

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192>

УДК 621.311.21

## Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии

Ж. Э. Сафаров<sup>1)</sup>, Ш. А. Султанова<sup>1)</sup>, Г. Т. Дадаев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова  
(Ташкент, Республика Узбекистан)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Рассмотрен процесс нагрева обезвоживаемого объекта в инфракрасной гелио-сушильной установке (с парафином на дне) с аккумуляцией солнечной энергии. Для решения этой задачи принято, что теплоемкость парафина превосходит теплоемкость обезвоживаемого объекта. На верхний слой падают ИК-лучи, а также происходит теплообмен за счет тепломассообмена с поверхностным воздухом, находящимся между металлической пластиной и обезвоживаемым объектом. Приведены уравнения теплопроводности для обезвоживаемого объекта, определена его связь на границе раздела фаз с помощью равенства температур и потока теплоты. Для экспозиции перегрева с периодом 6,5 ч время прохождения границы раздела фаз, согласно закону движения границы расплавления (затвердения), определяли по формуле  $\xi = \alpha\sqrt{6,5} \text{ ч} \cong 12 \text{ ч}$ . Получена оптимальная толщина слоя аккумулирующего парафина. На основе теоретических исследований проводились опыты по изучению температурного поля различных теплоаккумулирующих материалов в лаборатории Ташкентского государственного технического университета. Выявлено, что из всех теплоаккумулирующих материалов парафин обладает лучшей способностью удерживания теплоты при его толщине 2–4 см. Сконструирован оптимальный вариант гелиоаккумуляционной сушильной установки с аккумулятором теплоты – парафином. В частности, 2–4 см слоя парафина массой 50 кг с соответствующей плоской поверхностью в пересчете на удельную теплоемкость испарения – это 2400 кДж/кг. Удельное значение плавления парафина (150 кДж/кг) позволяет дополнительно испарять 5,8 л влаги при сушке объектов. Предлагаемая гелиоаккумуляционная сушильная установка может использоваться для обезвоживания лекарственных трав.

**Ключевые слова:** гелиоаккумуляционная сушильная установка, теплопроводность, температура, парафин, гелиоприемник

**Для цитирования:** Сафаров, Ж. Э. Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии / Ж. Э. Сафаров, Ш. А. Султанова, Г. Т. Дадаев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192>

---

### Адрес для переписки

Сафаров Жасур Эсиргапович  
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова  
ул. Университетская, 2,  
100095, г. Ташкент, Республика Узбекистан  
Тел.: +998 71 227-15-18  
[jasursafarov@yahoo.com](mailto:jasursafarov@yahoo.com)

### Address for correspondence

Safarov Jasur E.  
Tashkent State Technical University  
named after Islam Karimov  
2, University str.,  
100095, Tashkent, Republic of Uzbekistan  
Tel.: +998 71 227-15-18  
[jasursafarov@yahoo.com](mailto:jasursafarov@yahoo.com)

---

## Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation

J. E. Safarov<sup>1)</sup>, Sh. A. Sultanova<sup>1)</sup>, G. T. Dadayev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

**Abstract.** The process of heating a dewatered object in an infrared solar drying plant (with paraffin on the bottom) with solar energy storage is considered. To solve this problem, it is assumed that the heat capacity of paraffin exceeds the heat capacity of the dehydrated object. Infrared rays fall on the upper layer, and heat exchange takes place due to heat and mass transfer with the surface air located between the metal plate and the object to be dehydrated. The equations of thermal conductivity for a dewatered object are given, its relationship at the phase interface is determined using the equality of temperature and heat flow. For an exposure of overheating with a period of 6.5 h, the time of passage of the phase boundary in accordance with the law of motion of the spreading (hardening), was determined according to the formula of  $\xi = \alpha\sqrt{6.5} \text{ h} \cong 12 \text{ h}$ .

The optimal thickness of the accumulating paraffin layer was ascertained. On the basis of the theoretical studies, experiments were conducted to study the temperature field of various heat-accumulating materials in the laboratory of Tashkent State Technical University. It was found that of all heat-accumulating materials, paraffin has the best heat retention ability when its thickness is of 2–4 cm. The optimal variant of a solar accumulator drying plant with a heat accumulator, viz. paraffin has been designed. In particular, 2–4 cm of paraffin layer with a mass of 50 kg with a corresponding flat surface in terms of specific heat of evaporation is 2400 kJ/kg. The specific melting value of paraffin (150 kJ/kg) allows additional evaporation of 5.8 l of moisture when drying objects. The proposed solar accumulator drying plant can be used for dehydration of medicinal herbs.

**Keywords:** solar accumulating drying equipment, thermal conductivity, temperature, paraffin, solar collector

**For citation:** Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T. (2020) Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192> (in Russian)

### Введение

Каждый год почти  $5 \cdot 10^{24}$  Дж энергии обеспечивается Солнцем и попадает на поверхность Земли. Это количество в 10000 раз превышает фактическое годовое потребление энергии во всем мире. Среди различных доступных устойчивых энергетических ресурсов солнечная энергия в последнее время превратилась в наиболее важный востребованный источник возобновляемой энергии благодаря круглогодичному изобилию солнечного света, а также технологическим достижениям в захвате световой энергии [1–8].

### Принципы теплового аккумулярования

Одним из возможных мероприятий, позволяющих в различных областях отраслей экономики более эффективно использовать тепловую энергию, является аккумулярование теплоты посредством применения различ-

ных теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) и аккумуляторов теплоты (АТ) всевозможных конструкций [9–14].

В работе М. Ю. Ошчепкова [15] изучены накопительные солнечные водонагреватели (НСВ). В [16–19] рассмотрены НСВ из полимерных и композиционных материалов, учитывая основную тенденцию рынка, направленную на снижение стоимости НСВ при обеспечении высоких тепловых характеристик [20]. В процессе разработки НСВ были оптимизированы его параметры, определены основные проектные решения [21] и проведено численное моделирование рабочих процессов [22, 23]. В настоящее время совершенствуются конструкции, проводятся исследования материалов, технологий и теплотехники для подготовки установок к серийному производству [24, 25].

Конструкции накопительных емкостей НСВ очень разнообразны. Существенное влияние на эффективность таких нагревателей оказывает температурное расслоение в резервуаре, возникающее как при нагреве за счет поглощения солнечного излучения, так и при подаче холодной воды под слой горячей жидкости, когда нагретую воду берут из верхней части резервуара [26]. Суточный график потребления горячей воды очень неравномерен и имеет резкие пики потребления, в течение которых оно достигает нескольких литров в минуту, а объем забираемой воды – десятков литров [27], что составляет значительную часть объема аккумуляторного бака. Для таких пиковых нагрузок рассмотрены гидродинамические процессы в резервуаре: влияние скорости потока, угол установки резервуара, относительное положение давления и приема соединительной трубы от степени стратификации в секционированном баке нагревателя. В [15] смоделирован накопительный бак НСВ с апертурой  $1,2 \cdot 1,3 \text{ м}^2$  и объемом 100 л, разделенный на семь секций для прочности поглощающих панелей.

