

УДК 620.92  
AGRIS P05

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/70/01>

## ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА, ПРЕОБРАЗУЮЩАЯ СОЛНЕЧНУЮ ЭНЕРГИЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук,  
Киргизский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им.  
Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызстан, [i\\_yusupjan@mail.ru](mailto:i_yusupjan@mail.ru)

©Ниязов Н. Т., Институт физики им. акад. Ж. Ж. Жээнбаева НАН Киргизской Республики,  
г. Бишкек, Кыргызстан, [nurniyaz@mail.ru](mailto:nurniyaz@mail.ru)

©Джаманкызов Н. К., д-р. физ.-мат. наук, Институт физики  
им. акад. Ж. Ж. Жээнбаева НАН Киргизской Республики,  
г. Бишкек, Кыргызстан, [nasip49@gmail.com](mailto:nasip49@gmail.com)

## HYBRID SYSTEM CONVERTING SOLAR ENERGY INTO ELECTRIC ENERGY

©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil.,  
Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov,  
Bishkek, Kyrgyzstan, [i\\_yusupjan@mail.ru](mailto:i_yusupjan@mail.ru)

©Niyazov N., Institute of Physics named after Academician Zh. Z. Zheenbaev of the National  
Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, [nurniyaz@mail.ru](mailto:nurniyaz@mail.ru)

©Dzhamankyzyov N., Dr. habil., Institute of Physics named after Academician Zh. Z. Zheenbaev  
of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,  
Bishkek, Kyrgyzstan, [nasip49@gmail.com](mailto:nasip49@gmail.com)

*Аннотация.* В статье рассматривается математическая модель гибридной системы, объединяющей фотоэлектрический и термоэлектрический методы преобразования концентрированной солнечной энергии в электрическую. Указанная математическая модель позволяет определять температуры фотоэлектрического модуля, а также температуры электродов модуля термоэлектрического генератора. Оптимальные рабочие условия были определены для гибридной системы с учетом теплового контактного сопротивления на горячей и холодной сторонах термоэлектрического генератора. При моделировании исходили из того факта, что только часть поглощенного солнечного излучения преобразуется в электричество за счет фотоэлектрического эффекта, некоторая часть теряется за счет излучения и конвекции с верхней поверхности фотоэлектрического модуля в окружающую среду, а остальная часть передается в термоэлектрический генератор, присоединенный к нижней части фотоэлектрического модуля. Термоэлектрический генератор преобразует часть тепловой энергии, которую он получает от фотоэлектрического модуля, в электричество посредством эффекта Зеебека, но большая ее часть уходит в систему охлаждения. В основе преобразования тепла в электрическую энергию учитывали хорошо известные эффекты Зеебека и Пельтье. Наряду с этими эффектами были учтены такие эффекты, как формирование джоулева тепла из-за наличия электрического тока в термоэлектрическом генераторе, теплопроводности Фурье, как следствия возникновения градиента температуры в переходах термоэлектрического генератора и тепла Томсона, которое возникает как из-за присутствия градиента температуры, так и электрического тока. Полученная модель

гибридной системы позволяет исследовать влияние изменения разницы температур между горячим и холодным электродами термоэлектрического генератора и сопротивлений внешней цепи на производительность гибридной системы. Модель позволяет также определять оптимальные рабочие условия для гибридной системы с учетом теплового контактного сопротивления на горячей и холодной сторонах термоэлектрического генератора.

*Abstract.* The article discusses a mathematical model of a hybrid system that combines photovoltaic and thermoelectric methods for converting concentrated solar energy into electrical energy. The specified mathematical model makes it possible to determine the temperatures of the photovoltaic module, as well as the temperature of the electrodes of the thermoelectric generator module. Optimal operating conditions have been determined for the hybrid system, taking into account the thermal contact resistance at the hot and cold sides of the thermoelectric generator. The simulation proceeded from the fact that only part of the absorbed solar radiation is converted into electricity due to the photoelectric effect, some part is lost due to radiation and convection from the upper surface of the photovoltaic module into the environment, and the rest is transferred to a thermoelectric generator connected to the lower part. photovoltaic module. A thermoelectric generator converts some of the thermal energy it receives from the photovoltaic module into electricity through the Seebeck effect, but most of it goes to the cooling system. The conversion of heat into electrical energy was based on the well-known Seebeck and Peltier effects. Along with these effects, such effects were taken into account as the formation of Joule heat due to the presence of electric current in the thermoelectric generator, Fourier thermal conductivity, as a consequence of the appearance of a temperature gradient in the transitions of a thermoelectric generator and Thomson heat, which arises both due to the presence of a temperature gradient, and electric current. The resulting model of the hybrid system makes it possible to study the effect of changing the temperature difference between the hot and cold electrodes of the thermoelectric generator and the resistance of the external circuit on the performance of the hybrid system. The model also allows the determination of the optimal operating conditions for the hybrid system, taking into account the thermal contact resistance on the hot and cold sides of the thermoelectric generator.

