные средства сушки (открытое солнце). Сушка на открытом солнце по-прежнему самый распространенный и самый устаревший метод сохранения сельскохозяйственных продуктов. У данного типа есть много недостатков, такие как проблемы загрязнения, неравномерный тип сушки и неконтролируемое содержание влаги в конечных продуктах, вызывающее ухудшение качества продукции и т.п. В целях преодоления проблем сушки на открытом солнце были разработаны солнечные сушилки [1,19,20].

Несмотря на то, что солнечное излучение используется для сушки сельскохозяйственных продуктов, всё еще не получило широкого коммерческого распространения из-за высоких инвестиционных затрат, трудоемких операций и т.п. Возникает ряд практических трудностей, которые необходимо преодолеть. Интенсивность падающего солнечного излучения в течении дня непостоянна, поэтому для сохранения пикового значения солнечной энергии требуется аккумуляция тепла, т.е. вспомогательный источник энергии, который необходим после захода солнца и во время непогоды. Кроме того, солнечное излучение имеет очень низкую плотность энергии, что требует большую площадь поверхности коллектора для сбора солнечного излучения. Из-за чего значительно возрастают инвестиционные затраты [2,3].

Солнечное излучение проходит через прозрачную поверхность коллектора, поступает на поверхность материала аккумулятора и нагревает его. Атмосферный воздух, который входит через окно в камеру плоского коллектора сушилки, касаясь поверхности нагретого материала аккумулятора, получает от него тепло и нагревается, превращается в теплый воздух, который минуя выпускное окно коллектора, поступает в сушильный шкаф.

В таком случае солнечно-нагреваемый коллектор можно считать «Солнечным воздушнонагревательным генератором тепла» [2]. Системы сушки сельскохозяйственных продуктов с использованием солнечной энергии оцениваются сочетанием площади солнечных коллекторов и потребностей в энергии, отвечающих требованиям нагрузки [4,5].

В работе авторов [6] сообщено об основной конструкции и общих характеристиках солнечной мультисушилки непрямого типа для сельскохозяйственных продуктов. Это исследование показало, что высококачественные высушенные продукты могут быть получены за счет увеличения кажущейся скорости сушки и эффективности сушки.

Целью данной статьи является разработка и исследование физических и тепловых характеристик плоского солнечного коллектора с естественной циркуляцией воздуха.

Основная часть. Известно, что солнечные сушилки, работающие в режиме косвенного нагрева, обеспечиваются теплом, которое получают от солнечных воздушнонагревательных коллекторов.

Наклонный плоский солнечный воздушный коллектор состоит из стеклянной крышки 1, теплоизолированного корпуса камеры коллектора 2, аккумулятора тепла (галечники) 3, окно для входа воздуха 4 в коллектор и окно для выхода нагретого воздуха 5 из коллектора (Рис.1).

Солнечный коллектор изготовлен из стальной пластины толщиной 1,5 мм в форме параллелепипеда (горячий ящик), наружные поверхности дна и боковых стенок его изолированы от потери тепла в окружающую среду. Чтобы предотвратить скольжение твердых аккумуляторов, во внутренней части дна коллектора установлены (приварены) несколько (16 штук) металлических ступеней. Между ступеньками размещается аккумулятор тепла - галечники.

Метод определения рациональных размеров коллектора. Солнечный коллектор с одной стороны покрыт прозрачным листом стекла толщиной 5мм (крышка). Известно, что рациональные геометрические размеры параллелепипеда с основанием четырехугольником можно считать тогда, когда параллелепипед поменяется с кубом. Геометрические размеры параллелепипеда обозначим следующим образом: L – высота (прозрачной поверхности), H – ширина (прозрачной поверхности), B – толщина (камеры коллектора). В случае, когда параллелепипед меняется с кубом, то его размеры должны принимать следующие значения: $L=H=B$. Отсюда можно установить соотношение $L/H \geq 1$.

