

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУШИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Мирзайорова Севара Убайдуллаевна

PhD Каршинский государственный технический университет

Хужайорова Азиза Фарход кизи

Исследователь Каршинский государственный технический университет

<https://doi.org/10.5281/zenodo.22874242>

Аннотация В статье рассмотрена концепция повышения энергетической эффективности сушильной системы для сельскохозяйственной продукции за счёт интеграции солнечного теплового и фотоэлектрического преобразования энергии. В качестве научно-методической основы использованы конструктивные решения и экспериментальные результаты интегрированной солнечно-биомассовой сушильной системы с тепловым аккумулятором и медным теплообменником. Основной принцип адаптации заключается в разделении энергетических потоков: солнечная тепловая энергия используется для нагрева сушильного воздуха, а фотоэлектрическая энергия — для питания вентилятора, средств измерения и системы управления. Такой подход позволяет уменьшить зависимость процесса от внешнего электроснабжения и повысить управляемость воздушного режима. По данным исходного исследования, гибридная солнечно-биомассовая система обеспечила снижение влажности банановых ломтиков с 68,2% до 18% на влажной основе за 14,5 ч, тогда как для солнечной и открытой сушки требовалось соответственно 30,2 и 38,5 ч. Эти значения рассматриваются в настоящей работе как литературная база для обоснования направления интеграции солнечной тепловой и фотоэлектрической подсистем, а не как результаты собственного испытания фотоэлектрической модификации. Предложенная структура может быть использована для дальнейшего экспериментального определения энергетического баланса, удельного энергопотребления и эффективности интегрированной системы в условиях Узбекистана.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечный тепловой коллектор, фотоэлектрическая система, интегрированная сушильная система, сельскохозяйственная продукция, тепловая энергия, электрическая энергия, тепловой аккумулятор, энергетическая эффективность, управление процессом сушки.

1. Введение

Сушка является одной из основных послеуборочных операций при переработке сельскохозяйственной продукции. Традиционная сушка на открытом солнце отличается простотой и отсутствием прямых затрат на энергию, однако продолжительность процесса и качество продукта существенно зависят от погодных условий. Воздействие окружающей среды также повышает риск загрязнения продукции, а изменение солнечной радиации в течение суток может приводить к неполному удалению влаги и повторному увлажнению продукта[1].

Солнечные сушильные системы позволяют преобразовывать солнечную радиацию в полезную тепловую энергию и создавать более контролируемые условия сушки[2]. Однако непостоянство солнечной радиации остаётся одним из основных ограничений солнечной технологии. В исходном исследовании интегрированной солнечно-биомассовой сушилки отмечается, что вспомогательный источник тепла позволяет поддерживать процесс в ночные и пасмурные периоды, снижая риск повторного увлажнения и увеличивая продолжительность непрерывной работы системы[3,4].

Для развития данной концепции перспективным является одновременное использование солнечной тепловой и фотоэлектрической энергии. В этом случае тепловой коллектор отвечает за формирование требуемой температуры сушильного воздуха, тогда как фотоэлектрическая подсистема может обеспечивать электроэнергией вентилятор, датчики и контроллер[5,6]. В исходной работе именно интеграция фотоэлектрических панелей для питания циркуляционных вентиляторов рассматривается как перспективное направление, способное объединить солнечный тепловой сбор, вспомогательный нагрев и автономное электроснабжение. Целью настоящей статьи является формирование научно обоснованной структуры интегрированной сушильной системы, в которой солнечная тепловая энергия используется непосредственно для процесса сушки, а фотоэлектрическая энергия — для обеспечения электрической нагрузки системы циркуляции воздуха и автоматического контроля[7,8]. Особое внимание уделяется энергетической взаимосвязи между тепловым и электрическим контурами.

2. Материалы и методы

Методическая основа предложенной системы сформирована на базе конструкции сушильной установки, описанной в исходном исследовании. Там интегрированная установка включала солнечный тепловой коллектор с гранитным теплоаккумулирующим слоем, многополочную сушильную камеру, вспомогательный теплогенератор и медный трубчатый теплообменник.

