

УДК 621.382.8
AGRIS P05

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/16>

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГИБРИДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 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

©Джаманкызов Н. К., ORCID: 0000-0002-4741-8741, SPIN-код: 1471-6954,
Scopus ID: 7801566578, д-р физ.-мат. наук, Институт физики им. Ж. Ж. Жээнбаева
НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан, nasip49@gmail.com

©Тынышова Т. Д., ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-код: 9917-4190,
ResearcherID: HPB-7352-2023, канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный
технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru

CURRENT STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF HYBRID THERMOELECTRIC SYSTEMS FOR SOLAR ENERGY CONVERSION

©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

©Dzhamankizov N., ORCID: 0000-0002-4741-8741, Scopus ID: 7801566578,
SPIN-code: 1471-6954, Dr. habil., Institute of Physics named after Zh. Zheenbaev of the
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com

©Tynyshova T., ORCID: 0009-0007-5235-7115, ResearcherID: HPB-7352-2023,
SPIN-code: 9917-4190, Ph.D., Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru

Аннотация. В условиях растущего спроса на возобновляемую энергетику гибридные системы, сочетающие солнечную и термоэлектрическую генерацию, привлекают значительное внимание исследователей. Термоэлектрические генераторы, преобразующие тепловую энергию непосредственно в электрическую, предлагают возможность утилизации сбросного тепла от солнечных тепловых коллекторов и фотоэлектрических панелей, тем самым повышая общую эффективность преобразования солнечной энергии. В статье рассматриваются две основные архитектуры систем: фото-термоэлектрические гибриды и солнечно-тепловые термоэлектрические генераторы для преобразования солнечной энергии. Подробно анализируются ключевые задачи, такие как тепловое управление, разработка материалов с высоким значением добротности и оптимизация системной интеграции. Особое внимание уделяется новым материалам (высокоэффективные сегнетоэлектрики, низкоразмерные структуры) и инновационным подходам к дизайну системы. Показано, что работы последних лет в этом направлении сфокусированы на оптимизации теплового контакта между фотоэлектрическим модулем и термоэлектрическим генератором. Исследования показывают, что использование теплопроводящих паст и адгезивов с низким термическим сопротивлением критически важно. Кроме того, активно изучаются системы пассивного и активного охлаждения холодной стороны термоэлектрического генератора (например, с помощью тепловых насосов или микроканальных радиаторов) для максимизации ΔT – температурной разницы между горячей и холодной сторонами гибридных устройств. Моделирование и экспериментальные данные свидетельствуют, что такие гибриды могут увеличить общую эффективность преобразования на 5-15% относительно одиночного

фотоэлектрического модуля, в зависимости от материалов и условий освещения. В заключение обсуждаются перспективы и потенциальные направления для будущих исследований.

Abstract. Amidst growing demand for renewable energy, hybrid systems combining solar and thermoelectric power generation are attracting significant attention from researchers. Thermoelectric generators, which convert thermal energy directly into electricity, offer the possibility of utilizing waste heat from solar thermal collectors and photovoltaic panels, thereby enhancing the overall solar energy conversion efficiency. The article examines two primary system architectures: photo-thermoelectric hybrids and thermoelectric generators for solar energy conversion. Key challenges are analyzed in detail, such as thermal management, the development of materials with high figure-of-merit (ZT) values, and system integration optimization. Particular attention is paid to novel materials (high-efficiency ferroelectrics, low-dimensional structures) and innovative system design approaches. It is shown that recent work in this field has focused on optimizing the thermal contact between the photovoltaic module and the thermoelectric generator. Research indicates that the use of thermally conductive pastes and adhesives with low thermal resistance is critical. Furthermore, passive and active cooling systems for the cold side of the thermoelectric generator (e.g., using heat pumps or microchannel heat sinks) are being actively studied to maximize ΔT – the temperature difference between the hot and cold sides of the hybrid devices. Modeling and experimental data suggest that such hybrids can increase overall conversion efficiency by 5-15% compared to a standalone photovoltaic module, depending on materials and lighting conditions. In conclusion, prospects and potential directions for future research are discussed.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, фотоэлектрическое преобразование, гибридная система, солнечная энергия, эффективность преобразования.

Keywords: thermoelectric generator, photovoltaic conversion, hybrid system, solar energy, conversion efficiency.