### Теплоаккумулирующие материалы и их классификация

Важнейшими характеристиками системы теплового аккумулирования энергии являются [9]:

- емкость на единицу объема или веса;
- рабочий интервал температур, т. е. температуры теплоносителя на входе и выходе из системы;
- способы подачи и отбора теплоты и соответствующие перепады температур;
- температурная стратификация в аккумуляторе;
- мощность, требуемая для подвода и отвода теплоты;
- объемы контейнеров, баков или других конструктивных элементов, связанных с системой аккумулирования;
- средства регулирования тепловых потерь аккумулятора;
- стоимость изготовления и эксплуатации.

Выбор аккумуляторов теплоты зависит от уровня температур, масштаба установки и длительности аккумулирования теплоты.

По уровню температуры аккумулирования АТ подразделяются на три группы: низко- ( $35\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), средне- ( $100\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и высоко-температурные ( $t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). По использованию теплоты они могут быть классифицированы как мелко- (для децентрализованных потребителей) и крупномасштабные (для крупных централизованных систем). По длительности хранения аккумуляторы теплоты подразделяются на кратко- (1–2 сут.), среднесрочные (до 1 мес.) и межсезонные (до полугода) [9].

Уровень температуры, масштаб аккумулирующей установки и необходимая длительность хранения теплоты определяют требования к конструкции аккумуляторов, выбору теплоаккумулирующих материалов. Причем чем выше температура аккумулирования, тем сложнее обеспечить большую длительность аккумулирования из-за существующих тепловых потерь, а значит, увеличивает возможную длительность хранения запасенной энергии. Поэтому от желаемой длительности хранения теплоты зависят вид, конструкция и стоимость тепловых аккумуляторов.

Теплоаккумулирующие материалы различаются в зависимости от класса материала, способа накопления и отдачи теплоты, цикличности работы (рис. 1) [28].

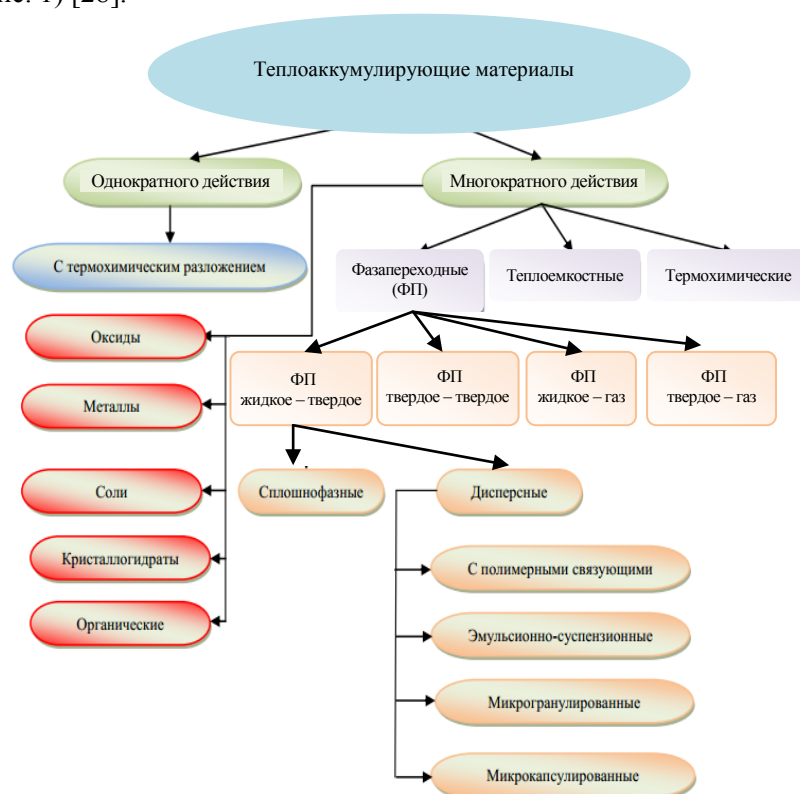


Рис. 1. Схема классификации теплоаккумулирующих материалов

Fig. 1. Classification scheme of heat storage materials

Немаловажное значение при разработке аккумулирующей установки имеет выбор теплоаккумулирующих материалов. Поэтому оптимизация характеристик ТАМ вызывает большой интерес во всем мире [9, 29].

В [30] рассмотрено моделирование tandemного тонкопленочного солнечного элемента на основе  $\text{CuInSe}_2$ . Предложена оригинальная структура тонкопленочного солнечного элемента при tandemном соединении фотоэлектрического преобразователя, состоящего из слоев  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CdS}$  и термоэлектрического, выполненного на основе  $\text{CuInSe}_2$ .

Сегодня разработка гелиоаккумуляционных сушильных установок, работающих на солнечной энергии с применением теплоаккумулирующего носителя, считается актуальной задачей. Высокая стоимость топливно-энергетических ресурсов заставляет решать вопросы использования возобновляемых источников энергии в комплексе с автономными средствами для сушки продуктов лесного и сельского хозяйства [31].

В г. Фреено (Калифорния, США) работает сушильная установка площадью  $1951 \text{ м}^2$ , где в теплоаккумуляторе содержится 700 т щебня, который может отдавать запасенную теплоту для сушки в течение 24 ч. Комбинированная система удовлетворяет 80 % потребностей в теплоте. В США западным региональным центром в Беркли разрабатывалась также гелиоаккумуляционная установка с использованием солнечных коллекторов [32, 33].

Профессор Дагамэ [32, 33] собрал сведения о 142 фирмах, занимающихся гелиосушкой. Причем большинство гелиосушилок предназначены для сушки сельхозпродуктов. Анализ конструктивных особенностей рассмотренных установок показывает, что все они прерывистого действия. Это обусловлено требованием простоты при их создании, в то время как непрерывный процесс требует механизации движения тележек с продуктами, что ведет к определенному усложнению конструкции. Абсолютное большинство установок не оборудованы системой аккумулирования тепловой энергии, которая является дорогостоящей и не всегда надежной. В единичных устройствах в качестве аккумуляторов используются емкости, заполненные галечником. Во многих установках применяется принудительная циркуляция. Имеются схемы гелиосушилок с рециркуляцией воздуха, а также с топливным дублером, причем использование последнего сказывается на стоимости установки, одновременно увеличивая эффективность ее использования. Собранная Дагамэ информация содержит следующие данные: тип сушилки; наличие солнечных коллекторов, топливного дублера, аккумулятора теплоты, системы для рециркуляции воздуха; способ циркуляции сушильного агента. В проделанном Дагамэ обзоре гелиосушилки сгруппированы между собой по виду высушиваемого материала. При этом специфичность конкретного вида сельхозпродукта отражается и на конструкции установки. Так, гелиосушилки для сена и зерна, не работающие при естественной конвекции, относятся к камерным типам, и большинство из них снабжены топливным дублером, в то время как при

сушке различных продуктов используются все типы сушилок. Большая часть таких установок имеют естественную конвекцию. Это объясняется тем, что сушилки для растительного материала установлены в развивающихся странах или предназначены для использования в домашних условиях. Экономические и политические аспекты применения гелиосушилок для различных стран имеют свои особенности. Так, в развивающихся государствах это обусловлено прежде всего необходимостью уменьшения потерь сельхозпродукции и улучшения качества высушиваемого продукта, что способствует решению продовольственной проблемы.

