

УДК 621.382.8
AGRIS P05

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/87/26>

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

- ©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, i_yusupjan@mail.ru
- ©Тынышова Т. Д., канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru
- ©Джаманкызов Н. К., д-р физ.-мат. наук, Институт физики им. академика Ж. Ж. Жээнбаева НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан, nasip49@gmail.com
- ©Жумалиев К. М., д-р техн. наук, акад. НАН КР, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, zhum_k_m@mail.ru

COMBINED SYSTEMS OF PHOTOELECTRIC AND THERMAL CONVERSIONS OF SOLAR ENERGY

- ©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, i_yusupjan@mail.ru
- ©Tynyshova T., Ph.D., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru
- ©Dzhamankyzov N., Dr. habil., Institute of Physics named after Academician Zh. Zh. Zheenbaev of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com
- ©Zhumaliev K., Dr. habil., Academician of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, zhum_k_m@mail.ru

Аннотация. Проведен краткий обзор исследований в области разработки комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Теоретическими, численными и экспериментальными методами исследования в области разработок комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, проводятся уже почти четыре десятилетия. Исследователи и специалисты неоднократно предлагали и оценивали различные типы комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Если приглядеться к истории этих разработок, то видно, что в начале работы основные усилия были направлены на фундаментальные теории, консолидацию концептуальных идей и технико-экономическое обоснование основных конфигураций конструкции коллектора комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. К началу 2000-х годов исследования комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, были больше связаны с улучшением конструкции коллектора и оценкой эффективности затрат. Были проведены более строгие анализы явлений переноса энергии и массы на обычных коллекторах с экспериментальной проверкой. Стали появляться идеи комплексного проектирования зданий, и демонстрационные проекты стали доступны для документации. Однако в последнее десятилетие акцент в целом сместился в сторону разработки дополнительных продуктов, инновационных систем, процедур тестирования и оптимизации конструкции. Численный анализ становится более полным с

использованием мощных аналитических инструментов. Особое внимание уделялось мониторингу надежности продукта, надежности системы и воздействия на окружающую среду. Ожидается, что комбинированные системы, состоящие из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, будут более широко использоваться в ближайшем будущем, в первую очередь из-за экологической необходимости.

Abstract. The article provides a brief overview of research in the development of combined systems consisting of photovoltaic and thermal solar energy converters. Theoretical, numerical and experimental methods of research in the field of development of combined systems, consisting of photovoltaic and thermal converters of solar energy, have been carried out for almost four decades. Researchers and specialists have repeatedly proposed and evaluated various types of combined systems consisting of photovoltaic and thermal solar energy converters. If you look closely at the history of these developments, you can see that at the beginning of the work, the main efforts were directed to fundamental theories, the consolidation of conceptual ideas and a feasibility study of the main configurations of the design of the collector of combined systems consisting of photovoltaic and thermal solar energy converters. By the early 2000s, research on combined systems consisting of photovoltaic and thermal solar energy converters was more about improving collector design and cost-effectiveness evaluation. More rigorous analyzes of energy and mass transfer phenomena have been carried out on conventional collectors with experimental verification. Ideas for integrated building design began to emerge, and demonstration designs became available for documentation. However, in the last decade, the focus has generally shifted towards the development of complementary products, innovative systems, testing procedures, and design optimization. Numerical analysis becomes more complete with powerful analytical tools. Particular attention was paid to monitoring product reliability, system reliability and environmental impact. It is expected that combined systems consisting of photovoltaic and thermal solar energy converters will be more widely used in the near future, primarily due to environmental necessity.

Ключевые слова: фотоэлектрические системы, тепловая энергия, фотоэлементы.

Keywords: photovoltaic systems, thermal energy, photovoltaic cells.

Комбинированная система, состоящая из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, представляет собой комбинацию фотоэлектрических преобразующих систем или отдельных элементов и устройств преобразования солнечной энергии в тепло или, также, в электрическую энергию. Т. е. такие системы позволяют одновременно получать как электрическую энергию, так и тепловую энергию для отопления или нагрева воды. В этой комбинации фотоэлектрический преобразователь используется, по сути, как элемент теплопоглощающего устройства [1]. По этой причине в таких системах не просто располагают последовательно фотоэлектрические и тепловые преобразующие устройства — здесь, практически, один из типов преобразующих устройств интегрирован в другой. Для осуществления такой интеграции используют различные подходы. В качестве устройств поглощения солнечной энергии чаще всего используются коллекторы воздушного, водного или на основе испарения типов. Используют также солнечные элементы на основе различных модификаций кремния, тонкопленочные солнечные элементы, даже потоки жидкости, которые вызывают принудительно, либо это естественные потоки. Системы могут быть автономными или интегрированными в различные внутренние структуры зданий и т. д. На различие характеристик всех типов таких комбинированных систем могут влиять любые

факторы, начиная от устройств, которые обеспечивают предварительный нагрев воды или воздуха, подаваемого в комбинированную систему, и кончая системой охлаждения фотоэлектрического концентратора. Необходимо учитывать, что такие важные характеристики комбинированной системы, состоящей из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, как ее эффективный режим работы, рабочая температура, к. п. д., определяются видом коллектора, тем, как соотносятся электрическая и тепловая мощности комбинированной системы и коэффициентом использования солнечной энергии, падающей на поглощающие устройства. Последние почти 40 лет характеризуются ростом исследований в области разработки комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Однако реальных прорывных идей в этом направлении до сих пор нет. *Целью данной статьи* является анализ исследований в этом направлении, начиная с первых разработок таких комбинированных систем.