Солнечная энергия является одним из самых многообещающих возобновляемых источников. Традиционно её преобразование в электричество осуществляется двумя путями: через фотоэлектрический эффект и через солнечно-тепловые концентраторы. Однако каждая из этих технологий имеет фундаментальные ограничения. Фотоэлектрические панели теряют эффективность с ростом температуры (отрицательный температурный коэффициент), и значительная часть солнечного спектра (в основном, инфракрасная область) рассеивается в виде тепла. Солнечно-тепловые системы, в свою очередь, сталкиваются с проблемами эффективного преобразования тепла высокого потенциала в работу, для чего часто требуются сложные устройства типа двигателей Стирлинга или паровые турбины. Термоэлектрические генераторы, основанные на эффекте Зеебека, предлагают элегантное решение для прямого преобразования теплового потока в электричество. Их преимущества включают бесшумность работы, отсутствие движущихся частей, высокую надежность и способность работать в широком диапазоне температур. Интеграция термоэлектрических генераторов в солнечные энергетические системы позволяет создавать гибридные установки (фото-термоэлектрические генераторы и комплексы, объединяющие солнечные концентраторы и термоэлектрические генераторы), которые могут одновременно или последовательно преобразовывать различные части солнечного спектра, повышая общую эффективность и удельную мощность на единицу площади. Фотоэлектрические технологии достигли высокого уровня зрелости и широкого

практического применения; однако их эффективность по-прежнему фундаментально ограничена тепловыми потерями [1–3].

Значительная часть падающего солнечного излучения, поглощаемого PV-модулями, преобразуется не в электрическую энергию, а в тепло, что приводит к повышению температуры солнечных элементов и, как следствие, к снижению их электрической эффективности. Для кристаллических кремниевых солнечных элементов снижение КПД составляет, как правило, 0,4–0,5 % на каждый градус Цельсия повышения температуры [4].

Это фундаментальное ограничение стимулировало интенсивные исследования гибридных систем преобразования энергии, способных утилизировать часть тепловых потерь [5, 6].

Гибридные фотоэлектрическо-термоэлектрические системы являются одним из таких подходов [7–9].

В этих системах термоэлектрические генераторы интегрируются с фотоэлектрическими модулями для преобразования температурного градиента в дополнительную электрическую энергию за счёт эффекта Зеебека. В идеале фото-термоэлектрические гибриды должны снижать рабочую температуру фотоэлектрического модуля и одновременно обеспечивать дополнительную генерацию электроэнергии [10].

Несмотря на концептуальную привлекательность, фото-термоэлектрические системы сталкиваются с рядом серьёзных научных и инженерных проблем. Температурная разность, доступная на термоэлектрических модулях при неконцентрированном солнечном излучении, как правило, мала, а эффективность термоэлектрических материалов остаётся низкой [11, 12].

В результате реальный выигрыш от интеграции термоэлектрического генератора остаётся предметом активных дискуссий [13–17].

Цель данного обзора – представить современное состояние исследований в области термоэлектрического преобразования солнечной энергии.

Концепция фото-термоэлектрических гибридных устройств направлена на синергетическое использование солнечного спектра: фотоны с энергией выше ширины запрещенной зоны фотоэлектрического материала генерируют электрон-дырочные пары, в то время как оставшиеся низкоэнергетические фотоны и тепло, образующееся в фотоэлектрическом модуле, утилизируются термоэлектрическим генератором [18–22].

Исследования фото-термоэлектрических гибридных устройств перешли от концептуального доказательства к оптимизации, моделированию и решению практических инженерных задач. Основная цель — утилизировать отводимое тепло от солнечного элемента (которое снижает его КПД, особенно при высокой температуре и концентрированном излучении) с помощью термоэлектрического генератора для выработки дополнительной электроэнергии. Ключевые направления исследований:

Тепловое сопряжение: оптимизация теплового контакта между фотоэлектронным модулем и термоэлектрическим генератором, минимизация термических сопротивлений.

Согласование параметров: электрическое и тепловое согласование двух разнородных систем (фотоэлектрического модуля и термоэлектрического генератора) для максимизации общей выходной мощности [23].

Материалы и архитектура: использование спектрально-селективных покрытий, нанофлюидов для охлаждения, разработка новых термоэлектрических материалов (например, теллуриды) и архитектур модулей (сегментированные, многослойные термоэлектрические генераторы) [24].

Моделирование и анализ: детальное математическое и численное моделирование для прогнозирования работы системы в различных условиях [25, 26].

Гибридная система не является простым суммированием двух устройств. Это термоэлектрически связанная каскадная система.

а) Тепловая и механическая интеграция (Последовательная архитектура). Стандартная конфигурация: Солнечный элемент → Теплопроводящий слой (термопаста, припой) → Горячая сторона термоэлектрического генератора → Холодная сторона термоэлектрического генератора → Радиатор (теплоотвод) → Окружающая среда.