Для адаптации к теме диссертационного исследования вспомогательный электрический контур предлагается сформировать на основе фотоэлектрического генератора. Фотоэлектрические модули должны обеспечивать питание вентилятора, датчиков температуры и влажности, измерительного оборудования и контроллера. При достаточной солнечной радиации тепловой и электрический контуры работают одновременно: коллектор нагревает воздух, а PV-модули обеспечивают его циркуляцию и контроль процесса. При снижении солнечной радиации управление должно изменять режим циркуляции и, при наличии теплового аккумулятора, использовать накопленную тепловую энергию.

Конструкция тепловой части может сохранять основные принципы исходной установки. В исходной работе солнечный коллектор имел апертурную площадь $0,918 \text{ м}^2$ и был выполнен как односторонний воздушный нагреватель. В качестве теплоаккумулирующей среды использовались гранитные камни общей массой 156 кг ; измеренные при 25 °C теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность камня составляли соответственно $2,85 \text{ W/(m·K)}$, $0,89 \text{ kJ/(kg·K)}$ и $1,82 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Сушильная камера исходной конструкции имела шесть сетчатых лотков и была теплоизолирована. Подача нагретого воздуха осуществлялась через распределительный канал. В исходном проекте CFD-моделирование распределительного канала подтвердило равномерность скорости воздуха по площади лотков лучше $\pm 12\%$.

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

Для новой интегрированной схемы целесообразно использовать следующие функциональные подсистемы: солнечный тепловой коллектор; тепловой аккумулятор; фотоэлектрический модуль; аккумулятор электрической энергии при необходимости; вентилятор; сушильную камеру; датчики температуры, влажности и солнечной радиации; контроллер управления.

3. Предлагаемая структурно-энергетическая схема

Энергетический контур	Основной компонент	Назначение	Контролируемый параметр
Тепловой	Солнечный коллектор	Преобразование солнечной радиации в теплоту	Температура воздуха на выходе
Тепловой	Гранитный теплоаккумулятор	Накопление и последующее высвобождение теплоты	Температура накопителя
Воздушный	Вентилятор	Циркуляция сушильного воздуха	Расход/скорость воздуха
Электрический	PV-модуль	Питание вентилятора и автоматики	Электрическая мощность
Контрольный	Датчики и контроллер	Регулирование режима сушки	T, RH, I, m
Массообменный	Сушильная камера	Удаление влаги из продукта	Влажность продукта

Предлагаемая структура основана на разделении функций двух форм преобразования солнечной энергии. Такое разделение позволяет не расходовать высококачественную электрическую энергию на прямой нагрев продукта: фотоэлектрическая подсистема используется прежде всего для электрических нагрузок, а тепловой коллектор — для нагрева сушильного воздуха.

4. Экспериментальные параметры и система измерений

В качестве методической базы для измерительной системы использована схема исходного исследования. В ней температура регистрировалась термопарами типа К, относительная влажность — ёмкостными датчиками, скорость воздуха — анемометрическими датчиками, а масса продукта — электронными весами. Все сигналы поступали в многоканальную систему сбора данных.

Параметр	Источник/метод	Назначение в предлагаемой системе
Солнечная радиация, W/m ²	Пиранометр	Оценка теплового и PV-потенциала
Температура	Термопары/датчики	Контроль теплового

воздуха, °C	температуры	режима
Относительная влажность, %	Датчик влажности	Оценка условий массообмена
Скорость воздуха, m/s	Анемометр	Контроль конвективного переноса
Масса продукта, kg	Электронные весы	Определение кинетики сушки
PV-мощность, W	Измерение напряжения и тока	Оценка электрического энергобаланса
Потребляемая мощность вентилятора, W	Электрический измерительный канал	Определение автономности PV-контура

В качестве базового объекта для дальнейших испытаний в исходной работе использовались ломтики банана сорта Cavendish. Начальная влажность составляла 68,2% на влажной основе, средняя толщина ломтиков — $5,0 \pm 0,3$ мм, средний диаметр — 32 мм. Общая загрузка составляла 18 кг, распределённых по шести лоткам. Эти параметры могут быть использованы как исходная экспериментальная база, если фактический объект исследования диссертационной установки совпадает с указанным продуктом; в противном случае они должны быть заменены фактическими параметрами исследуемой сельскохозяйственной продукции.

