

Антощенко В.С.* , Францев Ю.В., Лаврищев О.А., Антощенко Е.В.

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы, *e-mail: solartechnology@mail.ru

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Предложена новая конструкция комбинированного преобразователя солнечной энергии, обеспечивающая повышение эффективности и надежности устройства, а также снижение его веса и стоимости. Это достигается за счет заполнения рабочей камеры жидкостью, инертной по отношению к контактирующим с ней конструкционным элементам, что позволяет защитить открытую поверхность солнечных элементов от атмосферы и исключить их деградацию в процессе работы. Кроме того, в отличие от обычных методов защиты солнечных элементов фотопреобразователей, например, методом ламинирования пленкой «EVA», которая деградирует в процессе эксплуатации, ухудшая электрические характеристики фотопреобразователя и не может быть заменена на новую, использование жидкого теплоносителя позволяет заменить его при снижении прозрачности. Совокупность оптических свойств используемой жидкости позволяет повысить электрическую эффективность устройства за счет высокой прозрачности в видимой области спектра и снижения потерь на отражение света от тыльной поверхности фронтальной пластины. Применение теплоносителя с высоким поглощением в инфракрасной области спектра позволяет эффективно накапливать тепловую энергию с последующим ее отводом в теплообменник. Испытание коррозионной стойкости деталей преобразователя, включая солнечные элементы, проводилось в течение 2-х лет и не выявило ухудшения эксплуатационных характеристик устройства.

Был изготовлен опытный образец комбинированного преобразователя солнечной энергии с пиковой электрической мощностью при стандартных условиях 25 Вт и тепловой – 80 Вт.

Ключевые слова: комбинированный преобразователь, солнечное излучение, тепловая энергия, электрическая энергия, солнечный элемент, теплоноситель.

Antoshchenko V.S., Francev Yu.V., Lavrishev O.A., Antoshchenko E.V.

Institute of Experimental and Theoretical Physics,
Al-Farabi Kazakh National University,
Kazakhstan, Almaty, *e-mail: solartechnology@mail.ru

Combined solar energy converter

A new design of a combined solar energy converter is proposed, which provides for increasing the efficiency and reliability of the device, as well as reducing its weight and cost. This is achieved by filling the working chamber with a liquid that is inert to the structural elements in contact with it, thus protecting the exposed surface of the solar cells from the atmosphere and preventing their degradation during operation. In addition, unlike conventional methods for protecting solar cells in photoconverters, for example, by lamination with EVA film, which degrades during operation, degrading the electrical characteristics of the photoconverter and can not be replaced by a new one, the use of a heat transfer fluid allows replacing it with reduced transparency. The combination of the optical properties of the liquid used makes it possible to increase the electrical efficiency of the device due to high transparency in the visible region of the spectrum and to reduce losses by light reflection from the back surface of the front plate. The use of a coolant with a high absorption in the infrared region of the spectrum makes it possible

to efficiently store thermal energy and then transfer it to a heat exchanger. The corrosion resistance test of the transducer parts, including solar cells, was carried out for 2 years and did not reveal a deterioration in the device performance.

A prototype of a combined solar energy converter was produced a peak electrical power of 25W and thermal power of 80 W under standard conditions.

Key words: Combined converter, solar radiation, thermal energy, electric energy, solar cell, coolant.

Антощенко В.С., Францев Ю.В., Лаврищев О.А., Антощенко Е.В.

Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты,
 әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
 Қазақстан, Алматы қ., *e-mail: solartechnology@mail.ru