*Ключевые слова:* гибридная система, фотоэлектрический преобразователь, термоэлектрический преобразователь, солнечная энергия, концентратор, выходная мощность.

*Keywords:* hybrid system, photovoltaic converter, thermoelectric converter, solar energy, concentrator, power output.

### *Введение*

Климатические изменения последних десятилетий и глобальное потепление подтолкнули развернуть широкие исследования в области разработки новых технологий возобновляемых источников энергии. И здесь, несомненно, на первом месте стоят технологии, использующие энергию солнца. Потенциал использования солнечной энергии огромен, эта энергия экологически чистая и устойчивая с точки зрения производства электрической энергии. Основными методами ее использования являются фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии и тепловые системы, использующие солнечную энергию. Основное направление исследований разработчиков уже в течение многих десятков лет сосредоточено на фотоэлектрической технологии, которая представляет собой надежный и преобладающий процесс преобразования солнечной в электричество. Однако у этого

метода преобразования солнечной энергии имеется один, но существенный недостаток - метод эффективен только для высокочастотного участка спектра солнечного излучения. Только фотоны с энергией выше ширины запрещенной зоны могут поглощаться и использоваться фотоэлектрическими элементами для выработки электричества [1], а остальные фотоны идут на нагрев фотоэлектрического элемента и, таким образом, не могут создавать пары электрон-дырка для создания фототока. Энергия фотонов, превышающая энергию запрещенной зоны, передается решетке в процессе столкновения с атомами кристаллической решетки. Расчеты и эксперименты показывают, что падающая солнечная энергия преобразуется в электричество с помощью фотоэлементов с эффективностью не более 35%, а остальная часть преобразуется в тепло, которое увеличивает температуру фотоэлемента [2]. Это приводит к тому, что возникает отрицательный температурный коэффициент, который сильно снижает эффективность фотоэлемента [3]. Если в качестве полупроводника использовать чистый кремний, то максимальная эффективность в этом случае не превысит 32% [4–6]. Для повышения эффективности использования энергии солнечного излучения и увеличения использования спектрального диапазона необходимы другие схемы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, такие как многоступенчатые фотоэлектрические преобразователи [7] и фотоэлектрические технологии, использующие концентраторы солнечной энергии [8]. Надо также учитывать, что 65% падающего излучения солнца преобразуется в тепловую энергию в фотоэлектрических системах с использованием концентратора солнечной энергии. Эту энергию следует выводить, так как такая высокая концентрация ее на небольшой площади — обычно катод фотоэлемента — создает температурные проблемы, часто приводящие к выходу из строя фотоэлектрической системы. Т. е. 65 % энергии солнечного излучения – это потери энергии, которая через систему охлаждения фотоэлектрического преобразователя выбрасывается в окружающую среду.

В работах [9–11] была рассмотрена многоступенчатая фотоэлектрическая система, в которой вместо обычной системы охлаждения было предложено использовать термоэлектрический модуль, который подключается в качестве дополнительной ступени в фотоэлектрическую систему и предназначен для преобразования части избыточного тепла фотоэлементов в электричество. То есть предлагается гибридная система, объединяющая два типа преобразования энергии — фотоэлектрический с использованием концентратора солнечной энергии и термоэлектрический, преобразующий излишки энергии, выделяющиеся в виде тепла в фотоэлектрическом преобразователе, в электрическую энергию. Как показали исследования, использование гибридной схемы преобразования солнечной энергии значительно повышает ее эффективность, что приводит к необходимости практической реализации такой системы [12]. Использование термоэлектрических преобразователей тепловой энергии в электрическую очень эффективно с практической точки зрения, так эти устройства по своей природе являются твердотельными, не имеют движущихся частей, что предполагает их долговечность, надежность и бесшумную работу [13]. В работе [14] рассмотрена гибридная система, сочетающая фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии и термоэлектрический преобразователь тепла и использующая материалы с фазовыми переходами. Как показано в этой работе, эффективность такой гибридной системы значительно выше системы на основе только фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии. В работе [15] предложена модель гибридной системы — фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии и термоэлектрический генератор. По результатам моделирования определены оптимальные рабочие области для максимальной выходной