5. Результаты и обсуждение

Экспериментальные данные исходной публикации позволяют оценить потенциал интегрированных сушильных систем как основу для дальнейшей модернизации. В исследовании сравнивались три режима: солнечно-биомассовая сушилка SD1, солнечная сушилка SD2 и открытая солнечная сушка OSD. Для каждого режима выполнялись три повторных испытания. Сушка считалась завершённой при достижении влажности 18% на влажной основе.

Показатель	SD1: солнечно-биомассовая	SD2: солнечная	OSD: открытая сушка
Начальная влажность, % w.b.	68,2	68,2	68,2
Конечная влажность, % w.b.	18	18	18
Время сушки, h	14,5	30,2	38,5
Тепловая эффективность коллектора, %	61,8–63,2	—	—
Общая эффективность сушки, %	6,5	40,5	—

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

Удельное энергопотребление, kWh/kg влаги	11,75	4,78	—
Средняя эксергетическая эффективность, %	24,8	12,3	—

Приведённая таблица содержит исключительно данные исходного исследования и используется как сравнительная литературная база, а не как экспериментальные результаты предлагаемой фотоэлектрической модификации. Согласно источнику, гибридная система SD1 снизила влажность банановых ломтиков с 68,2% до 18% за 14,5 ч, тогда как SD2 потребовала 30,2 ч, а открытая сушка — 38,5 ч.

Важным для темы диссертации является то, что энергетическая структура SD1 была разделена между солнечной радиацией, тепловым накопителем и биомассой: 21,3% полезной энергии приходилось на солнечную радиацию, 7,5% — на тепловое аккумулирование и 71,2% — на биомассовое сгорание. При переходе к солнечно-тепловой-фотоэлектрической архитектуре основная задача состоит в том, чтобы сохранить тепловую функцию солнечного коллектора и одновременно заменить сетевое электроснабжение вентилятора и автоматики фотоэлектрическим контуром. С точки зрения тепломассообмена интеграция PV не должна рассматриваться как самостоятельный источник тепла. Её основная функция в предлагаемой системе — обеспечение электрической мощности для управляемой циркуляции воздуха. Это позволяет регулировать скорость воздушного потока в зависимости от температуры, влажности и интенсивности солнечной радиации. В свою очередь, повышение управляемости воздушного режима должно рассматриваться совместно с тепловым аккумулятором, поскольку накопленная теплота может поддерживать процесс после снижения солнечной радиации. Исходное исследование также показывает, что значительная часть эксергетических потерь возникает в солнечном коллекторе и сушильной камере. Для SD1 на коллектор приходилось 45–52% разрушения эксергии в дневные часы, на сушильную камеру — 28–35%, а на биомассовый блок и систему рекуперации — 15–20%. Это указывает на перспективность оптимизации теплопередачи в коллекторе и распределения воздуха в камере. Таким образом, для предлагаемой системы целевыми параметрами оптимизации являются температура сушильного воздуха, скорость его движения, интенсивность солнечной радиации, температура теплового аккумулятора, электрическая мощность PV-модуля и мощность вентилятора. Их совместный анализ позволит определить энергетически рациональный режим работы интегрированной сушильной системы.

6. Практическая модель энергетического взаимодействия

Компонент	Вход	Выход	Роль в системе
Солнечный коллектор	Солнечная радиация	Тепловая энергия	Нагрев воздуха
Тепловой аккумулятор	Избыточная теплота	Накопленная теплота	Стабилизация режима
PV-модуль	Солнечная	Электроэнергия	Питание

	радиация		вентилятора и автоматики
Вентилятор	Электроэнергия	Движение воздуха	Управление массообменом
Сушильная камера	Горячий воздух + продукт	Влажный отработанный воздух	Удаление влаги
Контроллер	Данные датчиков	Командный сигнал	Оптимизация режима

В предложенной структуре тепловой и электрический контуры функционально связаны через систему управления. При высокой солнечной радиации коллектор обеспечивает основной тепловой поток, а PV-модуль — электрическую нагрузку. При снижении радиации тепловой аккумулятор может компенсировать часть теплового дефицита, тогда как электрическая подсистема продолжает обеспечивать циркуляцию воздуха при наличии достаточного PV-ресурса или электрического накопителя.