Аралас күн энергиясы түрлендіргіштер

Жаңа күн энергиясын аралас түрлендіргіші жобалау, құрылғының жоғары тиімділігі мен сенімділігін қамтамасыз ету, сондай-ақ оның салмағы мен құнын төмендету. Бұл атмосфераға түскен күн ұшықтың ұшыраған бетін қорғау үшін және жұмыс істеу кезінде олардың нашарлауын болдырмау мүмкіндік беретін құрылымдық элементтерімен байланыста қатысты инертті гидравликалық сұйықтық, бар камераны толтыру арқылы қол жеткізіледі. Сонымен қатар, дәстүрлі күн ұшық қорғау әдістерін айырмашылығы күн батареяларын, мысалы, фильм электр сипаттамалары photoconverter нұқсан, жұмыс кезінде тозған және жаңасымен ауыстыруға болмайды «EVA», ламинаттау арқылы, жылу беру сұйықтықтың пайдалану ашықтығын азаюына оны ауыстыруға мүмкіндік береді. пайдаланылатын сұйықтық оптикалық қасиеттерін жиынтығы байланысты спектрін көрінетін аймақта жоғары ашықтығын құрылғының электр тиімділігін арттыру және алдыңғы нөмірдің артқы бетінен жарық көрініс шығындарды азайтуға болады. Спектрін инфрақызыл аймақта жоғары сіңіру бар салқындату қолдану тиімді жылу алмастырғыш оның кейіннен қайтарып алумен жылу энергиясын жинақталады. Күн батареяларын, соның ішінде коррозияға төзімділігі түрлендіргіштен, бөлшектерді сынау, 2 жыл бойы жүргізілді және құрылғының сипаттамалары нашарлауы көрсету жоқ.

80 ватт – прототипі аралас күн энергиясы түрлендіргіш 25 Вт және жылу стандарттық жағдайлар кезінде шыңы электр қуатымен дайындалған.

Түйін сөздер: біріктірілген конвертер, күн радиациясы, жылу энергиясы, электр энергиясы, күн ұшық, салқындату сұйықтары.

Введение

На сегодняшний день известны три типа устройств, предназначенных для прямого преобразования солнечной энергии. Это тепловые коллекторы, фотоэлектрические модули и комбинированные системы для одновременного получения тепла и электричества [1-17]. Последние обладают наибольшей эффективностью преобразования, которая может приближаться к 80%. Комбинированные системы подразделяются по типу теплоносителя (воздушный или жидкостный) и по конструкции теплоотводящего устройства. В простейшем случае комбинированная установка состоит из стандартной фотоэлектрической батареи и расположенного снизу теплового коллектора. Из-за плохого теплового контакта в таких устройствах эффективность преобразования невысока, однако она выше, чем суммарная энергия, получаемая от отдельно расположенных преобразователей того же размера, вследствие двукратного снижения площади комбинированной системы. В более совершенных

системах дополнительное повышение эффективности преобразования достигается за счет минимизации теплового сопротивления между охлаждающей средой и солнечными элементами, в результате чего последние смогут работать при более низкой температуре, и, следовательно, с большей эффективностью. Тепловое сопротивление фотоэлектрического модуля определяется наличием ламинирующего слоя или других конструктивных элементов, защищающих солнечные элементы от воздействия внешней среды и ухудшающих теплоотвод.

Например, в [18] был предложен комбинированный преобразователь солнечной энергии, состоящий из фотоэлектрического модуля и прилегающего к нему снизу теплового коллектора, состоящего из медной пластины с припаянной к ней медной трубкой круглого сечения, свободные концы которой подсоединяют к системе циркуляции теплоносителя. Медная пластина прижата к тыльной стороне фотоэлектрического модуля, покрытой защитным слоем герметика. Для снижения тепловых потерь из-за рассеяния

тепла, коллектор с тыльной стороны закрыт теплоизолирующей пластиной.

В [19] предложен комбинированный преобразователь солнечной энергии, состоящий из фотоэлектрического модуля и примыкающего к нему снизу теплового коллектора, в нижней и верхней частях которого расположены горизонтальные патрубки для ввода и вывода теплоносителя, гидравлически соединенные вертикальными отрезками медных трубок прямоугольного сечения, равномерно распределенными по тыльной поверхности модуля. Для снижения потерь тепла на тыльной стороне коллектора смонтирована теплоизолирующая пластина.

Недостатками данных и подобных устройств являются их высокая стоимость и большой вес из-за использования медных коллекторов, а также сложность конструкции и трудоемкость сборки. Другим их недостатком является высокое тепловое сопротивление между фотоэлектрическим модулем и коллектором, обусловленное наличием диэлектрических элементов модуля, увеличивающих разницу температур между охлаждающей жидкостью и солнечными элементами модуля.