мощности и эффективности этой гибридной системы. Оценку экономической эффективности использования гибридных систем преобразования солнечной энергии провели в работе [16]. В качестве приемника солнечного излучения были использованы солнечные батареи на основе сенсibilизированных красителей, а катоды фотоэлектрических преобразователей были изготовлены из поликристаллического кремния. Авторы пришли к выводу, что термоэлектрический генератор с более короткими ветвями увеличивает выходную мощность гибридной системы. В работе [17] представлены результаты экспериментальных исследований модернизированной системы, объединяющей фотоэлектрический преобразователь с концентрацией солнечной энергии и термоэлектрический генератор. В представленной ими системе были достигнуты электрический и тепловой к. п. д. 5% и 47% соответственно. Теоретическая модель гибридной системы в работе [18] позволила авторам провести оценку эффективности различных типов фотоэлектронных модулей в составе гибридной системы. Полученные результаты показали наибольшую эффективность гибридной системы с использованием фотоэлектрической системы на основе фотоэлемента из полимера в случае отсутствия концентратора солнечной энергии. В случае использования концентратора солнечной энергии лучшим вариантом будет использование фотоэлектрического преобразователя с фотоэлементом на основе тонкой пленки из поликристаллического кремния. В работе [19] рассмотрена математическая модель гибридной системы — фотоэлектрический и термоэлектрический преобразователи, целью которой был анализ реализуемости таких гибридных систем. Анализ показал, что эффективность гибридной системы может быть повышена на 10–25% посредством подбора типа интеграции и материалов термоэлектронного преобразователя. Работа [20] посвящена разработке электрической и тепловой модели системы, объединяющей фотоэлектронный модуль и термоэлектрический генератор, с солнечными батареями на основе сенсibilизированных красителей. Модель позволила использовать энергию полного солнечного спектра и показала, что эффективность гибридной системы максимальна при оптимальной рабочей температуре. В работе [11] рассмотрена гибридная система, преобразующая солнечную энергию посредством солнечного элемента на основе тонкопленочного кремния и состоящая из термоэлектрического генератора и коллектора тепла. Установлено, что общая выходная мощность гибридной системы вдвое больше, чем при использовании только солнечного элемента на основе тонкопленочного кремния. В работе [21] по результатам работы высокоэффективной гибридной системы фотоэлектрический преобразователь концентрированной солнечной энергии и термоэлектрический генератор сделан вывод, что важнейшим фактором оптимизации производительности гибридной системы является управление температурным режимом. Учет геометрической оптимизации термоэлектрического генератора проведен в гибридной системе на основе фотоэлектрического и термоэлектрического преобразователей энергии [22]. Как показал анализ работы этой модели, выходная мощность и эффективность преобразования увеличились за счет использования термоэлектрического генератора с оптимизированной геометрией. В работе «Термоэлектронное преобразование солнечной энергии с использованием гетероструктурного катода» экспериментально подтверждено, что производительность гибридной системы (фотоэлектрический и термоэлектрический преобразователи энергии) увеличивается за счет включения термоэлектрического генератора в качестве теплового насоса по отношению к системе, состоящей только из фотоэлектрического преобразователя концентрированной солнечной энергии [23].

Во всех вышеупомянутых исследованиях гибридных систем, состоящих из фотоэлектрического и термоэлектрического преобразователей энергии, а также в системах, состоящих только из термоэлектрического генератора, производительность оценивалась при условии, что разница температур в термоэлектрическом генераторе постоянна, подобно тому, как это сделано в работе [24]. Но, необходимо принимать во внимание тот фактор, что в случае гибридных систем, состоящих из фотоэлектрического и термоэлектрического преобразователей энергии, тепловая нагрузка на систему практически неизменна. Однако разница температур в термоэлектрическом генераторе изменяется из-за непрерывного изменения температуры фотоэлектрического модуля в зависимости от температуры окружающей среды и солнечного излучения. Необходимо учитывать тот факт, что в случае отсутствия внешней нагрузки в цепи термоэлектрического генератора разница температур приводит только к возникновению теплопередачи от горячего спая термоэлектрического генератора к холодному. При подключении внешней нагрузки к клеммам термоэлектрического генератора текущий по цепи ток, величина которого зависит от сопротивления нагрузки, приводит к возникновению дополнительной разницы температур на устройстве. В работе [25] численными методами определили реальную температуру термоэлектрического генератора и оценили воздействие термического сопротивления на оптимальные условия работы устройства.