Суточная периодичность поступления солнечной радиации заставляет искать способы аккумуляирования полученной от Солнца теплоты с тем, чтобы использовать ее в дальнейшем в соответствии с графиком потребления для бытовых и производственных целей. В зависимости от продолжительности рабочего цикла есть часовые, суточные и сезонные аккумуляторы теплоты. Различаются они и по температурному диапазону: в системах воздушного отопления температура аккумулятора составляет примерно 35–40 °С, в системах горячего водоснабжения 37–55 °С, в системах водяного отопления до 90 °С, а на гелиоэлектростанциях она может быть 250 °С и выше [34–36].

В настоящее время в отраслях экономики используются гелиотехнические установки на основе солнечной энергии (различные типы солнечных теплиц, парников, опреснителей, водонагревателей, сушилок).

Одна из важных и сложных проблем, стоящих перед пищевой и фармацевтической промышленностью, – всемерное обеспечение населения качественными продуктами питания. Основная задача для предприятий комплекса – сокращение времени переработки сырья, снижение расходов электроэнергии и трудовых затрат, повышение качества конечной продукции, совершенствование технологических процессов сушки [37–39].

### **Теоретические исследования в области аккумуляции солнечной энергии**

В гелиосушильной установке для аккумуляции теплоты используется парафин – воскоподобное вещество, представляющее собой смесь твердых углеводородов предельного ряда состава от  $C_{18}H_{38}$  до  $C_{35}H_{72}$ , получаемое в результате переработки нефти или сланцевого масла. Состав и свойства парафинов зависят от природы нефти и способа получения этих продуктов. Температура плавления данного материала 45–52 °С, температура кипения 350 °С.

Технические характеристики парафина по ГОСТ 23683–89:

- внешний вид – кристаллическая масса белого цвета;
- температура плавления – не ниже 52 °С;
- массовая доля масла – не более 0,80 %;

- цвет, условные марки – не более 4;
- запах отсутствует;
- бензопирен, сера, вода, механические примеси, водорастворимые кислоты и щелочи отсутствуют [40].

Рассмотрим процесс начала нагрева обезвоживаемого объекта в инфракрасной гелиосушильной установке (с парафином на дне) с аккумуляцией солнечной энергии. Для решения этой задачи принято, что теплоемкость парафина превосходит теплоемкость обезвоживаемого объекта. Пусть на верхний слой падают ИК-лучи, а также происходит теплообмен за счет тепломассообмена с поверхностным воздухом, находящимся между металлической пластиной и обезвоживаемым объектом. Сначала запишем уравнение теплопроводности для обезвоживаемого объекта, затем определим его связь на границе раздела фаз с помощью равенства температур и потока теплоты. Использование указанной выше особенности позволяет упростить систему уравнений. Итак, имеем формулу теплопроводности для парафинового слоя толщиной  $l$ , где поверхностный слой получает теплоту в количестве  $q$ , которая является результатом инфракрасного и воздушного нагрева:

$$\begin{cases} u_t = a^2 u_{xx}; \\ v_1 u_x \big|_{x=0} = q; \\ u_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для нижней границы запишем условие отсутствия потока теплоты, так как там имеется теплоизоляционный слой. При решении данной задачи введем функцию  $V = V(x, t)$ , полагая, что

$$u = x \left( 1 - \frac{x}{2l} \right) q + V(x, t). \quad (2)$$

Тогда имеем  $V_x \big|_{x=0} = 0$  и систему уравнений:

$$\begin{cases} V_t = a^2 V_{xx}; \\ V_x \big|_{x=0} = 0, \\ V_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Порядок решения данного параболического уравнения известен. С помощью метода разделения получаем

$$V = \sum V_k(t) \frac{\pi}{l} kx, \quad (4)$$

где  $V_k(t) = V_k(0) l^{-a^2 \frac{\pi}{l} kt}$ .

Неизвестные постоянные  $V_k(0)$ , определяем из начальных условий, считая, что  $u = u_0 = \text{const}$ :

$$u_0 = x \left( 1 - \frac{x}{2l} \right) q + V(0, x). \quad (5)$$

С помощью обратного преобразования Фурье, т. е. умножая (5) на  $\cos \frac{\pi}{l} kx$ , поочередно на  $k$  и интегрируя от 0 до  $x$ , получим окончательные значения коэффициентов.

Обратная задача – охлаждение парафина – аналогична в случаях, если система замкнута. Но в рассматриваемой системе происходит испарение, где по мере охлаждения собирается энергия с поверхности обезвоживаемого объекта. Если скорость процесса испарения пропорциональна концентрации влаги в поверхностном слое, т. е.

$$\frac{dn}{dt} = cn, \quad (6)$$

где  $c$  – коэффициент испаряемой способности, зависящий от формы и других состояний материала, а также от разницы парциальных давлений – между внутренним и внешним давлением паров воды, то это позволяет написать выражение об удалении энергии в виде фазовых переходов «жидкость – пар» в форме

$$q^+ = q_0^+ l^{-ct}. \quad (7)$$

Тогда меняется граничное условие, и вместо (1) получим систему уравнений с другим граничным условием на поверхностном слое:

$$\begin{cases} u_t = a^2 u_{xx}; \\ ku_x \big|_{x=0} = q_0^* l^{-ct}; \\ u_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Для того чтобы система (8) решалась методом разделения переменных, следует применить граничное условие на поверхности аналогично введению функции  $V(x, t)$

$$u = u_2 = x \left( 1 - \frac{x}{2l} \right) q(t) + V(x, t) + \beta(t), \quad (9)$$

где  $\beta = \frac{q^1(t)}{l}$ .