Наиболее близким по технической сущности является устройство [20], состоящее из герметичной рабочей камеры прямоугольной формы, образованной фронтальной прозрачной пластиной и тыльной пластиной, соединенных по периметру герметизирующей прокладкой, внутри которой с зазором к фронтальной пластине расположен фотопреобразователь на основе негерметизированных кремниевых солнечных элементов, закрепленный на тыльной пластине. По двум противоположным сторонам в тыльной пластине выполнены равномерно расположен-

ные сквозные отверстия, связывающие рабочую камеру с каналами для ввода и вывода жидкого теплоносителя, расположенными снизу и образованными тыльной пластиной, вертикальными стенками гидрофобной теплоизолирующей пластины, дополнительной герметизирующей прокладкой и дополнительной пластиной, установленной снизу и примыкающей к дополнительной прокладке и теплоизолирующей пластине.

Недостатками данного устройства являются повышенный вес и недостаточная надежность, обусловленные наличием в устройстве большого числа герметизирующих элементов, и высокая стоимость вследствие большого числа сборочных операций.

Задачами разработки являются: снижение веса устройства, повышение его надежности и снижение стоимости.

Конструкция комбинированной солнечной батареи

Комбинированная солнечная батарея (рисунки 1, 2) состоит из теплоизолирующей пластины 1, фотоэлектрического преобразователя 2, герметизирующей прокладки 3 и фронтальной прозрачной пластины 4. Преобразователь 2 присоединен к основанию 1 на локальных участках, образуя с ним зазор. Основание 1 связано с пластиной 4 с помощью прокладки 3, образуя герметичный рабочий объем, заполненный жидким теплоносителем. Узлы ввода теплоносителя в рабочий объем и вывода из него выполнены в основании 1 и состоят из каналов 5 и отверстий 6, соединяющих каналы 5 с рабочим объемом. Штуцеры 7 и 8 служат для подключения к системе циркуляции теплоносителя.

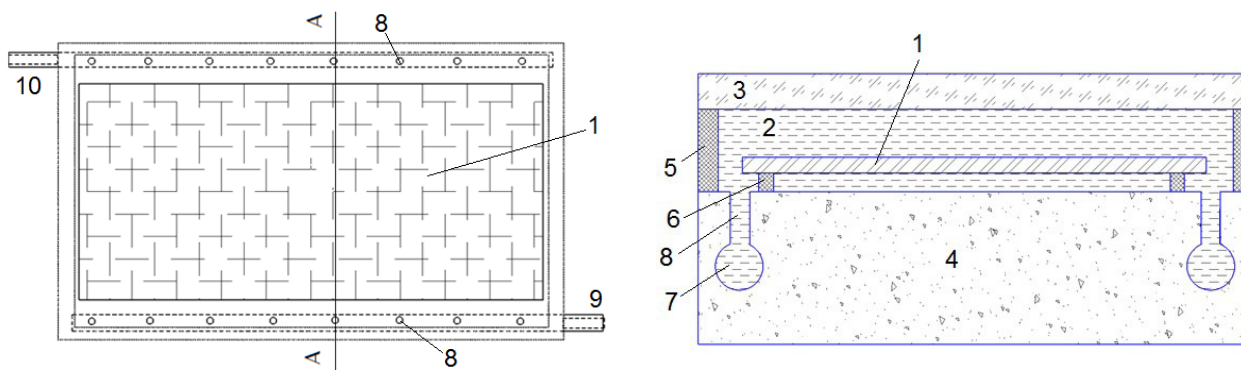


Рисунок 1 – Комбинированный преобразователь солнечной энергии (вид сверху и в разрезе)