Как видно из рассмотренных ранее работ, объединение фотоэлектрического и термоэлектрического модулей в единую гибридную систему значительно повышает производительность фотоэлектрической системы. В указанных работах было проведено исследование влияния различных параметров на производительность гибридной системы, объединяющей фотоэлектрический и термоэлектрический модули. Однако, все эти исследования предполагают, что разница температур в термоэлектрическом генераторе постоянна, что неверно в случае солнечного излучения. Также в этих работах не учтено влияние сопротивления нагрузки на общую производительность гибридной системы.

*Целью представленной работы* является исследование влияния изменения разницы температур между горячей и холодной электродами термоэлектрического генератора и сопротивлений внешней цепи на производительность гибридной системы.

#### *Гибридная система преобразования солнечной энергии*

Схематичное представление гибридной системы, объединяющей фотоэлектрический и термоэлектрический методы преобразования концентрированной солнечной энергии в электрическую энергию и состоящей из концентратора солнечной энергии, фотоэлектрических и тепловых модулей и теплоотвода, показано на Рисунке. Фотоэлементы, изготовленные из кристаллического кремния, соединяются последовательно, образуя фотоэлектрический модуль. Термоэлементы соединяются последовательно с электрической точки зрения, но параллельно в термическом отношении, формируя модуль термоэлектрического генератора. Высокотемпературная сторона термоэлектрического генератора соединяется с задней стороной фотоэлектрического модуля через площадки контактов, которые исполняют роль концентратора тепла. Низкотемпературная сторона термоэлектрического генератора служит для удаления тепла в окружающую среду через теплоотвод. В фотоэлектрической системе с концентратором возникает остаточное тепло, которое используется в следующей ступени гибридной фотоэлектронно-термоэлектронной системы — модуле термоэлектронного генератора — в качестве источника тепла, что позволяет вырабатывать дополнительную мощность в этом модуле и уменьшить температуру

фотоэлектрического модуля. По сравнению с одиночными модулями, эффективность гибридной системы оказывается значительно выше. Фотоэлектрический и термоэлектрический модули электрически изолированы и имеют термическое соединение в гибридной системе.

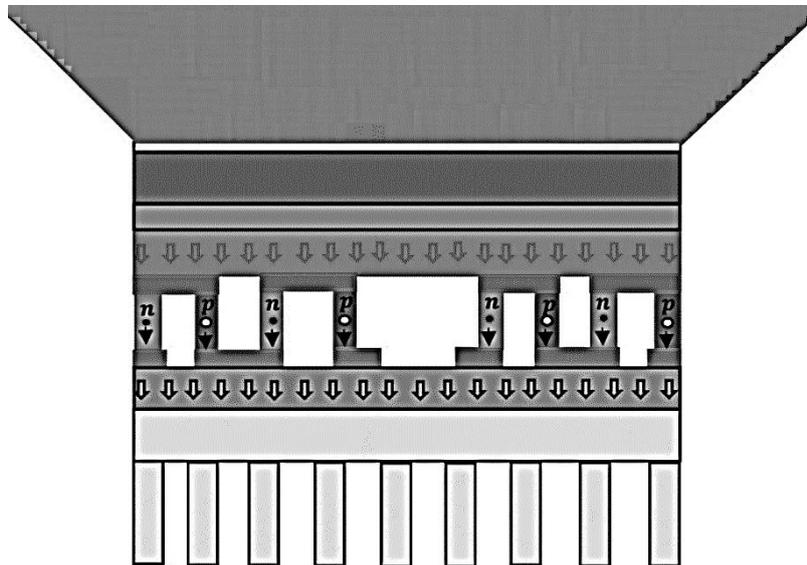


Рисунок. Схематичное изображение системы, объединяющей фотоэлектронную и термоэлектрическую преобразователи солнечной энергии

*Математическое моделирование гибридной системы, объединяющей фотоэлектрический и термоэлектрический методы преобразования солнечной энергии.*

Моделирование будем проводить при незначительных упрощениях, не влияющих на общность подхода:

1. При моделировании исключим потери тепла в поперечном направлении, что приводит к рассмотрению одномерной стационарной модели теплопередачи.
2. Эффективность фотоэлектрического преобразования для стандартных условий равна 14%.
3. Градиентом температуры по толщине стеклянной крышки пренебрегаем, так как толщина очень мала.
4. Считаем, что в термоэлектронном модуле присутствует только теплопроводность, описываемая уравнением Фурье, а все остальные типы теплопередачи, такие как конвекция и излучение, отсутствуют.