С учетом разложения функции Фурье получаем:

$$x\left(1 - \frac{x}{2l}\right) \text{ будет } A_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^l x\left(1 - \frac{x}{l}\right) \cos \frac{\pi}{l} kx dx; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum A_k \cos \frac{\pi}{l} kx q^x(t) + \sum \dot{V}_k \cos \frac{\pi}{l} kx + \dot{\beta}(t) = \\ = -a^2 \sum V_k(t) \left(t \frac{\pi}{l} k\right)^2 \cos \frac{\pi}{l} kx - \frac{q^1(t)}{l}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\dot{\beta} = \frac{\dot{q}}{l}(t)$ .

Из (11) получим

$$\dot{A}kq^+ + \dot{V}_k(t) = -a^2 \left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 V_k(t). \quad (12)$$

Решением (12) будет уравнение

$$V_k(t) = V_k(0) l^{-\left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 t} - A_k l^{-\left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 t} \int_0^t l^{\frac{a^2 \pi^2}{l^2} t' k} q^+(t') dt'. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет получить окончательное решение в виде Фурье компонентов (8).

В относительно замкнутом объеме, где происходит перегрев камеры, температура достигает таких значений, при которых аккумулирующий слой начинает расплавляться. Если для плоского слоя температуру обозначить  $u = u(x, t)$ , а расплавление происходит в его верхней части, то получим задачу о фазовых переходах с критической точкой  $u = u^*$ . Если энергия продолжает поступать постоянно в течение времени, то с момента  $u \geq u^*$  начинается расплавление.

Рассмотрим задачу о расплавлении (затвердении) и движении межфазовой плоскости по оси  $x$ . Пусть при  $x = 0$ , т. е. в начале координат, начинается расплавление. При поступлении внешней энергии и отводе энергии от аккумулирующих ее материалов (например, паста томата над парафиновым слоем) появляется поверхность разделения двух фаз: первая – верхняя жидкая фаза при расплавлении (твердая фаза при затвердении) и вторая – нижняя твердая фаза (жидкая фаза при затвердении). Движение тепловой энергии, связанное с теплопроводностью из внутренних частей, описывается уравнением теплопроводности с коэффициентами теплопроводности  $k_1$  и  $k_2$ , соответствующими температурным полям  $u_1$  и  $u_2$ . Аналогичная задача решается в случае определения замерзания поверхности Земли.

При движении поверхности раздела происходит выделение скрытой теплоты затвердения, а на поверхности раздела фазового перехода температура все время остается постоянной. Теперь рассмотрим условия задачи на поверхности раздела (рис. 2–4).

Рис. 2. К задаче о движении границ расплавления (затвердения) материала, аккумулирующего солнечную энергию: 1 – верхняя часть парафина,  $\xi \leq x \leq 0$ ; 2 – поверхность раздела между жидкой и твердой фазами,  $x = \xi(t)$ ; 3 – дно поверхности нижней фазы,  $\infty \geq x > \xi(t)$

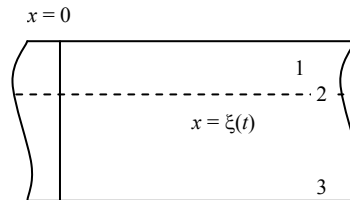


Fig. 2. Towards the problem of the motion of the melting (hardening) boundaries of a substance that accumulates solar energy: 1 – upper part of paraffin  $\xi \leq x \leq 0$ ; 2 – interface between liquid and solid masses  $x = \xi(t)$ ; 3 – bottom surface of the lower phase  $\infty \geq x > \xi(t)$

Рис. 3. Нагрев парафина:  
1 – граничное условие,  $k_1 u_x = q$   
( $q$  – мощность проникающей теплоты);  
2 – изоляционное дно

Fig. 3. Paraffin heating:  
1 – boundary condition  $k_1 u_x = q$ ,  
where  $q$  is power penetrating heat;  
2 – insulating bottom

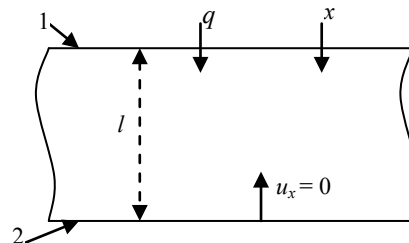
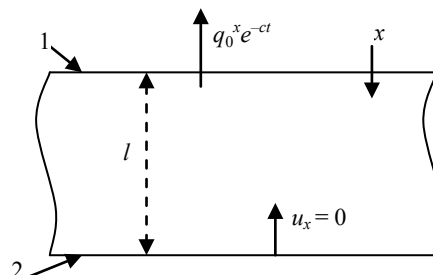


Рис. 4. Граничные условия задачи

Fig. 4. The boundary conditions of the problem



Запишем дополнительное условие для раздела фаз

$$k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}. \quad (14)$$

А для каждой фазы приведем следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x}, & 0 < x < \xi; \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial u_2}{\partial x}, & \xi < x < \infty, \end{cases} \quad (15)$$

где  $u_1, u_2$  – соответствующие температуры фаз.

С учетом дополнительных условий:

$$\begin{cases} u_1(0, t) = u_1^*; \\ u_2(0, t) = u_0. \end{cases} \quad (16)$$

Условия на границе замерзания следующие:

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u^* \text{ при } x = \xi; \\ k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} - k_2 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}. \end{cases} \quad (17)$$

По аналогии с решением задач параболического типа можно применять метод подобия, для чего следует ввести  $\varphi = u^* - u_2$ . Соответственно  $\varphi_1 = u^* - u_1$  и  $\varphi_2 = u^* - u_2$ .

Тогда вместо (17) имеем:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 = 0 \text{ при } x = \xi; \\ k_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \varphi_1(0, t) = u^* - u_1^*; \\ \varphi_2(0, t) = u^* - u_2^*; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} a_1^2 \frac{d^2 f_1}{dz^2} = -2z \frac{df_1}{dz}, & 0 < z < \xi; \\ a_2^2 \frac{d^2 f_1}{dz^2} = -2z \frac{df_2}{dz}, & 0 < z < \infty, \end{cases} \quad (20)$$

где  $u = f\left(\frac{x}{\sqrt{x}}\right)$ .

Решение систем (18)–(20) примет вид:

$$f(z) = \begin{cases} f_1 = A_1 + B_1 \vartheta\left(\frac{z}{2a_1}\right), & 0 < z < \alpha; \\ f_2 = A_1 + B_2 \vartheta\left(\frac{z}{2a_2}\right), & \alpha < z < \infty, \end{cases} \quad (21)$$

где  $\vartheta$  – интеграл ошибок, известная функция.

Для определения постоянных  $A_1, A_2, B_1, B_2$  используются условия (18)–(20), из которых с учетом (21) имеем следующее:

$$\xi = \alpha \sqrt{t}, \quad (22)$$

где  $\alpha$  – константа.

Соотношение (22) описывает закон движения границы расплавления (затвердения).