Для определения рационального размера толщины B коллектора основываемся на концепции: солнечное излучение, проходя через прозрачную поверхность, поступает на зачерненную (покрашена черной порошковой матовой краской, у которой степень черноты $k \approx 0,96$) поверхность аккумулятора и поглощается.

В таком случае объем коллектора можно представить, как полностью абсолютного черного тела, а толщину плоского коллектора можно принимать как линейный размер отверстия, по которому излучение поступает в полость модели абсолютного черного тела. На основе такого соображения примем: если площадь прозрачной поверхности коллектора – $S_{\text{проз.}}$, тогда размер толщины коллектора B устанавливаем следующим соотношением [7,8,9,10]:

$$B \approx \frac{\sqrt{S_{\text{проз.}}}}{10}, \text{ при } k = 04 \text{ или } B \approx \frac{\sqrt{S_{\text{проз.}}}}{16}, \text{ при } k = 1. \tag{1}$$



Рис.1. Принципиальная схема солнечного коллектора, предназначенного для косвенной осушки материалов: h – высота щели для выхода тёплого воздуха, L – длина коллектора, φ – угол наклонной поверхности дна коллектора по отношению горизонта, T_1, T_2, T_3, T_c, T_a – точки измерения температур, S_{in} – , S_o – окна (щели) для входящего и выходящего воздуха

Для осуществления естественной циркуляции воздуха внутри камеры плоского коллектора у боковых стенок (нижней и верхней стенок) коллектора устанавливаем окна. Геометрические размеры их $R_{\text{окно.}}$ выбираем на основе представленной высшей концепции:

$$R_{\text{окно.}} \approx \frac{\sqrt{S_{\text{окно.}}}}{10} \div \frac{\sqrt{S_{\text{окно.}}}}{16}. \tag{2}$$

Таким образом, геометрические размеры коллектора выбраны $100\text{мм} \times 50\text{мм} \times 15\text{мм}$, а линейный размер окна – $R = 7.5\text{см} \div 4.5\text{см}$, площади поверхности окон – $S_{\text{окно.}} = 0,0064\text{см}^2 \div 0,0144\text{см}^2$.

Измерения. Для измерения температур выбран прибор типа ТМ-4, термопары были закреплены в точках: для измерения температуры на входе T_a и на выходе коллектора T_c ,

наружной T_1 и внутренней поверхностях T_2 прозрачной пластины-стекла и на поверхности материала аккумулятора-галечника T_3 (Рис1.). Диапазон измерения прибора $-30 \div 50^\circ C$, точность измерения составляло $0,1^\circ C$ ($> -20^\circ C$).

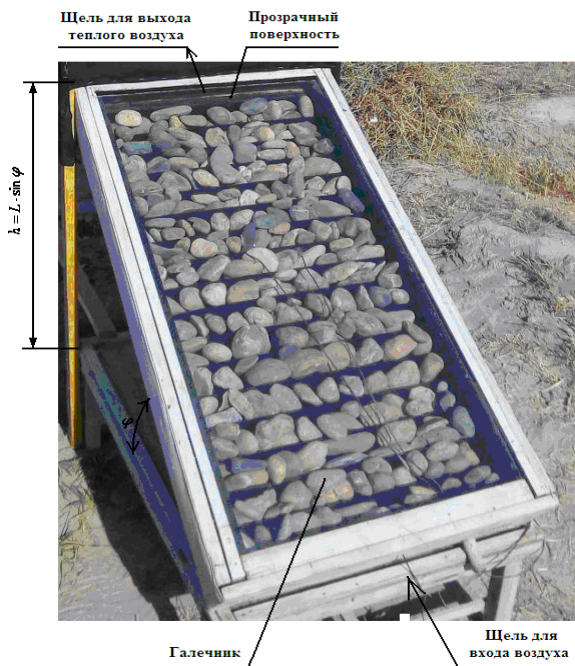


Рис.2. Естественное изображение солнечного коллектора, предназначенного для сушильного шкафа: h – высота щели для выхода тёплого воздуха, L – длина коллектора, ϕ – угол наклонной поверхности дна коллектора по отношению к горизонту.