Базовые разработки комбинированных систем преобразования солнечной энергии

Пороговая энергия фотонов, которая может быть преобразована в электрическую энергию солнечными элементами, определяется шириной запрещенной зоны полупроводников, используемых в этих элементах. Если энергия фотонов меньше ширины запрещенной зоны, то невозможен переход электронов в зону проводимости, невозможно образование пар электрон-дырка, а это значит, что не возможен процесс формирования электрического тока. Вся энергия фотонов в этом случае идет в основном на нагрев вещества. Все достижения современных технологий в области создания солнечных элементов ограничивают преобразование солнечной энергии в электрическую диапазоном 5–18%, в зависимости от типа используемых солнечных элементов и условий работы. Т. е. более 60% солнечной энергии, поглощаемой солнечными элементами, тратится на нагрев этих элементов, и это после учета отраженной от поверхности части солнечной энергии. Результатом может стать значительный перегрев солнечных элементов, часто превышающий температуру окружающей среды на 45°C и более температуры окружающей среды. Последствиями подобного перегрева солнечных элементов могут быть следующие негативные факторы: а) снижение эффективности солнечных элементов в среднем, приблизительно, на 0,35% на каждый градус роста температуры солнечного элемента; б) при длительной работе солнечного элемента при повышенных температурах возможно разрушение этих элементов и, значит, невозможность их дальнейшей эксплуатации. Исследования, анализирующие влияние окружающей среды и условий работы фотоэлектрических преобразователей на нее температуру, представлены в работах L. W. Florschuetz [2–3]. Самый простой способ повышения эффективности таких солнечных элементов — это их охлаждение холодным воздухом или даже жидкостью, например водой. Однако, эффективность отбора солнечной энергии значительно повысится, если нагретый при охлаждении солнечных элементов теплоноситель использовать для извлечения из него тепловой энергии. В этом случае выход энергии на единицу площади солнечной ячейки может быть значительно повышен. Это, несомненно, явилось мощным стимулирующим фактором при разработке гибридных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии.

Ранние исследования

Первые работы по исследованиям в области разработки гибридных устройств преобразования солнечной энергии появились еще в конце 1960-х годов. В работах Jr E. Kern C., M. C. Russell, S. D. Hendrie, P. Raghuraman были представлены теоретические и экспериментальные результаты, которые, по сути, явились базовой концепцией гибридных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и

использующих в качестве теплоносителей либо воздух, либо воду [4–6]. Дальнейшие исследования были сосредоточены в основном на системах с плоским коллектором [7–9]. Было представлено много работ, в которых проводился анализ производительности гибридных систем, включающих в себя концентраторы солнечной энергии [10–12].

В работах N. Wang, L. Han, H. He, N. H. Park, K. Koumoto, T. J. Hsueh, J. M. Shieh, Y. M. Yeh J. Zhang, Y. Xuan, L. Yang приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработкам в области создания гибридных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии за период приблизительно в 11–12 лет [13–15]. В исследованиях этих авторов рассмотрены системы с воздушным и водяным охлаждением. Как показали авторы, при работе гибридной системы в стационарном режиме повышенные потери при передаче из-за добавления дополнительной передней стенки не оправдывают снижения тепловых потерь — за пределами критической точки стенка только с одним стеклом собирает больше тепла, чем с двойным стеклом [13]. Аналитические выводы по результатам моделирования процессов перехода показали, что с точки зрения обобщенной энергетической эффективности конструкция с двумя стеклами лучше, чем случай с одним стеклом при использовании систем, представляющих обычные гибридных устройств преобразования солнечной энергии с воздушным охлаждением [14]. При использовании механического управления было показано, что гибридные устройства преобразования солнечной энергии с воздушным охлаждением могут быть самоподдерживающимися в пределах определенных значений таких параметров как коэффициент уплотнения и скорость воздушного потока [11]. Авторами также была предложена стационарная модель для анализа производительности коллектора гибридного устройства преобразования солнечной энергии с воздушным охлаждением, в которую введен составной параболический концентратор солнечной энергии [13, 14]. Дальнейшие исследования характеристик гибридного устройства показали, что тепловая и электрическая мощность растут с увеличением длины поглотителя, расхода воздуха в массовом выражении и уплотняющего коэффициента, но падают с увеличением длины воздуховода. Также были проанализированы экономические аспекты разработки гибридных систем с точки зрения эффективности затрат.

В работе Liao T., Lin B., Yang Z. рассмотрена стационарную модель гибридного устройства преобразования солнечной энергии, позволяющая сравнить производительности одно- и двухтактных коллекторов этих систем. Результаты моделирования показали, что более высокая эффективность двухтактной схемы связана с более значительным охлаждением солнечных элементов и более низкой температурой передней крышки после охлаждения [16]. На основе результатов моделирования была предложена экспериментальная установка [17]. В работе Wu Y. Y., Wu S. Y., Xiao L. был проведен анализ переходных процессов на стандартном коллекторе гибридного устройства преобразования солнечной энергии, для случаев воздушного и водяного отопления соответственно [18]. Сравнительный анализ показал, что более низкий тепловой КПД воздушно-отопительной схемы возникает из-за плохого теплообмена между поглощающей пластиной и протекающим воздухом.