Для постоянных  $A_1, A_2, B_1, B_2$  получим:

$$\begin{aligned} A_1 &= u^* - u_1(0, t); & A_2 &= -\frac{u^* - u_2(x_1, 0)}{1 - \vartheta\left(\frac{1}{2a_2}\right)}; \\ B_2 &= \frac{u^* - u_1(0, t)}{\vartheta\left(\frac{1}{2a_1}\right)}; & B_2 &= \frac{u^* - u_2(x_1, 0)}{1 - \vartheta\left(\frac{1}{2a_2}\right)}. \end{aligned} \quad (23)$$

С помощью (14) и (18) для определения  $\alpha$  можно получить трансцендентное уравнение, которое решают численно:

$$\frac{k_1 [u^* - u_1(0, t)] e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \vartheta\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{k_2 [u^* - u_2(x_1, 0)] e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}}}{a_2 \left[1 - \vartheta\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right]} = -\lambda \rho \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (24)$$

Если  $u^* = u_1(x_1, 0)$ , т. е. начальная температура второй фазы равна температуре расплавления (затвердения), то формулы (23), (24) упрощаются.

Обозначив  $\beta = \frac{\alpha}{2a_2}$ , получим уравнение, решаемое графическим способом:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\beta^2}}{\vartheta(\beta)} = -\frac{\lambda \rho a_1^2}{k_1 [u^* - u(x_1, 0)]} \beta. \quad (25)$$

Выше показаны процессы нагрева и охлаждения, которые являются линейными задачами уравнения математической физики с известными решениями. Данные исследования проведены с целью получения результатов для организации сушки лекарственных трав в гелиоаккумуляционной сушильной установке при движении границы фазового перехода с применением метода подобия [41–43].

### **Гелиоаккумуляционная сушильная установка и экспериментальные исследования**

На основе выполненных теоретических исследований разработана энергосберегающая инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии для сушки лекарственных трав (рис. 5).

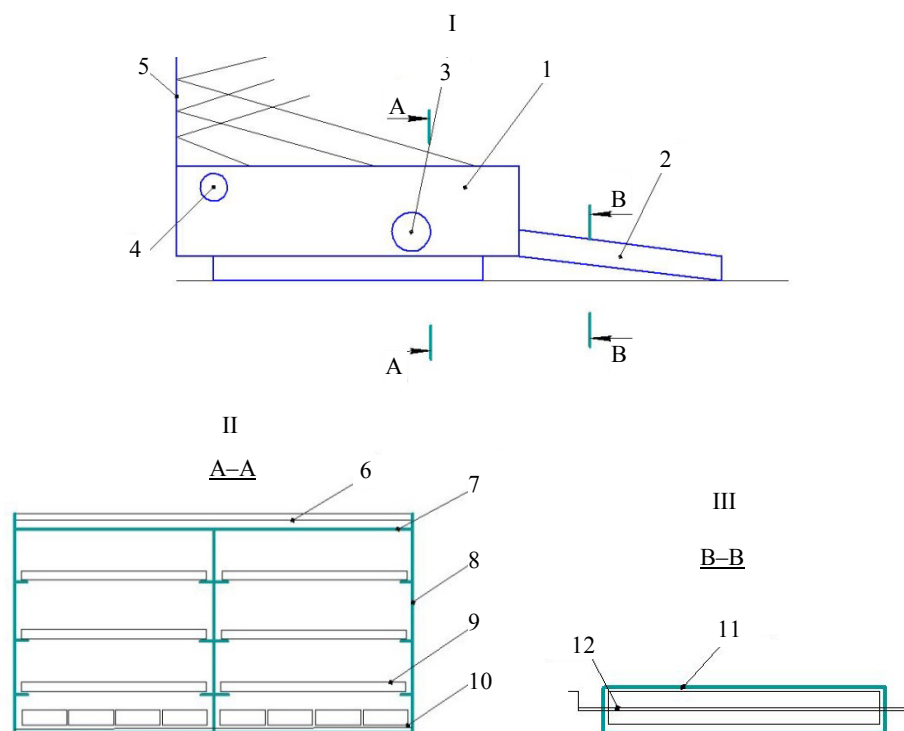


Рис. 5. Инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии:

- 1 – общий вид устройства; 2 – вспомогательный теплообъемник солнечной энергии;  
3, 4 – циркуляционное отверстие для естественной конвекции воздуха;  
5 – отражатель солнечных лучей; 6 – двуслойное стекло; 7 – специальная керамическая поверхность; 8 – стенка камеры; 9 – сетчатый стеллаж; 10 – аккумулятор солнечной энергии; 11 – вспомогательная нагревательная камера; 12 – верхнее пленочное покрытие, установленное шибером; I – общий вид устройства сбоку; II, III – поперечный разрез А–А и В–В

Fig. 5. The infrared solar drying plant with accumulation of solar energy: 1 – general view of the installation; 2 – auxiliary solar energy heat collector;  
3, 4 – circulation holes for natural air convection; 5 – reflector of the sun rays;  
6 – double-layer glass; 7 – special ceramic surface; 8 – chamber wall; 9 – net shelving;  
10 – solar power battery; 11 – auxiliary heating chamber; 12 – upper film coating installed by the gate; I – side general view of the device; II, III – cross section A–A, B–B

На основе полученных в лаборатории Ташкентского государственного технического университета результатов проводился эксперимент по изучению температурного поля различных теплоаккумуляционных материалов. Авторами была изготовлена энергосберегающая инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии. Результаты темпа нагрева и процесса падения температуры материалов толщиной слоя 2 и 4 см приведены на рис. 6–9.

Из рис. 6–9 видно, что скорость нагрева парафина значительно выше, чем песка, соли и кирпича, однако потери теплоты у парафина происходят

медленнее. Парафин обладает лучшей способностью удерживания теплоты, чем другие материалы, при толщине слоя 2 см, хотя при толщине слоя более 4 см нагрев соли происходит несколько быстрее.