Для измерения плотности воздуха во входном и выходном окнах установлены приборы влагомер с электронным экраном НСW: в открытом воздухе - $-50 \div 70^\circ C$ интервал температуры; относительно влажном интервале $20\% \div 99\%$. Используя id-диаграммой, выявлены значения плотности воздуха в точках изменения.

Солнечная радиация измерена актинометром с гальванометром типа $M80$. Чувствительность прибора $< 7 \cdot 10^{-7} A/дел$, класс точности "5". Солнечный коллектор экспериментально был исследован в естественных условиях (Рис.2) с 9 июня по 14 июня 2021 года. Эксперименты проводились в Бухарском государственном университете, Республики Узбекистан.

Экспериментально наблюдались важные параметры в точках измерения: изменения температур; плотность воздуха во входящем и выходящем окнах коллектора; прямая солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность. Параметры регистрировались через каждый час в сутки.

Методика выбора массы аккумулятора тепла. Известно, что особенный процесс сушки происходит в трёх стадиях: влажная, гигроскопическая и равновесная. Для того, чтобы устранить процесс гигроскопичности сушаемых плодов, в ночное время сушильный шкаф должен обеспечиваться аккумулярованной тепловой энергией. Такая энергия должна поддержать процесс сушки, т.е. не дать сушаемому продукту адсорбировать влагу. В качестве аккумулятора тепла нами выбраны гольши.

Выбираем среднечасовое количество тепловой энергии для хранения в гольши до начала ночного времени в размере $Q_t = 51,2 \frac{Bm}{M^2}$, тогда количество энергии, требуемой в течении времени резервирования, 10 часов (до начала сияния солнца на следующий день) определим следующим образом:

$$Q_s = Q_t \cdot t_s, \tag{3}$$

где, t_s – время резервирования при хранении 10 часов (время солнечного сияния в сутки).

Массу гольша, используемую в качестве аккумулятора тепла, определим по формуле [10]:

$$m = V_r \cdot \rho_r = \frac{Q_s}{C_a \cdot \Delta T} = \frac{Q_t \cdot t_s \cdot A_a}{C_a \cdot \Delta T} = \frac{51,2 \frac{Bm}{M^2} \cdot 10 \cdot 3600 c \cdot 0,5 M^2}{2,3 \frac{Дж}{кг \cdot K} \cdot 10^3 \cdot 10 K} \approx 40 кг \cdot \tag{4}$$

Для установления массы гольша аккумулятора тепла выбираем следующие исходные данные: $t_s = 10 \text{ час}$; C_a – удельная теплоёмкость галечника, $2,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\Delta \bar{T}$ – изменение средней температуры воздуха в камере коллектора; $\approx 10^\circ \text{C}$; m – масса аккумулятора, кг ; V – объём аккумулятора, м^3 ; ρ – плотность аккумулятора, $(0,02 \div 0,5) \text{ кг/м}^3$; A_a – прозрачная поверхность коллектора, $0,5 \text{ м}^2$.

Чтобы выяснить соответствие экспериментальных результатов для солнечного плоского коллектора и интерпретировать их рациональным образом, решили провести статистический анализ [7,11,12,13,14,15,16,17,18]. Для примера статистического анализа использовали параметры температур воздуха у входящего (T_a) и выходящего (T_c) окна коллектора, т.е. разница температуры воздуха между входящим и выходящим окон коллектора ($\Delta T = T_c - T_a$). На рис 3. представлены графики зависимости температур в точках измерения.