В работе Lin J., Liao T., Lin B. была рассмотрена детальная модель плоской коллекторной системы гибридного устройства преобразования солнечной энергии для случая водяного отопления с целью оценки производительности [19]. Были проведены оценки влияния изменения различных характеристик на КПД. Было показано, что КПД гибридного устройства лежит в диапазоне от 65% до 85%.

Гибридные системы преобразования солнечной энергии

Загрязнение окружающей среды и значительные климатические изменения подтолкнули исследователей в начале 2000-х годов к более активным исследованиям в области разработки комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и представляющих собой комбинацию фотоэлектрических преобразующих систем или отдельных элементов и устройств преобразования солнечной энергии в тепло или, также, в электрическую энергию. Кроме того, возник интерес к разработке различных фотоэлектрических систем, встроенных непосредственно в здания. Коллекторы гибридных устройств преобразования солнечной энергии обеспечивают архитектурное единообразие фасада здания и выглядят лучше, чем два отдельных устройства фотоэлектрических и солнечных тепловых коллекторов, расположенных рядом [20–21].

Одна из первых разработок комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, в которой использовались концентраторы солнечной энергии, рассмотрена в работе Huang M. J., Eames P. C., Hewitt N. J. [22]. Предложенная система была рассчитана на 20-кратную концентрацию солнечной энергии. В системе использовался постоянный проток охлаждающей жидкости, что позволило снизить температуру нагревающей ячейки со стандартных 86°C в солнечный день до 47°C. В работе Huang M. J., Eames P. C., Norton B. впервые предложен вариант концентратора в виде решетки с использованием отражающей оптики и одноосного контроля [23]. В работе Maiti S. рассмотрен случай неоднородного освещения, для которого проведен анализ распределения температуры на солнечном элементе при наличии концентрации, причем элемент электрически изолирован от системы отвода тепла [24].

Также было рассмотрено сочетание комбинированной системы, состоящей из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, и солнечного теплового насоса. Такой подход позволил достичь более высокой температуры подачи горячей воды и лучшего охлаждения фотоэлектрического преобразователя. С этой целью было осуществлено прямое соединение панели гибридной комбинированной системы, предназначенной для прямого расширения хладагента, с системой теплового насоса. При такой схеме соединения охлаждающая жидкость испаряется в трубке под плоским коллектором, который теперь является испарителем комбинированной системы преобразования солнечной энергии. Предложенная схема соединения предполагает, что солнечная энергия поглощается в испарителе комбинированной системы преобразования солнечной энергии, температура которого ниже температуры окружающей среды, а затем высвобождается в конденсаторе, охлаждаемом водой, при более высокой температуре. В этом случае эффективность ячейки гибридной системы выше, чем в отсутствие теплового насоса. Коэффициент полезного действия теплового насоса при использовании жидкого теплоносителя также становится выше из-за более высокой температуры испарения, чем у теплового насоса с воздушным охладителем. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент полезного действия теплового насоса может достигать 5,5–6,5 при условии поступления горячей воды в конденсатор при 45 °C. Анализ показал, что наличие солнечных элементов мало влияет на тепловые характеристики подобной комбинированной системы. Однако, может возникнуть сложность в управлении системой.

*Разработки плоских коллекторов для комбинированных устройств,
состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии за
последние двадцать лет*

Использование в качестве охлаждающего агента воздуха позволяет реализовать простое и экономичное решение для охлаждения фотоэлектрического преобразователя солнечной

энергии, причем охлаждающий воздух может нагреваться до различных значений температуры посредством принудительного или естественного прохождения воздуха. Принудительная циркуляция более эффективна, чем естественная циркуляция, благодаря лучшему конвективному теплообмену и теплопередаче, но затраты на работу вентилятора снижают чистый прирост электроэнергии.

В работе Aelenei L., Pereira R., Gonçalves H., Athienitis A. представлены результаты испытаний на открытом воздухе коллекторов комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии с воздушным охлаждением и с водяным охлаждением различных конструктивных моделей для горизонтального монтажа [25]. Исследования показали, что производственные затраты на коллекторы комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии с воздушным охлаждением примерно на 6% выше, чем на отдельные фотоэлектрические модули. Для случая водяного охлаждения около 9%, и около 11%, если учесть стоимость всей системы. Для уменьшения затенения между параллельно расположенными рядами коллекторных устройств было предложено размещение недорогих усиливающих диффузных отражателей, что позволило увеличить солнечное излучение, поступающее на поверхности коллекторов. Результаты экспериментальных испытаний показали значения теплового к.п.д. в диапазоне от 39% до 77% для коллекторов комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии с воздушным охлаждением и от 57% до 82% для случая водяного охлаждения.

Опираясь на широко известные теоретические модели, авторы в работе Malvi S. S., Dixon-Hardy D. W., Crook R. показали возможность улучшения путем добавления подвешенного металлического листа в середине воздушного канала и устройств с ребристой структурой на противоположной стенке канала, по которому проходит охлаждающий воздух [26]. Однако, было установлено, что эти недорогие усовершенствования более эффективны при небольшой длине коллектора, обычно меньше 5 м. И, тем не менее, это позволяет использовать их в комбинированных устройствах, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии с воздушным охлаждением. Было также показано, что влияние длины канала, массового расхода или общей длины системы на энергопотребление вентилятора оказалось незначительным.