Назначение термоэлектрического генератора: Он выступает в роли активного теплового моста. Вместо того чтобы просто рассеивать тепло от фотоэлектрического модуля в окружающую среду (пассивный радиатор), термоэлектрический генератор преобразует часть этого теплового потока в дополнительную электроэнергию, тем самым повышая общую эффективность использования солнечного спектра.

б) Принцип каскадного преобразования энергии. Верхняя ступень (фотоэлектрический модуль): Преобразует высокоэнергетическую часть солнечного спектра (видимый свет, ближний УФ) в электричество. Попутно генерирует тепло как побочный продукт. Нижняя ступень (термоэлектрический генератор): Использует отводимое тепло от фотоэлектрического модуля для создания градиента температуры. Преобразует низкоэнергетическую часть спектра (инфракрасное излучение, которое либо напрямую проходит через фотоэлектрический модуль, либо переизлучается им в виде тепла) в дополнительное электричество. Таким образом, система реализует принцип совместной генерации электричества из одного источника (солнца), минимизируя потери на тепловыделение. Работы последних лет в этом направлении сфокусированы на оптимизации теплового контакта между фотоэлектрическим модулем и термоэлектрическим генератором [27].

Исследования показывают, что использование теплопроводящих паст и адгезивов с низким термическим сопротивлением критически важно. Кроме того, активно изучаются системы пассивного и активного охлаждения холодной стороны термоэлектрического генератора (например, с помощью тепловых насосов или микроканальных радиаторов) для максимизации ΔT [28].

Моделирование и экспериментальные данные свидетельствуют, что такие гибриды могут увеличить общую эффективность преобразования на 5-15% относительно одиночного фотоэлектрического модуля, в зависимости от материалов и условий освещения. Солнечно-тепловой термоэлектрический генератор — это устройство, преобразующее солнечную энергию в электричество через двухстадийный процесс: сначала солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию (концентрируется и поглощается), а затем это тепло напрямую преобразуется в электричество с помощью эффекта Зеебека в термоэлектрическом модуле. Это принципиально отличается от фото-термоэлектрических гибридов, где первичное преобразование — фотоэлектрическое. Ключевая идея в построении таких типов генераторов — это то, что солнечно-тепловой термоэлектрический генератор использует солнечное излучение исключительно как источник тепла. Система не разделяет спектр, а полностью поглощает его, нагревая «горячую сторону» термоэлектрического генератора до высоких температур. Базовая архитектура солнечно-тепловых термоэлектрических генераторов: оптический концентратор (параболическое зеркало, линза Френеля, составной параболический концентратор). Солнечный поглотитель (приемник): высокотемпературное черное тело или селективное покрытие, механически и термически соединенное с горячей стороной термоэлектрического генератора. Термоэлектрический модуль: преобразует градиент температур между нагретым поглотителем и охлаждаемой стороной в электричество. Система охлаждения: радиатор, тепловые трубки, жидкостное охлаждение для поддержания низкой температуры холодной стороны термоэлектрического генератора. Теплоизоляция:

минимизация паразитных тепловых потерь от поглотителя и горячей стороны термоэлектрического генератора в окружающую среду. При анализе принципов работы солнечно-тепловых термоэлектрических генераторов работу генератора можно разбить на несколько основных этапов:

Этап 1. Преобразование солнечной радиации в концентрированное тепло (принцип солнечно-теплового сбора).

Этап 2. Преобразование тепла в электричество (принцип термоэлектрического генератора).

Этап 3. Отвод тепла (принцип эффективного теплоотвода).

Солнечно-тепловые термоэлектрические генераторы обладают рядом преимуществ по сравнению с фото-термоэлектрическими гибридными устройствами. Преимущества солнечно-тепловых термоэлектрических генераторов перед другими технологиями. Простота и надежность, из-за отсутствия движущихся частей (по сравнению с двигателями Стирлинга в солнечно-тепловых установках). Масштабируемость — мощность легко масштабируется добавлением модулей. Работа при рассеянном свете, что позволяет некоторым архитектурам работать без точного слежения за движением солнца. Долговечность: при правильном выборе материалов срок службы может превышать 20 лет.

Использование полного спектра, что приводит к тому, что эффективность системы не падает из-за ИК-излучения, как у чисто фотоэлектрических устройств. Однако при всех достоинствах, эти системы имеют ряд недостатков и ограничений:

Низкий общий КПД из-за последовательного умножения КПД (оптический × тепловой × термоэлектрический) практический КПД систем редко превышает 5-8%, что ниже, чем у современных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (20-25%).

Высокая стоимость на ватт вследствие использования дорогих термоэлектрических материалов, оптических элементов и систем точного слежения.