В фотоэлектрическом модуле происходит преобразование солнечной энергии в электрическую энергию и тепло с помощью фотоэлектрической системы.

На первом этапе солнечное излучение с помощью концентратора концентрируется на поверхности фотоэлектрического модуля. При этом только часть поглощенного солнечного излучения преобразуется в электричество за счет фотоэлектрического эффекта, некоторая часть теряется за счет излучения и конвекции с верхней поверхности фотоэлектрического модуля в окружающую среду, а оставшаяся часть передается в термоэлектрический генератор, присоединенный к нижней части фотоэлектрического модуля. Термоэлектрический генератор преобразует часть тепловой энергии, которую он получает от фотоэлектрического модуля, в электричество посредством эффекта Зеебека, но большая ее часть уходит в систему охлаждения.

Энергетический баланс для фотоэлектрического модуля можно записать исходя из первого закона термодинамики с помощью уравнения [26]:

$$\Lambda \Omega S_{\Phi E} t_g [\alpha_c \gamma_c + \alpha_T (1 - \gamma_c)] = e \sigma S_{\Phi E} (T_{\Phi E}^4 - T_{окр}^4) + \Phi_t S_{\Phi E} (T_{\Phi E} - T_a) + \Phi_b S_{\Phi E} (T_{\Phi E} - T_h) + \xi_{\Phi E} \gamma_c t_g \Lambda \Omega S_{\Phi E} \quad (1)$$

Здесь  $\Lambda$  — степень концентрации солнечного излучения,  $S_{\Phi E}$  — площадь катода фотоэлектрического преобразователя,  $\Omega$  — интенсивность солнечного излучения,  $T_{\Phi E}$  — температура фотоэлемента,  $T_h$  — температура нагретой стороны термоэлектрического генератора,  $\xi_{\Phi E}$  — к. п. д. фотоэлектрического элемента,  $\gamma_c$  — степень упаковки,  $t_g$  — пропускающий коэффициент стеклянной крышки,  $\alpha_c$  — поглощающий коэффициент фотоэлемента,  $\alpha_T$  — поглощающий коэффициент Тедлара,  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана, а  $e$  — коэффициент излучения поверхности фотоэлемента.  $\Phi_t$  и  $\Phi_b$  — коэффициенты теплопереноса от верхней поверхности во внешнюю среду за счет теплопроводности и конвекции и от нижней поверхности к термоэлектрическому модулю посредством теплопроводности. Эти коэффициенты определяются следующим образом [26]:

$$\Phi_t = \left[ \frac{M_g}{l_g} + \frac{1}{\xi_{конв}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\Phi_b = \left[ \frac{M_{\Phi}}{l_{\Phi}} + \frac{M_T}{l_T} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Здесь  $\xi_{конв}$  — коэффициент конвекции между верхней поверхностью фотоэлектрического модуля и окружающей средой,  $M_g$ ,  $M_T$  и  $M_{\Phi}$  — толщины стеклянной крышки, защитной пленки и фотоэлемента соответственно,  $l_g$ ,  $l_T$  и  $l_{\Phi}$  — теплопроводности стеклянной крышки, защитной пленки и фотоэлемента соответственно.

Температурная зависимость эффективности фотоэлемента задается следующим соотношением [27]:

$$\xi_{\Phi E} = \xi_r [1 - \gamma_0 (T_{\Phi E} - T_r)]. \quad (4)$$

Здесь  $\gamma_0$  — температурный коэффициент эффективности,  $\xi_r$  и  $T$  — эффективность и температура фотоэлемента при нормальных условиях.