В работе Zhang P., Li Q., Xuan Y. M. были рассмотрены различные структуры фотоэлектрических преобразователей, использующим двойное фотоэлектрическое стекло и стекло с тедларом [27]. Были получены ряд аналитических соотношений для электрического к. п. д. комбинированной системы с воздушным потоком и без него. Эти соотношения также учитывали, как климатические характеристики, так и параметры конструкции коллекторов. Результаты экспериментов также показали, что фотоэлектрические преобразователи с двойным стеклом позволяют достичь более высокой температуры поступающего воздуха и электрического к. п. д.

В работе Kraemer D., Poudel B., Feng H. P., Caylor J. C., Yu B., Yan X., Chen G. рассмотрено комбинированное устройство, состоящее из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, использующее коллектор с двумя типами охлаждения одновременно – водяным и воздушным. Были предложены различные схемы размещения водяного теплообменника внутри воздушного канала. Как показал анализ, наибольшая эффективность достигается, когда водяной теплообменник располагается на тыльной поверхности фотоэлектрического модуля [28].

В работе Ma T., Yang H., Zhang Y., Lu L., Wang X. предложена разработка комбинированного устройства, состоящего из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, использующее коллектор с двумя типами охлаждения одновременно и сочетающий в себе функции предварительного нагрева воздуха и производства горячей воды для бытовых нужд [29]. Проект предусматривает различное расположение секции теплового солнечного коллектора и секции фотоэлектрических модулей. В результате более высокие температуры жидкости позволяют подключать такие компоненты, как устройства солнечного охлаждения летом, и облегчают прямую систему горячего водоснабжения без необходимости в дополнительном вспомогательном нагревательном устройстве. Как показал анализ, при выборе оптимальной длины коллектора и массового расхода тепловой к. п. д. может достигать 75%.

Комбинированные системы, встроенные в здания

С самых общих позиций рассмотрена возможность использования комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения, в работе Исманова Ю. Х., Ниязова Н. Т., Джаманкызова Н. К., Жумалиева К. М. [30]. Анализ показал, фасады и крыши домов хорошо подходят для установки комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной, которые одновременно производят тепло, свет и электричество. Эффективность таких систем, встроенных в здания достаточно высока, причем такая система не требует дополнительных системных затрат, за исключением датчиков внешней освещенности для оптимизации усиления от дневного освещения.

В 2002–2003 гг. в Дании были осуществлены проекты по реконструкции зданий под комбинированные системы при финансовой поддержке ЕС. Проекты включали проверку различных систем вентиляции с фотоэлектрическими батареями, оценку различных способов архитектурной интеграции, производительность теплообменника воздух-воздух и прямое соединение вентиляторов постоянного тока с фотоэлектрическими выходами. Исследования показали, что эффективность предварительного нагрева свежим воздухом очень низкая, так как использовалось только около одной трети прямого предварительного нагрева солнцем. Это приводит к значительным потерям тепла из здания на солнечную стену, а не использование солнечного излучения. Было предложено охлаждать фотоэлектрические панели с обратной стороны за счет естественной вентиляции в летнее время, чтобы уменьшить затраты на активную вентиляцию.

В работе Исманова Ю. Х., Ниязова Н. Т., Джаманкызова Н. К., Жумалиева К. М. численными методами проанализировали энергетические характеристики комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения с вентиляционным воздушным зазором за фотоэлектрическими модулями в высотном здании [30]. Было показано, что присутствие промежутка для свободного прохождения воздушного потока особо не сказывается на электрических характеристиках, однако, уменьшает теплопередачу сквозь торец фотоэлектрических блоков.

В работе Исманова Ю. Х., Тынышовой Т. Д., Алымкулова С. А. исследовали варианты комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии для здания отеля [31]. Торец комбинированного устройства был пристроен к помещению с круглосуточным кондиционированием воздуха. Анализ эффективности охлаждения фотоэлектронного блока с помощью естественного потока воздуха за фотоэлектронными блоками был проведен двумя способами: 1. в первом способе были

проделаны свободные отверстия со всех сторон воздушного зазора; 2. Во втором способе использовался закрытый воздушный зазор в качестве устройства предварительного подогрева воздуха солнечным излучением. Проводилось сравнение с обычным использованием комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения. Полученные данные показали, что особых различий в трех типах использования комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения, нет. Сделан вывод, что полученные результаты были вызваны обратным потоком в воздушном зазоре в ночное время из-за эффекта круглосуточного охлаждения помещения и что как климатические условия, так и режим работы комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения существенно влияют на производительность фотоэлектрических систем.

Основная трудность при анализе производительности комбинированных устройств, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и встроенных в различные сооружения и имеющих воздушный зазор, заключается в оценке теплового баланса для него. После того, как температурный профиль и ситуация с затенением от солнца определены, можно легко определить электрические характеристики. Однако теплофизический анализ может вызвать значительные затруднения. Оценка коэффициентов конвективной теплоотдачи далеко не однозначна, поскольку в реальных процессах присутствует смесь вынужденной и естественной конвекций, ламинарного и турбулентного течений и одновременно развивающегося течения на входе воздуха. Внешняя ветровая нагрузка на панели дополнительно усложняет ситуацию. Для полупрозрачного фасада тепловая энергия поступает и передается через воздушную полость как напрямую (на остекление), так и опосредованно (за счет конвекции и излучения). Передача тепла воздушному потоку в вентиляционных шахтах, вероятно, является наиболее сложной для описания задачей.