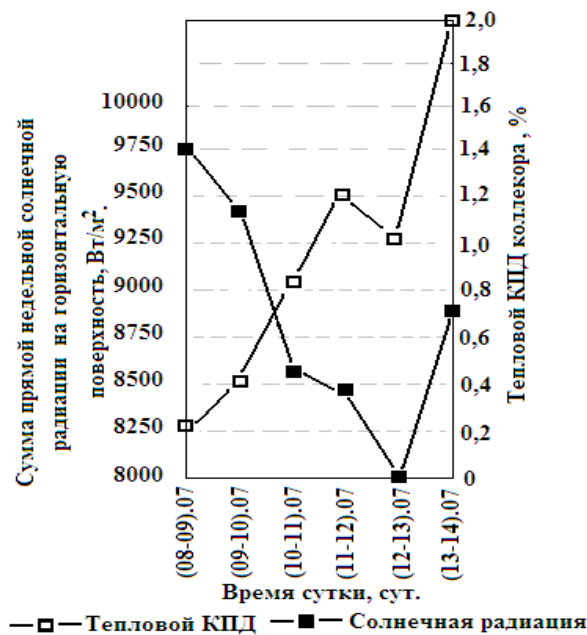


Рис.3. Изменение суммы среднесуточной солнечной радиации и теплового КПД в суточный интервал времени

Результаты и обсуждение. Для экспериментальных исследований в естественных условиях разработан солнечный плоский коллектор, который изображен на рис.2.

На рисунке 3 представлены экспериментальные данные наблюдений суммы прямой часовой и среднесуточной солнечной радиации на горизонт, также график изменения суммы среднесуточной солнечной радиации от 09.07.2021 до 14.07.2021.

На рисунке 4 представлены данные и график изменения среднесуточной температуры в различных точках (элементах) измерений коллектора, действующего в диапазоне потребляемой солнечной энергии $(400 \div 1320) \text{ Вт/м}^2$ и под естественной циркуляцией воздуха.

Из характера кривых представленные на рисунке 4 следует, что разница температур воздуха между поверхностью аккумулятора и воздуха у входящего окна, или воздуха окружающей среды достигает $(20 \div 35)^\circ \text{C}$.

Установлен режим работы коллектора, в котором выявлена разница температур воздуха у входящего и выходящего окна $(2 \div 8)^\circ \text{C}$. Тогда температурный напор такого значения следует за собой естественное движение воздуха.

В тоже время следует разница плотности воздуха у окна входящего воздуха в коллектор и у окна выходящего воздуха из коллектора. Разница плотности достигает $(0,02 \pm 0,5)$ кг/м³, это значения не особо влияет на величину тепловой КПД и энергию, передаваемую на воздух внутри камеры коллектора.

На рисунке 5 представлены данные наблюдения и график изменения плотности воздуха у входа в коллектор и выхода из коллектора. Плотность нагретого под действием солнечного излучения воздуха в камере коллектора, меньше, чем плотность более холодного, соответственно, относительное давление (воздуха) столба у него меньше. Такое изменение приводит к разности давления воздуха у входа в коллектор и у выхода из коллектора.