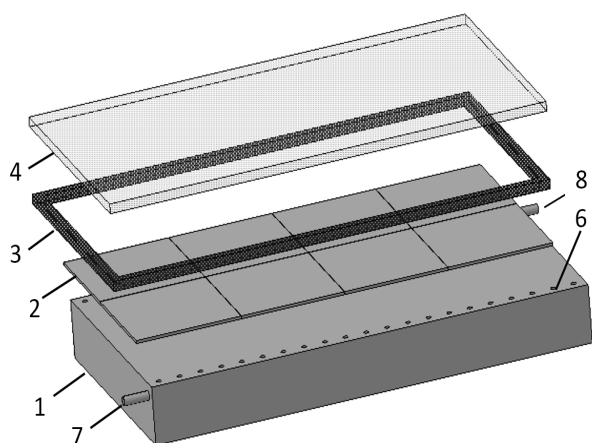


Рисунок 2 – Отдельные детали в порядке монтажа комбинированного преобразователя солнечной энергии

Проведенные патентный и литературный анализ показали, что во всех известных конструкциях фотопреобразователей не предусмотрено расположение входного и выходного каналов для ввода и вывода теплоносителя с дополнительными отверстиями под фотоэлектрическим элементом, и создание в области дополнительных отверстий зазоров между фотоэлектрическим элементом и тыльным электродом, а также между фотоэлектрическим элементом и боковыми стенками фотоприемной камеры.

Преимуществом предлагаемого преобразователя по сравнению с [21] является то, что заполнение рабочей камеры жидкостью, инертной по отношению к контактирующим с ней конструкционным элементам, позволяет защитить открытую поверхность солнечных элементов от атмосферы и исключить их деградацию в процессе работы. Кроме того, в отличие от обычных методов защиты солнечных элементов фотопреобразователей методом термо-вакуумного ламинирования, например пленкой «EVA», которая деградирует в процессе эксплуатации, ухудшая электрические характеристики фотопреобразователя и не может быть заменена на новую, использование жидкого теплоносителя для защиты фотопреобразователя позволяет легко заменить его при снижении прозрачности. Совокупность оптических свойств используемой жидкости позволяет повысить электрическую эффективность устройства за счет высокой прозрачности в видимой области спектра и снижения потерь на отражение света от тыльной поверхности фронтальной пластины благодаря промежуточному значению ее коэффициента преломле-

ния. Применение теплоносителя с высоким поглощением в инфракрасной области спектра за фундаментальным краем поглощения материала солнечных элементов позволяет эффективно накапливать тепловую энергию с последующим ее отводом в теплообменник.

Выбор расстояния между фронтальной и тыльной пластинами 1,5 – 2,5 мм, преимущественно 2 мм, обусловлен компромиссом между стремлением уменьшить вес устройства (массы теплоносителя, заполняющего рабочую камеру) и увеличить поглощение солнечного излучения теплоносителем.

Наличие зазоров между фотопреобразователем и фронтальной и тыльной пластинами, помимо герметизирующего эффекта, позволяет улучшить охлаждение солнечных элементов прокачиваемой жидкостью, а более высокая величина зазора с фронтальной пластиной позволяет улучшить прокачку жидкости (увеличить скорость течения) у поверхности солнечных элементов, где расположен р-п-переход, температура которого определяет электрическую эффективность работы фотопреобразователя. При этом скорость прокачки теплоносителя у тыльной стороны фотопреобразователя будет ниже вследствие гидродинамического торможения в более узком зазоре.

Изготовление тыльной пластины из гидрофобного теплоизолирующего материала, а также выполнение каналов для ввода и вывода жидкого теплоносителя и отверстий, соединяющих каналы с рабочей камерой непосредственно в теплоизолирующей пластине, стенками каналов и отверстий служит сам теплоизолирующий материал тыльной пластины, что позволяет существенно упростить конструкцию преобразователя и снизить его вес. Расположение соединительных отверстий вдоль длинных сторон тыльной пластины позволяет снизить перепад давлений в верхней и нижней частях камеры и, таким образом, снизить затраты энергии на прокачку жидкости, а выполнение проходного сечения каждого из каналов больше проходного сечения каждого из отверстий позволяет достичь равномерного протекания теплоносителя внутри рабочей камеры, повысить однородность температуры солнечных элементов фотоэлектрического модуля и, таким образом, дополнительно поднять его эффективность.