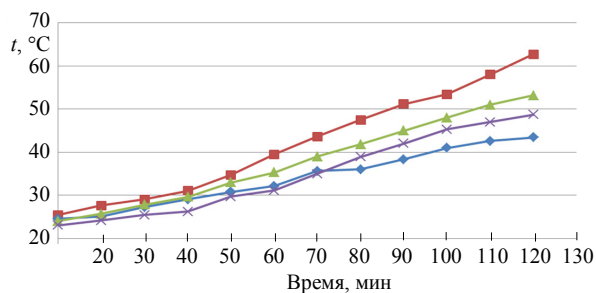


Рис. 6. Динамика нагрева материалов с толщиной слоя 2 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 6. Curves of the dynamics of heating when using different materials with a layer thickness of 2 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

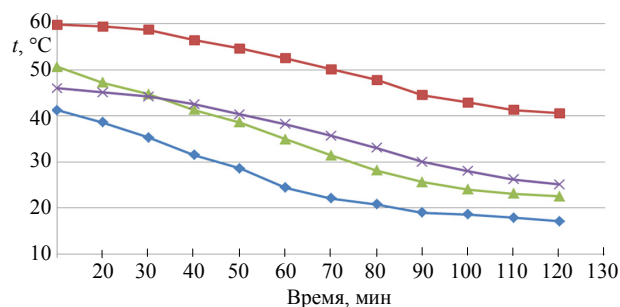


Рис. 7. Динамика падения температуры для материалов с толщиной слоя 2 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 7. Curves of the dynamics of the temperature drop when using different materials with a layer thickness of 2 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

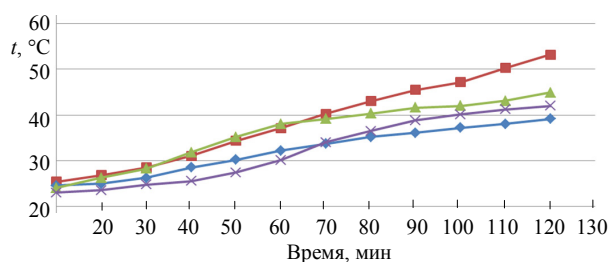


Рис. 8. Динамика нагрева материалов с толщиной слоя 4 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 8. Curves of the dynamics of heating when using different materials with a layer thickness of 4 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

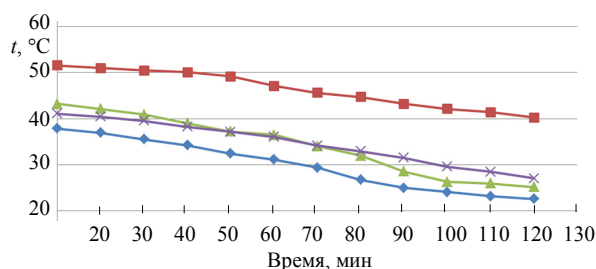


Рис. 9. Динамика падения температуры для материалов с толщиной слоя 4 см:

■ — парафин; ◆ — песок; ▲ — соль; ✕ — кирпич

Fig. 9. Curves of the dynamics of the temperature drop when using different materials with a thickness of 4 cm:

■ — paraffin; ◆ — sand; ▲ — salt; ✕ — brick

## ВЫВОДЫ

1. Для экспозиции перегрева с периодом 6,5 ч время прохождения границы раздела фаз, согласно закону движения границы расплавления (затвердения) (22), определяли по формуле  $\xi = \alpha\sqrt{6,5 \text{ ч}} \cong 12 \text{ ч}$ . Получена оптимальная толщина слоя аккумулирующего парафина. Это позволяет избегать перегрева, сохранять биоактивные вещества путем снижения внутрикамерной температуры, увеличивать время медленной сушки и в ночное время использовать парафин для экономии энергии (в частности, 2–4 см слоя парафина массой 50 кг с соответствующей плоской поверхностью в пересчете на удельную теплоемкость испарения 2400 кДж/кг). Удельное значение плавления парафина 150 кДж/кг позволяет дополнительно испарять 5,8 л влаги при сушке продуктов.

2. Предложен оптимальный вариант конструкции, в которой аккумулятором теплоты является парафин, выполняющий функции ее накопителя, т. е. сушильного агента.

3. Разработанная гелиоаккумуляционная сушильная установка отличается простотой схемы и относительно низкой себестоимостью, что позволяет применять ее в малых хозяйствах и бытовом секторе. Главное достоинство конструкции — исключение прямых попаданий солнечных лучей на сырье, при этом нагрев происходит в основном за счет ИК-излучений и контактного теплообмена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mondal, A. K. A Brief History and Future Aspects in Automatic Cleaning Systems for Solar Photovoltaic Panels / A. K. Mondal, K. Bansal // *Advanced Robot.* 2015. Vol. 29, No 8. P. 515–524.
2. Deposition and Possible Influence of a Self-Cleaning Thin  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  Film on a Photovoltaic Module Efficiency / A. Soklič [et. al] // *Catalysis Today.* 2015. Vol. 252. P. 54–60.
3. Recent Developments in Multifunctional Coatings for Solar Panel Applications: a Review / Sayem Mozumder Mohammad [et al.] // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2019. Vol. 189. P. 75–102.
4. Aziz, F. Spray Coating Methods for Polymer Solar Cells Fabrication: a Review / F. Aziz, A. F. Ismail // *Materials Science in Semiconductor Processing.* 2015. Vol. 39. P. 416–425.

5. Tai, Q. Emerging Semitransparent Solar Cells: Materials and Device Design / Q. Tai, F. Yan // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29, No 34. P. 1700192.
6. Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors / H. K. Elminir [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47, No 18. P. 3192–3203.
7. Coatings for Concentrating Solar Systems: a Review / C. Atkinson [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 113–122.
8. Рахмонов, И. У. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей / И. У. Рахмонов, К. М. Реймов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 528–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>.
9. Бабаев, Б. Дж. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла / Б. Дж. Бабаев. Махачкала, 2016. 345 с.
10. Бекман, Г. Тепловое аккумулярование энергии: пер. с англ. / Г. Бекман, П. В. Гилли. М.: Мир, 1987. 272 с.
11. Братенков, В. Н. Теплоснабжение малых населенных пунктов / В. Н. Братенков, П. В. Хаванов, Л. Я. Веккер. М.: Стройиздат, 1988. 223 с.
12. Григорьев, В. А. Разработка аккумуляторов теплоты с зернистым теплоносителем и методы их расчета на основе математического моделирования / В. А. Григорьев. М., 2003. 147 с.
13. Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики / Дж. Даффи, У. Бекман: пер. с англ. О. С. Попеля [и др.]. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2013. 888 с.
14. Солнечные и ветровые автономные энергоустановки с водородным накопителем / О. С. Попель [и др.] // *Перспективы энергетики*. 2006. Т. 10. С. 77–90.
15. Oshchepkov, M. Yu. Stratification in a Solar Tank Accumulator during Rapid Displacement of Hot Water / M. Yu. Oshchepkov, S. E. Frid, M. A. Kolobaev // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 3. P. 177–182.
16. Олышанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Олышанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578.
17. Kolomiyets, Yu. G. Efficiency of Solar Energy Utilization for Water Heating on the Russian Federation Territory / Yu. G. Kolomiyets, O. S. Popel, S. E. Frid // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2009. No 6. P. 16–23.
18. Effectiveness and Prospects of Using Different Solar Water Heating Systems under the Climatic Conditions of the Russian Federation / S. E. Frid [et al.] // *Thermal Engineering*. 2011. Vol. 58, No 11. P. 910–916.
19. Polymeric Materials for Solar Thermal Applications / M. Kohl [et al.]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>.
20. Meyer, J. P. The Cost Must be Cut / J. P. Meyer, J. Gesthuizen // *Sun Wind Energy*. 2014. No 3. P. 58–59.
21. Results of the Development of a Solar Accumulation-type Water Heater Made of Polymer and Composite Materials / O. S. Popel' [et al.] // *Thermal Engineering*. 2013. Vol. 60, No 4. P. 267–269.
22. Polyakov, A. F. Numerical Simulation of Temperature Stratification in an Accumulation Type Solar Water-Heating Installation / A. F. Polyakov, S. E. Frid // *High Temperature*. 2014. Vol. 52, No 3. P. 417–423.
23. Oshchepkov, M. Yu. Thermal Stratification in Storage Tanks of Integrated Collector Storage Solar Water Heaters / M. Yu. Oshchepkov, S. E. Frid // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 1. P. 74–82.
24. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки / А. А. Бельский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 146–154. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>.
25. Теплоустойчивость и тепломассообмен дорожных конструкций / Б. М. Хрусталев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
26. Smyth, M. Integrated Collector Storage Solar Water Heaters / M. Smyth, P. C. Eames, B. Norton // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2006. Vol. 10, No 6. P. 503–538.
27. Hendron, R. Development of Standartized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings [Electronic Resource] / R. Hendron, J. Burch // *Proc. Energy Sustainability*