Требовательность к теплоотводу, так как для высокой эффективности необходима сложная и энергозатратная система охлаждения. Температурная деградация из-за наличия постоянных термических циклов (день/ночь, облака), которые приводят к механическим напряжениям и усталости материалов. Добротность $ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$ является ключевой метрикой эффективности материала, где S – коэффициент Зеебека, σ – электропроводность, κ – теплопроводность, T – абсолютная температура. Современные исследования направлены на:

Снижение теплопроводности на основе использования наноструктурирования для увеличения рассеяния фононов на границах зерен без значительного снижения электропроводности. Например, создание нанокомпозитов [29].

Повышение термо-ЭДС: исследуются новые парадигмы, такие как использование скирмионов (магнитных вихрей) и сегнетоэлектрических материалов для создания аномально высокого коэффициента Зеебека [29].

Материалы для разных температурных диапазонов: Для фото-термоэлектрических гибридов (низкотемпературный режим, $<200^\circ\text{C}$) оптимальны Bi_2Te_3 и его производные. Для концентрирующих солнечно-тепловых термоэлектрических систем (средне- и высокотемпературный режим) перспективны материалы на основе PbTe , SnSe , GeTe и SiGe .

Управление теплом — это, возможно, самая критическая задача для повышения эффективности гибридных систем. Для горячей стороны гибридных систем необходима разработка спектрально-селективных покрытий и нанопористых структур для эффективного улавливания и удержания тепла. Исследования показывают, что без эффективного отвода тепла ΔT -разность температур между горячей и холодными сторонами — быстро падает.

Современные работы предлагают использовать следующие методы поддержания низких температур на холодной стороне. Высокоэффективные радиаторы с увеличенной площадью поверхности, материалы с фазовым переходом для буферизации тепловой нагрузки. Микроканальные теплообменники с жидкостным охлаждением, которые интегрируются непосредственно в модуль термоэлектрического генератора [30]. Это позволяет поддерживать высокий градиент, но требует дополнительных энергозатрат [31, 32].

Заключение

Исследования в области термоэлектрического преобразования солнечной энергии демонстрируют значительный прогресс, движимый междисциплинарным подходом, объединяющим материаловедение, тепловую инженерию и фотонику. Краткосрочные перспективы связаны с дальнейшей оптимизацией гибридных фото-термоэлектрических систем для коммерциализации, особенно там, где важны надежность и компактность (например, космические аппараты, удаленные датчики). В долгосрочной перспективе основные прорывы ожидаются от открытия новых материалов, например, поиск термоэлектриков с добротностью $ZT > 3$ при широком диапазоне температур, возможно, с использованием машинного обучения и высокопроизводительного скрининга. Развитие фототермальных термоэлектрических генераторов, что связано с созданием полностью интегрированных, дешевых и масштабируемых устройств для прямого преобразования света в электричество без сложной инфраструктуры. Многофункциональности, в первую очередь, за счет интеграции гибридных систем в систему обогрева и электроснабжения, где они будут не только генерировать электричество, но и выполнять функции теплового управления зданием. Несмотря на проблемы, связанные с стоимостью высокоэффективных термоэлектрических материалов и сложностью теплового управления, непрерывные фундаментальные и прикладные исследования уверенно движут эту технологию к более высокой эффективности и практической реализуемости, укрепляя её роль в будущем ландшафте возобновляемой энергетики.

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. V. 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., 1977. №COO-4577-3; CONF-780619-24.
5. Hendrie S. D. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab., 1978. №COO-4577-8; CONF-790541-54.
6. Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. 1981. <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 // *Renewable Energy*. 2018. P. Vol4_88-Vol4_119.
9. Kraemer D. et al. 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. Al-Nimr M. A., 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/pip.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. <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. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // *Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов*. М., 2019. С. 695-696.
32. Исманов Ю. X. Восстановление изображения волнами различной длины // *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2015. №4. С. 30-33.

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). 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. (1977). *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. (1978). *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. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Renewable Energy*, Vol4_88-Vol4_119.
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. Al-Nimr, M. D. A., 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. (2019). Umen'shenie ob"ema vvodimyykh dannykh pri komp'yuternoi obrabotke interferogramm. In *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 695-696. (in Russian).
32. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Vosstanovlenie izobrazheniya volnami razlichnoi dliny. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (4), 30-33. (in Russian).

Поступила в редакцию
05.01.2026 г.

Принята к публикации
12.01.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д. Современное состояние исследований в области гибридных термоэлектрических систем для преобразования солнечной энергии // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №3. С. 148-157. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/16>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., Dzhambankizov, N., & Tynyshova, T. (2026). Current state of Research in the Field of Hybrid Thermoelectric Systems for Solar Energy Conversion. *Bulletin of Science and Practice*, 12(3), 148-157. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/16>