Предлагаемый комбинированный преобразователь солнечной энергии работает следующим образом. Солнечное излучение, прошедшее через фронтальную прозрачную пластину 4 по-

глощается заполняющим рабочую камеру теплоносителем (на рис. не показан), и установленным в рабочей камере фотопреобразователем 2. Часть излучения с энергией больше ширины запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлены солнечные элементы, преобразуется в электрическую энергию. При подключении нагрузки в ней выделяется электрическая мощность. Не преобразованная в электричество часть энергии выделяется в виде тепла, передается жидкому теплоносителю, циркулирующему в рабочей камере, поступаая с выхода теплообменника (не показан): холодный теплоноситель подается через патрубок 7 в канал 5 и через дополнительные отверстия 6 в рабочую камеру, где протекая в зазорах вдоль лицевой и тыльной сторон фотопреобразователя 2, нагревается и через дополнительные отверстия 6 и канал 5, расположенные с противоположной стороны рабочей камеры, через патрубок 8 попадает на вход теплообменника. Теплообменник, помещенный в теплоизолированную емкость с водой, нагревает ее, накапливая тепловую энергию.

Изготовление и тестирование опытного образца комбинированного преобразователя солнечной энергии

Был изготовлен опытный образец комбинированного преобразователя солнечной энергии размером $270 \times 530 \times 35 \text{ мм}^3$ (Рисунок 3). В качестве фронтальной пластины использовалось стекло толщиной 2 мм. Тыльная пластина с вы-

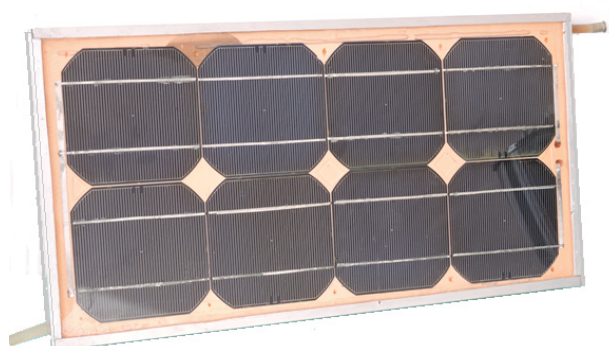


Рисунок 3 – Фотография опытного образца комбинированного преобразователя солнечной энергии с пиковой электрической мощностью 25 Вт и тепловой мощностью 80 Вт

полненными в ней каналами и соединительными отверстиями была изготовлена из теплоизолирующего материала (пенопласт плотностью 100 кг/м^3 толщиной 3 см). Восемь монокристаллических кремниевых солнечных элементов размером $125 \times 125 \text{ мм}^2$ и толщиной 150 мкм, размещенных в 2 ряда по 4 элемента, были соединены в последовательную электрическую цепь и закреплены на теплоизолирующей пластине нейтральным силиконовым герметиком, нанесенным в местах электрических переключек так, чтобы между тыльной пластиной и солнечными элементами образовался зазор толщиной 0,5 мм. Токосъемные шины были выведены на тыльную сторону теплоизолирующей пластины. Фронтальное стекло устанавливалось над теплоизолирующей пластиной с зазором 2 мм, который по периметру заполнялся на глубину 5 мм силиконовым герметиком, образуя после полимеризации герметичную прокладку.

В отверстия каналов герметично монтировались штуцера для соединения с теплообменником. Теплообменник соединялся с преобразователем с помощью силиконовых шлангов и помещался в теплоизолированную емкость с водой. В качестве теплоносителя использовался пропиленгликоль, который полностью удовлетворяет требованиям по оптическим (Рисунок 4) и технологическим характеристикам. Испытание коррозионной стойкости деталей преобразователя, включая солнечные элементы, проводилось в течение 2-х лет и не показало ухудшения эксплуатационных характеристик.