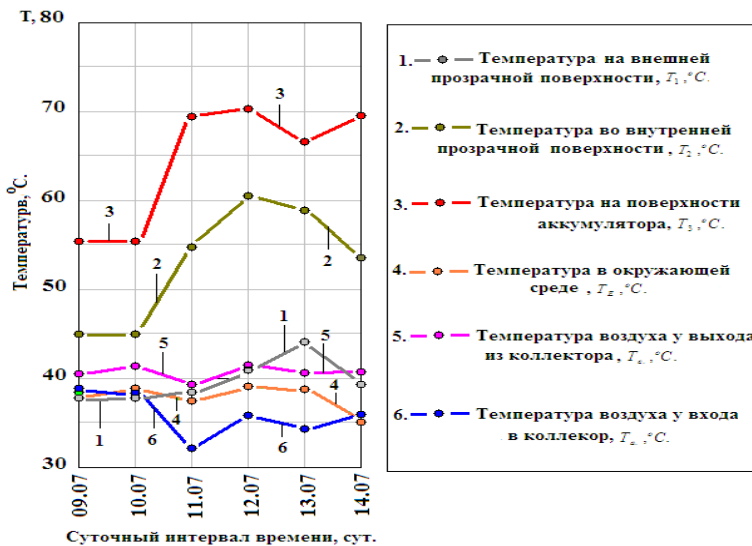


Рис.4. График суточного изменения температур

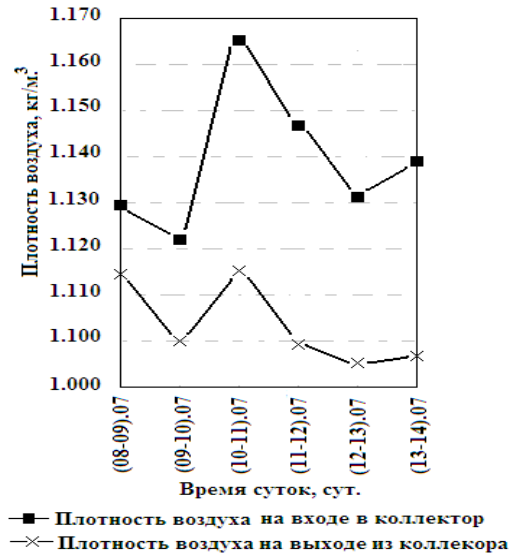


Рис.5. Изменение плотности воздуха в течении суток

По формуле (4) видно, что энергия, которую коллектор должен передать воздуху, непосредственно прямо зависит от разницы температур воздуха между поверхностью аккумулятора тепла и входящего окна. По характеру кривых (рис.4) следует, что разница между показанными температур повышается в период 11.07.21 – 14.07.21. сутки, именно эти сутки количество энергии, передаваемой на воздух, увеличивается от 2 до 5 раз.

Используя данные по рисункам 4 и 5 определен тепловой КПД, предлагаемого солнечного плоского коллектора. Из характера изменения кривых, которые представлены на рисунке 3 следует, что с уменьшением количества поступающей солнечной радиации на прозрачную поверхность тепловой КПД коллектора увеличивается. При достижении солнечной радиации минимального значения, тепловой КПД принимает максимальное значение.

Для вычисления теплового КПД использованы следующие исходные данные. Также за исходные данные приняты следующие величины:

$$C_{pa} = 1,019 \frac{кДж}{кг \cdot К}; A_{c.t.} = 0,5 м^2; A_{s.s.} = 0,45 м^2; L = 1 м; \varphi = 38; \sin 38 = 0,616; h = 0,6157 м.$$

Плотность воздуха у входа в коллектор – ρ_w и у выхода из коллектора – ρ_c ; температура воздуха у входа – T_c в коллектор и выхода из коллектора – T_a . Изменение суммы среднесуточной солнечной радиации – I .

Выводы. Таким образом, разработан метод определения геометрических размеров солнечного плоского коллектора: длина - L , ширина - H прозрачной поверхности, толщина - B и линейные размеры (по отношению площади прозрачной поверхности - $S_{проз}$ окон для

входящего воздуха в коллектор и выходящего воздуха из коллектора- $R_{окно}$. Установлены:

$$L/H \geq 1; B \approx \sqrt{S_{проз.}}/10 \text{ и } B \approx \sqrt{S_{проз.}}/16.$$

Разработан метод расчета, по которому установлена эмпирическая формула определения тепловой КПД коллектора и экспериментально выявлена в диапазоне потребляемой солнечной энергии $(400 \div 1320) \text{ Вт}/\text{м}^2$ и под естественной циркуляцией воздуха, $\eta = (0,4 \div 3,8)\%$.

Установлен режим работы коллектора с разницей температур воздуха между входящего и выходящего окон $(2 \div 8)^\circ \text{C}$, также установлен режим работы коллектора с разницей температур воздуха между поверхностью аккумулятора и окружающей средой $(20 \div 35)^\circ \text{C}$.

Установлены уравнения для определения энергии и мощности, передаваемые воздуху от коллектора, выявлены $(0,748 \div 6,362) \text{ МДж}/\text{сут.}$ и $(0,748 \div 6,362) \text{ Вт}$.