- Conf., Long Beach, CA. 2007. Pap. NREL/CP-55040874. Mode of access: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40874.pdf>.
28. Бабаев, Б. Д. Расчет энергетических характеристик процессов зарядки и разрядки аккумулятора на основе системы  $\text{MgO-Mg(OH)}_2$  / Б. Д. Бабаев, В. Н. Данилин, А. М. Гасаналиев // Физико-химический анализ многокомпонентных систем: тез. докл. II Всерос. науч. конф. 2002 г. Махачкала: Изд-во ДГПУ (НИИ ОНХ), 2002. С. 27–28.
  29. Экологические основы использования возобновляющихся источников энергии / В. В. Волшаник [и др.] // Вестник МГСУ. 2010. Т. 2, № 4. С. 108–119.
  30. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of  $\text{CuInSe}_2$  / A. K. Esman [et al.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
  31. Исмаишова, В. А. Возможности использования солнечной энергии для сушки фруктов и овощей / В. А. Исмаишова // Использование солнечной энергии: сборник. М., 1957. С. 232–247.
  32. Хазимов, К. М. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии / К. М. Хазимов. Алматы, 2015. 201 с.
  33. Design and Performance of an Air Collector for Industrial Croup Dehydration / P. W. Niles [et al.] // Solar Energy. 2012. Vol. 20, No 1. P. 19–23.
  34. Захидов, Р. А. Возобновляемая энергетика в начале XXI века и перспективы развития гелиотехники в Узбекистане / Р. А. Захидов, М. С. Саидов // Гелиотехника. 2009. № 1. С. 3–12.
  35. Голицын, М. В. Альтернативные энергоносители / М. В. Голицын, А. М. Голицын, Н. М. Пронина. М.: Наука, 2004. 159 с.
  36. Бутузов, В. А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии / В. А. Бутузов. Краснодар, 2004. 297 с.
  37. Modeling of the Unsteady Temperature Conditions of Solar Greenhouses with a Short-Term Water Heat Accumulator and its Experimental Testing / N. R. Avezova [et al.] // Applied Solar Energy. 2010. Vol. 46, No 1. P. 4–7.
  38. Ахатов, Ж. С. Численные расчеты теплотехнических параметров солнечной сушилки-парника / Ж. С. Ахатов, А. С. Халимов // Гелиотехника. 2015. № 2. С. 26–30.
  39. Солнечные технологии в Узбекистане: состояние, приоритеты и перспективы развития / А. А. Абдурахманов [и др.] // Гелиотехника. 2012. № 4. С. 23–31.
  40. Нефтепродукты информационный портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vot-nn.ru/production/paraffin/>.
  41. Сафаров, Ж. Э. Программное обеспечение математических моделей технологии сушки лекарственных трав на гелиосушильной установке / Ж. Э. Сафаров, Г. Т. Дадаев // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство DGU 04385 от 17.05.2017.
  42. Method for the Primary Processing of Silkworm Cocoons (*Bombyx Mori*) / J. E. Safarov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 9, No 1. P. 4562–4565. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a5089.119119>.
  43. Method for Drying Fruits of Rose Hips / J. E. Safarov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 9, No 1. P. 3765–3768. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a4716.119119>.

Поступила 26.12.2018    Подписана в печать 11.03.2019    Опубликовано онлайн 31.03.2020

#### REFERENCES

1. Mondal A. K., Bansal K. (2015) A Brief History and Future Aspects in Automatic Cleaning Systems for Solar Photovoltaic Panels. *Advanced Robotics*, 29 (8), 515–524. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.996602>.
2. Soklič A., Tasbihi M., Kete M., Štangar U. L. (2015) Deposition and Possible Influence of a Self-Cleaning Thin  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  Film on a Photovoltaic Module Efficiency. *Catalysis Today*. 252, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.021>.
3. Mohammad Sayem Mozumder, Abdel-Hamid Mourad I., Hifsa Pervez, Riham Surkatti (2019) Recent Developments in Multifunctional Coatings for Solar Panel Applications: a Review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 189, 75–102. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.015>.