Для выходной мощности фотоэлектрического преобразователя можно записать соотношение:

$$P_{\Phi E} = \xi_{\Phi E} S_{\Phi E} \Lambda \Omega. \quad (5)$$

В гибридной схеме построения системы, преобразующей солнечную энергию в электрическую, часть энергии солнца преобразуется в тепло в фотоэлектрическом преобразователе. Часть этого тепла отводится от фотоэлектрического модуля к высокотемпературной части термоэлектрического генератора, где преобразуется в электрическую энергию, а остальная часть удаляется через систему охлаждения с низкотемпературной стороны термоэлектрического генератора в окружающую среду. Термоэлектрический генератор построен на полупроводниковых элементах двух типов – р и n типов. В основе преобразования тепла в электрическую энергию лежат хорошо известные

эффекты Зеебека и Пельтье. Наряду с этими эффектами необходимо также учесть такие эффекты, как формирование джоулева тепла из-за наличия электрического тока в термоэлектрическом генераторе, теплопроводности Фурье, как следствия возникновения градиента температуры в переходах термоэлектрического генератора и тепла Томсона, которое возникает как из-за присутствия градиента температуры, так и электрического тока.

Учет всех указанных эффектов приводит к следующему соотношению для скорости теплового потока, который направлен от фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии к высокотемпературной части термоэлектрического генератора и от низкотемпературной части термоэлектрического генератора через систему охлаждения в окружающую среду [28,29]:

$$V_{\text{ФЭ}} = N \left( \alpha_h T_h I_{TE} + \sigma_T (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I_{TE}^2 R - \frac{1}{2} \mu (T_h - T_c) I_{TE} \right), \quad (6)$$

$$V_c = N \left( \alpha_c T_c I_{TE} + \sigma_T (T_h - T_c) + \frac{1}{2} I_{TE}^2 R + \frac{1}{2} \mu (T_h - T_c) I_{TE} \right). \quad (7)$$

Здесь  $N$  — количество термопар,  $\mu$  — коэффициент Томпсона,  $I_{TE}$  — ток в термоэлектрическом модуле,  $T_c$  — температура низкотемпературной части термоэлектрического модуля,  $\alpha_h$ ,  $\alpha_c$  — коэффициенты Зеебека высокотемпературной и низкотемпературной частей термоэлектрического модуля соответственно,  $R$  и  $\sigma_T$  — электрическое сопротивление и теплопроводность одной пары термоэлементов термоэлектрического модуля, которые определяются следующим образом [25]:

$$R = \left[ \frac{\rho_p M_p}{S_p} + \frac{\rho_n M_n}{S_n} + \frac{4R_{ec}}{S_{TE}} \right], \quad (8)$$

$$\sigma_T = \left[ \frac{l_p S_p}{M_p} + \frac{l_n S_n}{M_n} \right]. \quad (9)$$

Здесь  $R_{ec}$  — электрическое сопротивление контакта,  $S_p$ ,  $S_n$  и  $S_{TE}$  — площади поверхностей термоэлементов р и n-типов и общая площадь термоэлементов термоэлектрического модуля соответственно,  $\rho_p$  и  $\rho_n$  — удельные электрические сопротивления термоэлементов р и n-типов соответственно.

Соотношения, описывающие теплопроводность и электрическое сопротивление термоэлектрического модуля, можно записать в следующем виде [25]:

$$\sigma_{TE} = n\sigma_T, \quad (10)$$

$$R_{TE} = NR = \frac{2N(\rho M + 2R_{ec})}{S_{TE}}. \quad (11)$$

Коэффициент заполнения (SS) — это отношение площади поверхности все термоэлементов ( $S_{TE}$ ), в термоэлектрическом модуле, к полной площади всей поверхности термоэлектрического модуля (S) [25]:

$$SS = \frac{2NS_{TE}}{S}. \quad (12)$$

Тепло, которое передается от высокотемпературной части термоэлектрического генератора к ее низкотемпературной части посредством теплопроводности, эффектов Пельтье, Джоуля и Томпсона (соотношения (6) и (7) соответственно), должно равняться количеству тепла, передаваемого от фотоэлектрического модуля к высокотемпературной части термоэлектрического генератора плюс тепло, передаваемое от низкотемпературной части термоэлектрического генератора через систему охлаждения в окружающую среду. Эти значения тепла задаются соответственно соотношениями:

$$V_{\Phi E} = \frac{T_{\Phi E} - T_h}{\zeta_h}, \quad (13)$$

$$V_{\Phi E} = \frac{T_c - T_a}{\zeta_c}. \quad (14)$$

Здесь  $\zeta_h$  и  $\zeta_c$  — термическое сопротивление между фотоэлектрическим модулем и высокотемпературной частью термоэлектрического модуля и между низкотемпературной частью термоэлектрического модуля и окружающей средой соответственно. Эти величины равны обратному значению произведения коэффициента теплопередачи и площади поверхности. Величина термического сопротивления между фотоэлектрическим модулем и высокотемпературной частью термоэлектрического модуля должна быть минимальной, чтобы выполнялось допущение об отсутствии боковой теплопередачи.