Литература

1. Sharma V, Colangelo A, Spagna G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer // Energy Convers Manage 1993; 34: 293–308.
2. Sharma V, Colangelo A, Spagna G. Investigation of an indirect type multi-shelf solar fruit and vegetable dryer // Renew Energy 1992; 2:577–86.
3. Абсолютно чёрное тело // Большой энциклопедический политехнический словарь. - 2004.
4. Дж.П.Холман, «Экспериментальные методы для инженеров», Тата Мак Гроу-Хил, Нью-Дели (Индия). 2008 г.
5. Ю.Н.Якубов. «Аккумуляция энергии солнечного излучения», Ташкент. Издательство «ФАН», 1981. стр.104.
6. Sh. Mirzaev, J. Kodirov, S.I. Khamraev. Method for determining the sizes of structural elements and semi-empirical formula of thermal characteristics of solar dryers. // APEC-V-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 1070 (2022) 012021.
7. Кодиров Ж.Р., Хакимова С.Ш., Мирзаев Ш.М. Анализ характеристик параболического и параболоцилиндрического концентраторов, сравнение данных, полученные на них. // Вестник ТашИИТ №2 2019, С. 193-197.
8. Кодиров Ж.Р., Мавлонов У.М., Хакимова С.Ш. Аналитический обзор характеристик параболического и параболоцилиндрического концентраторов // Наука, техника и образование 2021. № 2 (77). С 15-19.
9. Мирзаев Ш.М., Кодиров Ж.Р., Ибрагимов С.С. Способ и методы определения форм и размеров элементов солнечной сушилки. //Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2021;(25-27):30-39. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2021.09.030-039>.
10. Mirzaev Sh.M., Kodirov J.R., Ibragimov S.S. (2021) "Method and methods for determining shapes and sizes of solar dryer elements," // Scientific-technical journal: Vol. 4: Iss. 4, Article 11.
11. Mirzayev Sh.M., Qodirov J.R., Hakimov B. Quyosh qurilmalarida o'riklarni quritish uchun mo'ljallangan quyosh qurilmasini yaratish va uning ishlash rejimini tadqiq qilish. // Involta Scientific Journal, 1(5). 2022/4/29. 371–379.
12. Sh. Mirzaev, J. Kodirov, B Khakimov. Research of apricot drying process in solar dryers. // Harvard Educational and Scientific Review. 11.10.2021. Vol. 1 No. 1. Pp 20-27.

-
13. J. Kodirov, S. Khakimova. Determination of the size and amount of energy incident on the reflective surface of a parabolic cylinder concentrator. // Asian Journal of Research (2020). № 1-3.
 14. J.R. Kodirov., Sh. M. Mirzaev., S.Sh. Khakimova. Methodology for determining geometric parameters of advanced solar dryer elements. // Thematic Journal of Applied Sciences (ISSN 2277-3037). 2022/2/9. Volume 6 Issue 1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5993063>.
 15. Кодиров Ж.Р., Мавлонов У.М., Хакимова С.Ш. Конструкция параболического и параболослиндрического концентраторов и анализ полученных результатов. // Thematic Journal of Applied Sciences (ISSN 2277-3037). 2022/2/9. Volume 6 Issue 1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5992991>.
 16. Uzakov G.N., Khamraev S.I., Khuzhakulov S.M. Rural house heat supply system based on solar energy // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030 (2021) 012167 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012167
 17. Khamraev S. I, Ibragimov U. Kh Kamolov B.I. Removal of hydrodynamic lesions of a heated floor with a solar collector // APEC-V-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1070(2022) 012018 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1070/1/012018.
 18. Sh Mirzaev, J Kodirov, S I Khamraev. Method for determining the sizes of structural elements and semi-empirical formula of thermal characteristics of solar dryers// APEC-V-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1070(2022) 012021 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1070/1/012021.
 19. Khuzhakulov S.M., Khamraev S.I., Mamedova D.N., Kamolov B.I. Study the characteristics of heat energy in the autonomic solar system // PalArch's Journal of Archaeology of Egypt / Egyptology (2020). PJAEE 17(6),. ISSN 1567-214x pp 3240 – 3252 (Scopus,Q3)
 20. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-412-421>