4. Aziz F., Ismail A. F. (2015) Spray Coating Methods for Polymer Solar Cells Fabrication: A Review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, (39), 416–425. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.019>.
5. Tai Q., Yan F. (2017) Emerging Semitransparent Solar Cells: Materials and Device Design. *Advanced Materials*, 29 (34), 1700192. <https://doi.org/10.1002/adma.201700192>.
6. Elminir H. K., Ghitass A. E., Hamid R. H., El-Hussainy F., Beheary M. M., Abdel-Moneim K. M. (2006) Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors. *Energy Conversion and Management*, 47 (18), 3192–3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.
7. Atkinson C., Sansom C. L., Almond H. J., Shaw C. P. (2015) Coatings for Concentrating Solar Systems – a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (45), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.015>.
8. Rakhmonov I. U., Reymov K. M. (2019) Mathematical Models and Algorithms of Optimal Load Management of Electricity Consumers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 528–535 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>.
9. Babaev B. J. (2016) *Development and Research of Energy Systems Based on Renewable Sources with Phase Transitional Heat Accumulation*. Maxachkala. 345 (in Russian).
10. Beckman G., Gilli P. V. (1984) *Thermal Energy Storage*. Springer. 230.
11. Bratenkov V. N., Khavanov P. V., Vesker L. Ya. (1988) *Heat Supply of Small Settlements*. Moscow, Stroiizdat Publ. 223 (in Russian).
12. Grigoriev V. A. (2003) *Development of Heat Accumulators with a Granular Coolant and Methods for their Calculation Based on Mathematical Modeling*. Moscow. 147 (in Russian).
13. Duffie J. A., Beckman W. A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons. 910. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
14. Popel' O. S., Frid S. E., Shpil'rain Je. Je., Izosimov D. B., Tumanov V. L. (2006) Solar and Wind Autonomous Power Plants with Hydrogen Storage. *Perspektivy Energetiki = Power Engineering Perspectives*, 10, 77–90 (in Russian).
15. Oshchepkov M. Yu., Frid S. E., Kolobaev M. A. (2015) Stratification in a Solar Tank Accumulator during Rapid Displacement of Hot Water. *Applied Solar Energy*, 51 (3), 177–182. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15030093>.
16. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6) 564–578 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>.
17. Kolomiyets Yu. G., Popel O. S., Frid S. E. (2009) Efficiency of Solar Energy Utilization for Water Heating on the Russian Federation Territory. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, (6), 16–23.
18. Frid S. E., Kolomiets Yu. G., Sushnikova E. V., Yamuder V. F. (2011) Effectiveness and Prospects of Using Different Solar Water Heating Systems Under the Climatic Conditions of the Russian Federation. *Thermal Engineering*, 58 (11), 910–916. <https://doi.org/10.1134/s0040601511110061>.
19. Kohl M. M., Meir G., Papillon P., Wallner G. M., Saile S. (2012) *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. Weinheim, Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>.
20. Meyer J. P., Gesthuizen J. (2014) The Cost Must Be Cut. *Sun Wind Energy*, (3), 58–59.
21. Popel' O. S., Frid S. E., Mordynskii A. V., Suleimanov M. Zh., Arsatov A. V., Oshchepkov M. Yu. (2013) Results of the Development of a Solar Accumulation-type Water Heater Made of Polymer and Composite Materials. *Thermal Engineering*, 60 (4), 267–269. <https://doi.org/10.1134/s0040601513040101>.
22. Polyakov A. F., Frid S. E. (2014) Numerical Simulation of Temperature Stratification in an Accumulation Type Solar Water-Heating Installation. *High Temperature*, 52 (3), 417–423. <https://doi.org/10.1134/s0018151x14030225>.
23. Oshchepkov M. Yu., Frid S. E. (2015) Thermal Stratification in Storage Tanks of Integrated Collector Storage Solar Water Heaters. *Applied Solar Energy*, 51 (1), 74–82. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15010107>.
24. Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. (2019) Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 146–154 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>.

25. Khroustalev B. M., Tingguo Liu, Akeliev V. D., Zhongyu Li, Aliakseyeu Yu. G., Zankavich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
26. Smyth M., Eames P. C., Norton B. (2006) Integrated Collector Storage Solar Water Heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (6), 503–538. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.001>.
27. Hendron R., Burch J. (2007) Development of Standartized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings. *Proc. Energy Sustainability Conf.*, Long Beach, CA. Pap. NREL/CP-55040874. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40874.pdf>.
28. Babaev B. D., Danilin V. N., Hasanaliyev A. M. (2002) Calculation of Energy Characteristics of Battery Charging and Discharging Processes Based on the  $MgO-Mg(OH)_2$  System. *Fiziko-Khimicheskii Analiz Mnogokomponentnykh Sistem: Tezisy Dokladov II Vserossiiskoi Nauchnoi Konferentsii* [Physicochemical Analysis of Multicomponent Systems: Abstracts of the II All-Russian Scientific Conference]. Makhachkala, Publishing House of the DSPU (SRI ONH), 27–28 (in Russian).
29. Volshanik V. V., Peshnin A. G., Hamanjoda U., Schennikova G. N. (2010) Ecological Basis for the Use of Renewable Energy Sources. *Vestnik MGSU*, 2 (4), 108–119 (in Russian).
30. Esman A. K., Kuleshov V. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2018) Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of  $CuInSe_2$ . *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
31. Ismashyeva V. A. (1957) Possibilities of Using Solar Energy for Drying Fruits and Vegetables. *The Use of Solar Energy: Collection*. Moscow. 232–247 (in Russian).
32. Khazimov K. M. (2015) *Intensification of the Drying Process of Plant Products Using Solar Energy*. Almaty. 201 (in Russian).
33. Niles P. W., Carnegie E. J., Pohl J. G., Cherne J. M. (2012) Design and Performance of an Aircollector for Industrial Crop Dehydration. *Solar Energy*, 20 (1), 19–23. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(78\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0038-092x(78)90136-6).
34. Zakhidov R. A., Saidov M. S. (2009) Renewable Energy at the Beginning of the XXI Century and Prospects for the Development of Solar Technology in Uzbekistan. *Applied Solar Energy*, 45 (1), 1–6. <https://doi.org/10.3103/s0003701x09010010>.
35. Golitsyn M. V., Golitsyn A. M., Pronian N. M. (2004) *Alternative Energy Carriers*. Moscow: Nauka Publ. 159 (in Russian).
36. Butuzov V. A. (2004) *Increasing the Efficiency of Heating Systems Based on Renewable Energy Sources*. Krasnodar. 297 (in Russian).
37. Avezova N. R., Samiev K. A., Khaetov A. R., Nazarov I. M., Ergashev Z. Zh., Samiev M. O., Suleimanov Sh. I. (2010) Modeling of the Unsteady Temperature Conditions of Solar Greenhouses with a Short-Term Water Heat Accumulator and its Experimental Testing. *Applied Solar Energy*, 46 (1), 4–7. <https://doi.org/10.3103/s0003701x10010020>.
38. Akhatov Zh. S., Khalimov A. S. (2015) Numerical Calculations of the Thermal Parameters of a Solar Dryer-Hotbed. *Applied Solar Energy*, 51 (2), 107–111. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15020024>.
39. Abdurakhmanov A. A., Zaynutdinova Kh. K., Mamatkosimov M. A., Payzullakhanov M. S., Saragoza G. (2012) Solar Technologies in Uzbekistan: State, Priorities and Development Prospects. *Applied Solar Energy*, 48 (2), 84–91. <https://doi.org/10.3103/s0003701x1202003x>.
40. *Petroleum Products Information Portal*. Available at: <http://www.vot-nn.ru/production/paraffin/>.
41. Safarov J. E., Dadaev G. T. (2017) Software of Mathematical Models of the Technology of Drying Medicinal Herbs on a Solar-Drying Installation. *Agency on Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan. Certificate DGU 04385* (in Russian).
42. Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T., Samandarov D. I. (2019) Method for the Primary Processing of Silkworm Cocoons (*Bombyx Mori*). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (1), 4562–4565. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a5089.119119>.
43. Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T., Samandarov D. I. (2019) Method for Drying Fruits of Rose Hips. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (1), 3765–3768. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a4716.119119>.