Гибридные системы, использующие концентраторы солнечной энергии.

Использование концентраторов солнечной энергии в гибридных системах, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии способно увеличить интенсивность излучения солнечных элементов.

Перспективность использования концентраторов солнечной энергии объясняется значительно меньшей стоимостью отражателей по сравнению с солнечными элементами. При использовании солнечных элементов с более высоким к. п. д., которые рассчитаны на более высокий ток, приводит к сильному увеличению стоимости всей гибридной системы. Кроме того, возникают дополнительные затраты, которые возникают в результате использования довольно сложного и дорогого приводного механизма слежения за солнцем [32]. Качество ячейки снижается, когда существует градиент температуры в ячейке. Соединив последовательно ячейки можно увеличить выходное напряжение и, следовательно, уменьшить ток при фиксированной выходной мощности, что приводит к снижению омических потерь. Однако, высокотемпературные ячейки будут ограничивать эффективность всей цепочки [33]. Т. е. контур охлаждающей жидкости должен быть спроектирован таким образом, чтобы поддерживать низкую и равномерную температуру элемента, быть простым и надежным.

Концентраторы с использованием рефракторных или рефлекторных систем обычно делят на три основных типа: одиночные ячейки, с линейной геометрией и плотно упакованные блоки. Для систем с высокой концентрацией требуется больше материала концентратора на

единицу площади поглощающей ячейки. Все это говорит, что в этом случае использование рефракторных систем повысит эффективность всей системы концентрации в большей мере, чем при использовании рефлекторных систем из-за их меньшего веса и стоимости материалов. Однако комплексы концентраторов, в которых используются рефракторные системы, не могут сфокусировать рассеянный свет, что делает проблематичной их использование в местах, где погода в основном ясная.

Но, надо отметить, жидкостное охлаждение системы более эффективно, чем воздушное с точки зрения повышения электрической мощности. Как следствие, комбинированные устройства, состоящие из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и использующие концентраторы солнечной энергии отражательного типа, широко используются в системах горячего водоснабжения со средней и высокой температурой, применяемых для охлаждения, опреснения или других промышленных процессов. При более низких рабочих температурах отсутствие концентратора приводит к более высокой эффективности, чем комбинированная система с наличием концентратора солнечной энергии, когда оба они обращены прямо к солнцу. Однако эффективность системы без концентратора будет уменьшаться, когда рабочая температура будет постепенно увеличиваться. Это связано с тем, что при более высоком перепаде температур большая открытая поверхность одиночного коллектора вызывает большие тепловые потери.

В «Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной» представлен результат работы прототипа комбинированного устройства, состоящего из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, с низкой концентрацией солнечной энергии, солнечный коллектор которого представляет собой комбинацию плоского пластинчатого коллектора с каналом ниже фотоэлектрического модуля и концентратора Френеля линейного типа [34]. В устройстве была использована система слежения за движением солнца двухосного типа. Эффективность указанной системы оказалась выше 65% при коэффициенте концентрации выше 7. Теоретический анализ, проведенный в исследовании, показал, что на эффективность сильно влияет теплопроводность поглощающей ячейки.

Гибридная система, состоящая из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии с концентратором солнечной энергии, предназначенная для одиночного отслеживания, была рассмотрена в работе «Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной» [34]. Это система с прямым желобом, в которой последовательность ячеек охлаждается водой с антифризом и антикоррозионными добавками, протекающей по алюминиевой трубе с нанесенными с внутренней стороны ребрами. Через отражатели параболического типа в комбинации стекла и металла с коэффициентом отражения 94% и степенью концентрации 38, свет фокусируется на панели из солнечных элементов на основе кремния (с эффективностью преобразования около 21% в стандартных условиях), подключенные к приемнику. Полученные результаты измерений в стандартных рабочих условиях дали тепловой к. п. д. около 60 %, электрический к. п. д. около 12%, а объединенный к. п. д. достигал 70%.

Принимая во внимание факт, что дальность переброски тепла ограничена, в работе Исманова Ю. Х., Алымкулова С. А. рассмотрена практически портативная фотоэлектрическая система с наличием концентратора солнечной энергии, которую можно установить на любой крыше [35]. Степень концентрации солнечной энергии в указанной системе достигает 600, что приводит к значительному уменьшению площади солнечного элемента. В основе концентратора солнечной энергии небольшая параболическая тарелка, похожая на спутниковую тарелку, которую достаточно легко переносить и управлять ею без использования

специальных приспособлений. Показано, что снизить стоимость такого концентратора солнечной энергии можно взяв за основу параболического отражателя стальную конструкцию, покрытую тонкой алюминиевой фольгой. Таким образом, концентратор выигрывает за счет хороших механических свойств стали и высокой отражательной способности алюминия.