7. Научная новизна и направление дальнейшего экспериментального исследования

В рамках адаптации исходной конструкции научный интерес представляет не простое добавление PV-панелей, а согласованное управление двумя потоками солнечной энергии — тепловым и электрическим. Тепловая часть должна обеспечивать требуемую температуру и потенциал испарения влаги, тогда как электрическая часть должна обеспечивать необходимую интенсивность циркуляции воздуха и работу измерительно-управляющей системы. Для подтверждения энергетической эффективности предлагаемой системы необходимо провести экспериментальное сравнение как минимум двух конфигураций: солнечно-тепловой сушилки без PV-автоматизации и интегрированной солнечно-тепловой–PV сушилки. При наличии теплового аккумулятора целесообразно также оценить работу в переходные периоды после снижения солнечной радиации. Ключевыми результатами будущих испытаний должны стать: продолжительность сушки; изменение влажности продукта во времени; температура и относительная влажность сушильного воздуха; скорость воздуха; полезная тепловая энергия коллектора; электрическая энергия PV-модуля; потребление вентилятора и автоматики; удельное энергопотребление; коэффициент использования солнечной энергии и общая энергетическая эффективность.

8. Заключение

На основе конструкции и экспериментальной базы интегрированной солнечно-биомассовой сушильной системы сформирована адаптированная концепция сушилки, соответствующая направлению исследования «Повышение энергетической эффективности сушильного устройства на основе интеграции солнечных тепловых и фотоэлектрических систем». Основным принципом является функциональное разделение солнечной энергии на тепловой и электрический контуры.

Солнечный тепловой коллектор должен обеспечивать нагрев сушильного воздуха, а фотоэлектрический модуль — питание вентилятора, датчиков и системы автоматического управления. Тепловой аккумулятор может использоваться для стабилизации теплового режима

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

при кратковременном снижении солнечной радиации. Такая архитектура непосредственно связана с перспективным направлением, отмеченным в исходном исследовании, где интеграция PV-панелей для питания циркуляционных вентиляторов рассматривается как способ создания полностью возобновляемой сушильной системы.

Литературные экспериментальные данные показывают, что интегрированная солнечно-биомассовая система способна существенно сократить продолжительность сушки: 14,5 ч против 30,2 ч для солнечной и 38,5 ч для открытой сушки при снижении влажности банана с 68,2% до 18% на влажной основе. Эти результаты подтверждают целесообразность дальнейшего исследования интегрированных энергетических архитектур, однако показатели именно солнечно-тепловой-PV системы должны быть определены экспериментально.

Таким образом, следующий этап исследования должен быть направлен на экспериментальное определение энергетического баланса теплового и электрического контуров, установление оптимального режима воздушного потока и оценку прироста энергетической эффективности за счёт автономного PV-питания системы циркуляции и управления.

Литература

1. Huang M., Chen Q., Phool D. Performance optimization towards sustainable agricultural processing: Copper enhanced hybrid solar biomass drying technology helps China's rural energy conservation and emission reduction. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2026;83:108190. DOI: 10.1016/j.csite.2026.108190.
2. Boughali S., Benmoussa H., Bouchekima B., Mennouche D., Bouguettaia H., Bechki D. Crop drying by indirect active hybrid solar-electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*. 2009;83:2223–2232.
3. Ndukwa M.C., Bennamoun L., Abam F.I., Eke A.B., Ukoha D. Energy and exergy analysis of a solar dryer integrated with sodium sulfate decahydrate and sodium chloride as thermal storage medium. *Renewable Energy*. 2017;113:1182–1192.
4. Ndukwa M.C., Bennamoun L. Potential of integrating $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ pellets in solar drying system. *Drying Technology*. 2018;36:1017–1030.
5. Madhlopa A., Ngwalo G. Solar dryer with thermal storage and biomass backup heater. *Solar Energy*. 2007;81:449–462.
6. Sharma A., Chen C.R., Vu Lan N. Solar-energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13:1185–1210.
7. Anyanwu C.N., Oparaku O.U., Onyegegbu S.O., Egwuatu U., Edem N.I., Egbuka K., Nwosu P.N., Sharma V.K. Experimental investigation of a photovoltaic-powered solar cassava dryer. *Drying Technology*. 2012;30:398–403.
8. Pirasteh G., Saidur R., Rahman S.M.A., Rahim N.A. A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:133–148.