Отсюда следует, что соотношение (6) можно приравнять к соотношению (13), а соотношение (7) приравнять к соотношению (14).

$$N \left( \alpha_h T_h I_{TE} + \sigma_T (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I_{TE}^2 R - \frac{1}{2} \mu (T_h - T_c) I_{TE} \right) = \frac{T_{\Phi E} - T_h}{\zeta_h}, \quad (15)$$

$$N \left( \alpha_c T_c I_{TE} + \sigma_T (T_h - T_c) + \frac{1}{2} I_{TE}^2 R + \frac{1}{2} \mu (T_h - T_c) I_{TE} \right) = \frac{T_c - T_a}{\zeta_c}. \quad (16)$$

Выходная мощность термоэлектрического генератора можно записать в следующем виде:

$$P_{TE} = V_h - V_c = I_{TE}^2 R_H = N [(\alpha_h T_h I_{TE} - \alpha_c T_c I_{TE}) - I_{TE}^2 R - \mu I_{TE} (T_h - T_c)]. \quad (17)$$

Здесь  $\mu$  — коэффициент Томпсона. Величина тока в термоэлектрическом генераторе равна:

$$I_{TE} = \frac{N [(\alpha_h T_h - \alpha_c T_c) - \mu (T_h - T_c)]}{R_{TE} (1 + m)}. \quad (18)$$

Здесь  $m$  представляет собой отношение электрической нагрузки  $R_H$ , подсоединенной к термоэлектрическому генератору, к внутреннему сопротивлению термоэлектрического модуля  $R_{TE}$ :

$m = \frac{R_H}{R_{TE}}$ . Выразим  $S_{TE}$  из соотношения (12) и подставим его в (11). Подставляем

полученное выражение для  $R_{TE}$  в соотношение для  $m$  и получаем:

$$m = \frac{R_H}{R_{TE}} = \frac{R_H S(SS)}{4N^2(\rho M + 2R_{ec})}. \quad (19)$$

Используя полученные соотношения, выражения (15) и (16) можно записать в следующем виде:

$$W_1 T_h^2 + W_2 T_c^2 + W_3 T_h T_c + W_4 T_h + W_5 T_c + W_6 = 0, \quad (20)$$

$$V_1 T_h^2 + V_2 T_c^2 + V_3 T_h T_c + V_4 T_h + V_5 T_c + V_6 = 0. \quad (21)$$

Здесь

$$W_1 = \frac{\alpha_h S(SS)[\mu(m+1) - \alpha_h(2m+1)]\zeta_h}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2}, \quad W_2 = \frac{\alpha_c S(SS)[\mu(m+1) + \alpha_c]\zeta_h}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2},$$

$$W_3 = \frac{-S(SS)[\mu(m+1)(\alpha_h + \alpha_c) - 2m\alpha_h\alpha_c]\zeta_h}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2}, \quad W_4 = \frac{-(\sigma_T S(SS)\zeta_h + M_{TE})}{ME},$$

$$W_5 = \frac{\sigma_T S(SS)\zeta_h}{M_{TE}}, \quad W_6 = 1,$$

$$V_1 = \frac{\alpha_h S(SS)[\mu(m+1) - \alpha_h]\zeta_h}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2}, \quad V_2 = \frac{\alpha_c S(SS)[\mu(m+1) + \alpha_c(2m+1)]\zeta_h}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2},$$

$$V_3 = \frac{-S(SS)[\mu(m+1)(\alpha_h + \alpha_c) + 2m\alpha_h\alpha_c]\zeta_c}{8(\rho M_{TE} + 2R_{ec})(m+1)^2}, \quad V_4 = \frac{-\sigma_T S(SS)\zeta_h}{M_{TE}}, \quad V_5 = \frac{\sigma_T S(SS)\zeta_h + M_{TE}}{M_{TE}},$$

$$V_6 = -1.$$

Так как уравнения (1), (20) и (21) нелинейные, то решать их лучше всего численными методами, что и было сделано. Полученные соотношения для напряжения, выходной мощности и к. п. д. термоэлектрического генератора имеют следующий вид:

$$U = IR_M = \frac{N[(\alpha_h T_h - \alpha_c T_c) - \mu(T_h - T_c)]m}{(1+m)}, \quad (22)$$

$$P_{TE} = I_{TE}^2 R_M = \frac{mS(SS)[(\alpha_h T_h - \alpha_c T_c) - \mu(T_h - T_c)]^2}{4(\rho M + 2R_{ec})(1+m)^2}, \quad (23)$$

$$\xi_{TE} = \frac{P_{TE}}{V_{ФЭ}} \quad (24)$$

Выходная мощность и к. п. д. комплексной системы в целом, состоящей из фотоэлектрического и термоэлектрического модулей, равны:

$$P = P_{\text{ФЭ}} + P_{\text{ТЕ}} \text{ и } \xi = \frac{P}{\Lambda \Omega S_{\text{ФЭ}}}.$$