Кроме того, параболический отражатель из нержавеющей стали требует меньшую поддержку, чем алюминиевый отражатель. Это приводит к более равномерному распределению света по ячейкам и, следовательно, к лучшей эффективности ячеек. В странах, расположенных в высоких широтах, солнечная активность сильно меняется в течение года из-за высокой облачности в зимние месяцы и, таким образом, сосредоточена в небольшом временном интервале сильного излучения. Это делает привлекательным использование экономичных стационарных рефлекторов или концентраторов. В работе Жумалиева К. М., Алымкулова С. А., Исманова Ю. Х., Исмаилова Д. А. рассмотрены результаты испытаний асимметричной комбинированной параболической отражательной системы с двумя усеченными параболическими отражателями, изготовленными из алюминия и покрытой алюминием, стали соответственно [36]. Представленные измерения, тем не менее, показали, что замена заднего отражателя из алюминия на покрытую алюминием сталь не влияет на выходную мощность. Также было обнаружено, что оптимальное положение камеры — лицом к переднему отражателю. Это приведет к минимальной стоимости производства электроэнергии, при условии отсутствия ограничений по площади. Для ограниченного пространства на крыше, например, в жилых зданиях, они рекомендуют размещать солнечные элементы с обеих сторон поглотителя, поскольку стоимость добавления элементов на другую сторону поглотителя относительно низка, если желоб с солнечными элементами на одной стороне уже установлен.

В работах Тынышова Т. Д., Жумалиева К. М., Алымкулова С. А., Исманова Ю. Х., Исмаилова Д. А. представлены теоретические исследования двухступенчатой гибридной системы, состоящей из солнечной батареи в комплекте с концентратором солнечной энергии и преобразователем тепловой энергии в электрическую или механическую [31, 36]. В работах рассмотрены два основных варианта:

(а) Система, разделяющая солнечное излучение на составляющие солнечного спектра;

(б) Система, использующая солнечный спектр в полном объеме, без деления, и, как следствие, включающая солнечную батарею, работающую при высокой температуре.

Вариант (а) дает возможность солнечной батарее работать при низкой температуре окружающей среды, однако, при этом необходимо использовать достаточно дорогие солнечные батареи, которые не поглощают и не рассеивают солнечное излучение в инфракрасном диапазоне. Анализ результатов показал, что при коэффициенте концентрации до 1600 эффективность системы преобразования может достигать значений 37–42%. В случае (б) солнечная батарея подвергается воздействию концентрированного солнечного излучения. При использовании одноступенчатого элемента на основе GaAs с эффективностью при комнатной температуре 25% и концентратора солнечной энергии при 50°C полная эффективность преобразования составляет около 26–31%, а при более высоком коэффициенте концентрации и может быть даже выше.

Имеется множество публикаций о теоретических и экспериментальных результатах комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, однако тех, в которых сообщается о реальных полномасштабных испытаниях и долгосрочном мониторинге комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, немного. Количество находящихся в эксплуатации коммерческих систем остается небольшим. В основном

представлены плоские коллекторные системы, имеющие ограниченный срок службы, причем опыт эксплуатации таких систем разбросан. За последние два десятилетия были реально введены в строй более 50 проектов комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Менее 25 из них – это комбинированные системы, состоящие из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии и имеющие водяное охлаждение. Что в настоящее время необходимо, так это документация долгосрочного мониторинга производительности систем, включая опыт эксплуатации и проблемы, возникающие в реальных проектах.

Рабочие характеристики коммерческих продуктов комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, можно тестировать как на открытом воздухе, так и в помещении. Испытание на открытом воздухе необходимо проводить в устойчивых условиях хорошей погоды, которая должна быть около полудня и желательно при ясном небе и без ветра. Часто это сделать довольно сложно. Например, для Северной Европы получение кривой эффективности может занять до семи месяцев. Тестирование в помещении может быть более быстрым и дает воспроизводимые результаты. Однако до сих пор не существует требований к закрытым помещениям для стандартизированной процедуры испытаний коллекторов комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Предоставление признанного на международном уровне метода тестирования является одним из важных шагов для продвижения продуктов комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии на коммерческом рынке и обеспечения их конкурентоспособности по сравнению с отдельными солнечными тепловыми и фотоэлектрическими панелями.

Выводы

Теоретическими, численными и экспериментальными методами исследования в области разработок комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, проводятся уже почти четыре десятилетия. Исследователи и специалисты неоднократно предлагали и оценивали различные типы комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии. Если приглядеться к истории этих разработок, то видно, что в начале работы основные усилия были направлены на фундаментальные теории, консолидацию концептуальных идей и технико-экономическое обоснование основных конфигураций конструкции коллектора комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии.

К началу 2000-х годов исследования комбинированных систем, состоящих из фотоэлектрического и теплового преобразователей солнечной энергии, были больше связаны с улучшением конструкции коллектора и оценкой эффективности затрат. Были проведены более строгие анализы явлений переноса энергии и массы на обычных коллекторах с экспериментальной проверкой. Стали появляться идеи комплексного проектирования зданий, и демонстрационные проекты стали доступны для документации.

Однако в последнее десятилетие акцент в целом сместился в сторону разработки дополнительных продуктов, инновационных систем, процедур тестирования и оптимизации конструкции. Численный анализ становится более полным с использованием мощных аналитических инструментов. Особое внимание уделялось мониторингу надежности продукта, надежности системы и воздействия на окружающую среду. Ожидается, что комбинированные системы, состоящие из фотоэлектрического и теплового преобразователей

солнечной энергии, будут более широко использоваться в ближайшем будущем, в первую очередь из-за экологической необходимости.