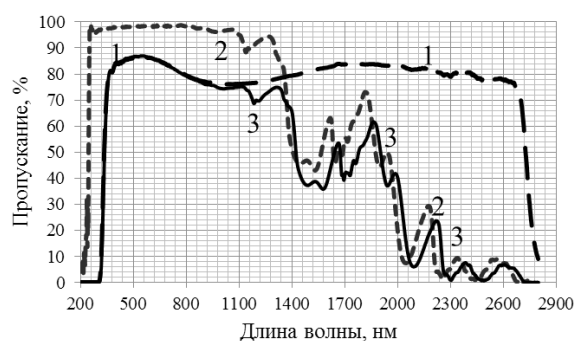


Рисунок 4 – Зависимость оптического пропускания пропиленгликоля, выбранного в качестве теплоносителя (1-пропиленгликоль толщиной 0,02 мм между 2-мя стеклами толщиной 2 мм каждое; 2-пропиленгликоль толщиной 1 мм; 3-пропиленгликоль толщиной 1 мм между 2-мя стеклами толщиной 2 мм каждое)

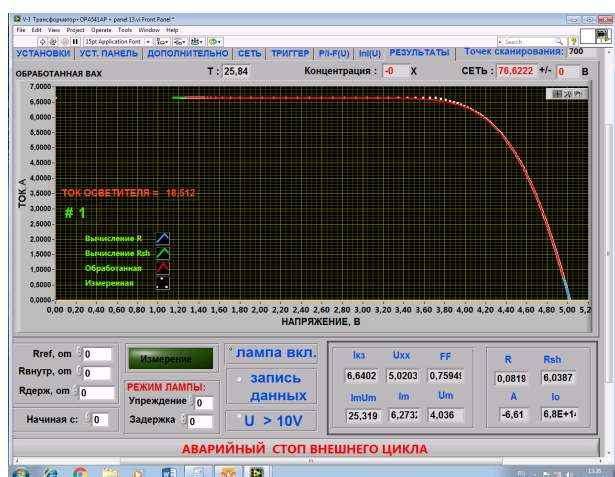


Рисунок 5 – Скриншот измерения вольтамперных характеристик для опытного образца комбинированного преобразователя солнечной энергии с пиковой электрической мощностью 25 Вт и тепловой мощностью 80 Вт, $T_{вх} = T_{вых} = 43^{\circ}\text{C}$, 27-04-2016 13:20

Пиковая электрическая мощность опытного образца преобразователя при стандартных условиях составила 25 Вт (Рисунок 5), а тепловая – 80 Вт. Таким образом, за 8 часов работы может быть получено 200 Вт·ч электрической энергии и более 640 Вт·ч тепловой энергии. Этой электрической энергии достаточно для освещения светодиодными лампами небольшого коттеджа и использования мультимедийных устройств в течение порядка 4 часов. Полученной тепловой энергии будет достаточно для нагрева 20 литров воды от 20 до 50°C и ее использования в вечернее время для бытовых нужд.

Работа выполнена по гранту 3077/ГФ4 Министерства образования и науки Республики Казахстан «Создание автономного каскадного солнечного генератора тепловой и электрической энергии мощностью 1 кВт»

Литература

- 1 Florschuetz L.W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat-plate collectors // Solar Energy. – 1979. – Vol.22, no.4. – P.361–366.
- 2 Chow T.T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. – 2010. – Vol.87, no.2. – P.365–379.
- 3 Cox C.H. III and Raghuraman P. Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors // Solar Energy. – 1985. – Vol.35, no.3. – P.227–241.
- 4 Lalovirc B., Kiss Z. and Weakliem H. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector // Solar Cells. – 1986. – Vol.19, no.2. – P.131–138.
- 5 Garg H.P. and Adhikari R.S. Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation // Renewable Energy. – 1997. – Vol. 11, no. 3. – P.363–385.
- 6 Garg H.P. and Adhikari R.S. Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs // International Journal of Energy Research. – 1999. – vol. 23, no.15. – P.1295–1304.
- 7 Sopian K., Yigit K.S., Liu H.T., Kakaç S., Veziroglu T.N. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. // Energy Conversion and Management. – 1996. – Vol.37, no.11. – P.1657–1670.
- 8 Sopian K., Liu H.T., Kakaç S., Veziroglu T.N. Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems // Energy Conversion and Management. – 2000. – Vol.41, no.4. – P.353–365.
- 9 Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water // Energy Conversion and Management – 1994. – Vol.35, no.11. – P.967–972.
- 10 Bergene T., Lshvvik O.M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells // Solar Energy. – 1995. – Vol.55, no.6. – P.453–462.
- 11 D.W. de Vries Design of a photovoltaic/thermal combi-panel (Ph.D. thesis), Eindhoven Technical University, Eindhoven, The Netherlands, 1998.
- 12 Fujisawa T., Tani T. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1997. – Vol.47, no.1–4 – P.135–148.
- 13 Norton B., Edmonds J.E.J. Aqueous propylene-glycol concentrations for the freeze protection of thermosiphon solar energy water heaters // Solar Energy. – 1991. – Vol.47, no.5. – P.375–382.
- 14 Rockendorf G., Sillmann R., Podlowski L., Litzenburger B. PV-hybrid and thermoelectric collectors // Solar Energy. – 1999. – Vol.67, no.4–6. – P.227–237.
- 15 Davis M.W., Fanney A.H., Dougherty B.P. Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures // Journal of Solar Energy Engineering. – 2001. – Vol.123, no.3. – P.200–210.
- 16 Moshfegh B., Sandberg M. Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 1998. – Vol.2, no.3. – P.287–301.
- 17 Chow T.T., Tiwari G.N., Menezo C. Hybrid Solar: A Review on Photovoltaic and Thermal Power Integration // International Journal of Photoenergy. – Vol. 2012. – 307287. – 17 p.