#### Выводы

Разработана математическая модель гибридной системы, объединяющей фотоэлектрический и термоэлектрический методы преобразования концентрированной солнечной энергии в электрическую. Предложенная модель основывается на двух первых законах термодинамики.

Рассмотренная математическая модель позволяет определять температуры фотоэлектрического модуля, а также температуры электродов модуля термоэлектрического генератора. Оптимальные рабочие условия были определены для гибридной системы с учетом теплового контактного сопротивления на горячей и холодной сторонах термоэлектрического генератора. При моделировании исходили из того факта, что только часть поглощенного солнечного излучения преобразуется в электричество за счет фотоэлектрического эффекта, некоторая часть теряется за счет излучения и конвекции с верхней поверхности фотоэлектрического модуля в окружающую среду, а остальная часть передается в термоэлектрический генератор, присоединенный к нижней части фотоэлектрического модуля. Термоэлектрический генератор преобразует часть тепловой энергии, которую он получает от фотоэлектрического модуля, в электричество посредством эффекта Зеебека, но большая ее часть уходит в систему охлаждения.

В основе преобразования тепла в электрическую энергию учитывали хорошо известные эффекты Зеебека и Пельтье. Наряду с этими эффектами были учтены такие эффекты, как формирование джоулева тепла из-за наличия электрического тока в термоэлектрическом генераторе, теплопроводности Фурье, как следствия возникновения градиента температуры в переходах термоэлектрического генератора и тепла Томсона, которое возникает как из-за присутствия градиента температуры, так и электрического тока.

Полученная модель гибридной системы позволяет исследовать влияние изменения разницы температур между горячей и холодной электродами термоэлектрического генератора и сопротивлений внешней цепи на производительность гибридной системы. Модель позволяет также определять оптимальные рабочие условия для гибридной системы с учетом теплового контактного сопротивления на горячей и холодной сторонах термоэлектрического генератора.

#### Список литературы:

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>

6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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)
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. Maiti S., Banerjee S., Vyas K., Patel P., Ghosh P. K. 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>
18. 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>
19. 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>
20. 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>

21. Kraemer D., Poudel B., Feng H. P., Caylor J. C., Yu B., Yan X. et al. 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>
22. 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>
23. Исманов Ю. Х., 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>
24. Исманов Ю. Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова*. 2015. №4(40). С. 194-198.
25. Исманов Ю. Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // *Известия Национальной академии наук Кыргызской республики*. 2015. №2. С. 20-23.
26. Maripov A. R., Ismanov Y. The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography // *Journal of optics*. 1994. V. 25. №1. P. 3-8. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/25/1/001>
27. 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., 2018. С. 596-597.

#### References:

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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>

9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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)
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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>
18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. 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>

23. Ismanov, Yu., Niyazov, N., Dzhamankyzov, 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>
24. Ismanov, Yu. (2015). Interferometry based on the method of gapless rainbow hologram. *The herald of Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov*, 4(40), 194-198. (in Russian).
25. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Golograficheskaya interferometriya na osnove effekta Tal'bota. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Kyrgyzskoi respubliki*, (2), 20-23. (in Russian).
26. Maripov, A. R., & Ismanov, Y. (1994). The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography. *Journal of optics*, 25(1), 3-8. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/25/1/001>
27. Ismanov, Yu. Kh., Dzhamankyzov, 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).

Работа поступила  
в редакцию 03.08.2021 г.

Принята к публикации  
09.08.2021 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Ниязов Н. Т., Джаманкызов Н. К. Гибридная система, преобразующая солнечную энергию в электрическую // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. №9. С. 12-26. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/70/01>

Cite as (APA):

Ismanov, Yu., Niyazov, N., & Dzhamankyzov, N. (2021). Hybrid System Converting Solar Energy Into Electric Energy. *Bulletin of Science and Practice*, 7(9), 12-26. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/70/01>