Список литературы:

1. Wolf M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences // *Energy Conversion*. 1976. V. 16. №1-2. P. 79-90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)
2. Florschuetz L. W. On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration // 11th photovoltaic specialists conference. 1975. P. 318-326.
3. Florschuetz L. W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors // *Solar energy*. 1979. V. 22. №4. P. 361-366. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7)
4. Kern Jr E. C., Russell M. C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. – Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab., 1978. – №. COO-4577-3; CONF-780619-24.
5. Hendrie S. D. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab., 1979. №COO-4577-8; CONF-790541-54.
6. Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/Thermal, flat-plate collector performance. 1981. V. 103. P. 291–298. <https://doi.org/10.1115/1.3266256>
7. Cox Iii C. H., Raghuraman P. Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors // *Solar energy*. 1985. V. 35. №3. P. 227-241. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90102-1)
8. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // *Applied energy*. 2010. V. 87. №2. P. 365-379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
9. Kraemer D., McEnaney K., Chiesa M., Chen G. Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications // *Solar Energy*. 2012. V. 86. №5. P. 1338-1350. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.025>
10. Gou X., Xiao H., Yang S. Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system // *Applied energy*. 2010. V. 87. №10. P. 3131-3136. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.013>
11. Van Sark W. Feasibility of photovoltaic–thermoelectric hybrid modules // *Applied Energy*. 2011. V. 88. №8. P. 2785-2790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.008>
12. Moh'd A A. N., Tashtoush B. M., Jaradat A. A. Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate // *Energy*. 2015. V. 90. P. 1239-1250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.090>
13. Wang N., Han L., He H., Park N. H., Koumoto K. A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device // *Energy & Environmental Science*. 2011. V. 4. №9. P. 3676-3679. <https://doi.org/10.1039/C1EE01646F>
14. Hsueh T. J., Shieh J. M., Yeh Y. M. Hybrid Cd-free CIGS solar cell/TEG device with ZnO nanowires // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2015. V. 23. №4. P. 507-512. <https://doi.org/10.1002/ppa.2457>
15. Zhang J., Xuan Y., Yang L. Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems // *Energy*. 2014. V. 78. P. 895-903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.087>
16. Liao T., Lin B., Yang Z. Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. V. 77. P. 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.013>

17. Dallan B. S., Schumann J., Lesage F. J. Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system // *Solar Energy*. 2015. V. 118. P. 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.034>
18. Wu Y. Y., Wu S. Y., Xiao L. Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover // *Energy Conversion and Management*. 2015. V. 93. P. 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.013>
19. Lin J., Liao T., Lin B. Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system // *Energy Conversion and Management*. 2015. V. 105. P. 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.054>
20. Ismail K. A. R., Goncalves M. M. Thermal performance of a PCM storage unit // *Energy conversion and management*. 1999. V. 40. №2. P. 115-138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00042-9)
21. Huang M. J., Eames P. C., Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials // *International Journal of heat and mass transfer*. 2004. V. 47. №12-13. P. 2715-2733. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>
22. Huang M. J., Eames P. C., Hewitt N. J. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. №13. P. 1951-1960. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.02.002>
23. Huang M. J., Eames P. C., Norton B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics // *Solar energy*. 2006. V. 80. №9. P. 1121-1130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>
24. Maiti S. et al. Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix // *Solar energy*. 2011. V. 85. №9. P. 1805-1816. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.021>
25. Aelenei L., Pereira R., Gonçalves H., Athienitis A. Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation // *Energy Procedia*. 2014. V. 48. P. 474-483.2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056>
26. Malvi C. S., Dixon-Hardy D. W., Crook R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material // *Solar Energy*. 2011. V. 85. №7. P. 1440-1446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.027>
27. Zhang P., Li Q., Xuan Y. M. Thermal contact resistance of epoxy composites incorporated with nano-copper particles and the multi-walled carbon nanotubes // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. V. 57. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.022>
28. Kraemer D., Poudel B., Feng H. P., Caylor J. C., Yu B., Yan X., Chen G. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration // *Nature materials*. 2011. V. 10. №7. P. 532-538. <https://doi.org/10.1038/nmat3013>
29. Ma T., Yang H., Zhang Y., Lu L., Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 43. P. 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003>
30. Исманов Ю. X., Ниязов Н. Т., Джаманкызов Н. К., Жумалиев К. М. Термоэлектронное преобразование солнечной энергии с использованием гетероструктурного катода // *Бюллетень науки и практики*. 2020. Т. 6. №9. С. 211-221. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/21>
31. Исманов Ю. X., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // *Вестник*

Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2017. №3. С. 171-178.

32. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д., Абдулаев А. А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. №3. С. 98-102.

33. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // Journal of optics. 1995.V. 26. №1. P. 25.

34. Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной // Материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.

35. Исманов Ю. Х., Алымкулов С. А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. №7. С. 3-5.

36. Жумалиев К. М., Алымкулов С. А., Исманов Ю. Х., Исмаилов Д. А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. №3(39). Ч. I. С. 56-60.

References:

1. Wolf, M. (1976). Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 16(1-2), 79-90. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8)

2. Florschuetz, L. W. (1975, May). On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight concentration. In *11th photovoltaic specialists conference* (pp. 318-326).

3. Florschuetz, L. W. (1979). Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar energy*, 22(4), 361-366. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7)

4. Kern Jr, E. C., & Russell, M. C. (1978). *Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems* (No. COO-4577-3; CONF-780619-24). Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab.

5. Hendrie, S. D. (1979). *Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors* (No. COO-4577-8; CONF-790541-54). Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab.

6. Raghuraman, P. (1981). Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. <https://doi.org/10.1115/1.3266256>

7. Cox Iii, C. H., & Raghuraman, P. (1985). Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. *Solar energy*, 35(3), 227-241. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90102-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90102-1)

8. Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied energy*, 87(2), 365-379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>

9. Kraemer, D., McEnaney, K., Chiesa, M., & Chen, G. (2012). Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications. *Solar Energy*, 86(5), 1338-1350. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.025>

10. Gou, X., Xiao, H., & Yang, S. (2010). Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Applied energy*, 87(10), 3131-3136. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.013>

11. Van Sark, W. G. J. H. M. (2011). Feasibility of photovoltaic-thermoelectric hybrid modules. *Applied Energy*, 88(8), 2785-2790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.008>

12. Moh'd A, A. N., Tashtoush, B. M., & Jaradat, A. A. (2015). Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate. *Energy*, 90, 1239-1250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.090>
13. Wang, N., Han, L., He, H., Park, N. H., & Koumoto, K. (2011). A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3676-3679. <https://doi.org/10.1039/C1EE01646F>
14. Hsueh, T. J., Shieh, J. M., & Yeh, Y. M. (2015). Hybrid Cd-free CIGS solar cell/TEG device with ZnO nanowires. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(4), 507-512.. <https://doi.org/10.1002/pip.2457>
15. Zhang, J., Xuan, Y., & Yang, L. (2014). Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems. *Energy*, 78, 895-903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.087>
16. Liao, T., Lin, B., & Yang, Z. (2014). Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.013>
17. Dallan, B. S., Schumann, J., & Lesage, F. J. (2015). Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system. *Solar Energy*, 118, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.034>
18. Wu, Y. Y., Wu, S. Y., & Xiao, L. (2015). Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover. *Energy Conversion and Management*, 93, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.013>
19. Lin, J., Liao, T., & Lin, B. (2015). Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 105, 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.054>
20. Ismail, K. A. R., & Goncalves, M. M. (1999). Thermal performance of a PCM storage unit. *Energy conversion and management*, 40(2), 115-138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00042-9)
21. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of heat and mass transfer*, 47(12-13), 2715-2733. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015>
22. Huang, M. J., Eames, P. C., & Hewitt, N. J. (2006). The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(13), 1951-1960. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.02.002>
23. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar energy*, 80(9), 1121-1130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006>
24. Maiti, S., Banerjee, S., Vyas, K., Patel, P., & Ghosh, P. K. (2011). Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix. *Solar energy*, 85(9), 1805-1816. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.021>
25. Aelenei, L., Pereira, R., Gonçalves, H., & Athienitis, A. (2014). Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation. *Energy Procedia*, 48, 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056>
26. Malvi, C. S., Dixon-Hardy, D. W., & Crook, R. (2011). Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Solar Energy*, 85(7), 1440-1446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.027>

27. Zhang, P., Li, Q., & Xuan, Y. (2014). Thermal contact resistance of epoxy composites incorporated with nano-copper particles and the multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.022>
28. Kraemer, D., Poudel, B., Feng, H. P., Caylor, J. C., Yu, B., Yan, X., ... & Chen, G. (2011). High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. *Nature materials*, 10(7), 532-538. <https://doi.org/10.1038/nmat3013>
29. Ma, T., Yang, H., Zhang, Y., Lu, L., & Wang, X. (2015). Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003>
30. Ismanov, Yu., Niyazov, N., Dzhambankyzov, N., & Zhumaliev, K. (2020). Thermoelectronic Conversion of Solar Energy Using a Heterostructural Cathode. *Bulletin of Science and Practice*, 6(9), 211-221. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/21>
31. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2017). Ispol'zovanie priblizheniya Frenelya dlya rascheta raspredeleniya svetovogo polya, proshedshego skvoz' reshetku. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*, (3), 171-178. (in Russian).
32. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Abdulaev, A. A. (2020). Modelirovanie opticheskoi sistemy, rabotayushchei pri nekogerentnom osveshchenii. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, (3), 98-102. (in Russian).
33. Maripov, A., & Ismanov, Y. (1995). Interferometer based on the Talbot effect in holography. *Journal of optics*, 26(1), 25.
34. Ismanov, Yu. Kh., Dzhambankyzov, N. K., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2018). Vosstanovlenie besshchelevoi raduzhnoi gologrammy kogerentnoi volnoi. In *Materialy VII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov*, Moscow, 596-597. (in Russian).
35. Ismanov, Yu. Kh., & Alymkulov, S. A. (2015). Samoreproduktivirovanie regulyarnykh ob"ektov s ogra-nichennoi aperturoi. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana*, (7), 3-5. (in Russian).
36. Zhumaliev, K. M., Alymkulov, S. A., Ismanov, Yu. Kh., & Ismailov, D. A. (2016). Analiz golograficheskikh interferogramm. *Izvestiya KGTU im. I. Razzakova*, (3(39)), 56-60. (in Russian).

Работа поступила
в редакцию 14.01.2023 г.

Принята к публикации
21.01.2023 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д., Джаманкызов Н. К., Жумалиев К. М. Комбинированные системы фотоэлектрического и теплового преобразований солнечной энергии // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. №2. С. 219-234. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/87/26>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., Tynyshova, T., Dzhambankyzov, N., & Zhumaliev, K. (2023). Combined Systems of Photoelectric and Thermal Conversions of Solar Energy. *Bulletin of Science and Practice*, 9(2), 219-234. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/87/26>