18 Антощенко В.С., Антощенко Е.В., Лаврищев О.А., Францев Ю.В., Нестеренков А.Г. Расчет комбинированной теплофотозлек-трической системы с концентрированными потоками солнечной радиации // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – №2. – С.27-31.

19 Katic I. Measurement Report – Test of PV/T-module »PVTwin» // A Report of IEA SHC – Task 35 PV/Thermal Solar Systems Report DC4-1 December, 2006, http://archive.iea-shc.org/publications/downloads/DC4-1_Measurement_Report_Test_of_PVT_module_PVTwin_inkl_forside.pdf

20 Amna A. Alzaabi, Nadine K. Badawiyeh, Hind O. Hantoush, A. K. Hamid Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Shar-jah, UAE // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. – 2014. – Vol.3, no.4. – P. 385-389.

21 Антощенко В.С., Лаврищев О.А., Францев Ю.В., Антощенко Е.В. Фотопреобразователь концентрированного излучения // Инно-вационный патент РК № 27952, бюл. №12, 25.12.2013.

References

- 1 L.W. Florschuetz, *Solar Energy*, 22 (4), 361–366, (1979). DOI: 10.1016/0038-092X(79)90190-7
- 2 T.T. Chow, *Applied Energy*, 87 (2), 365–379, (2010). DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037
- 3 C.H. Cox III and P. Raghuraman, *Solar Energy*, 35 (3), 227–241, (1985). DOI: 10.1016/0038-092X(85)90102-1
- 4 B. Lalovic, Z. Kiss and H. Weakliem, *Solar Cells*, 19 (2), 131–138, (1986). DOI: 10.1016/0379-6787(86)90038-4
- 5 H.P. Garg and R.S. Adhikari, *Renewable Energy*, 11 (3), 363–385, (1997). DOI: 10.1016/S0960-1481(97)00007-4
- 6 H.P. Garg and R.S. Adhikari, *International Journal of Energy Research*, 23 (15), 1295–1304, (1999).
- 7 K. Sopian, K.S. Yigit, H.T. Liu, S. Kakac and T.N. Veziroglu, *Energy Conversion and Management*, 37 (11), 1657–1670, (1996). DOI: 10.1016/0196-8904(96)00010-6.
- 8 K. Sopian, H T. Liu, S. Kakac, and T. N. Veziroglu, *Energy Conversion and Management*, 41 (4), 353–365, (2000). DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00115-6.
- 9 J. Prakash, *Energy Conversion and Management*, 35 (11), 967–972, (1994). DOI: 10.1016/0196-8904(94)90027-2.
- 10 T. Bergene and O.M. Lovvik, *Solar Energy*, 55 (6), 453–462, (1995). DOI: 10.1016/0038-092X(95)00072-Y.
- 11 D.W. de Vries, Ph.D. thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven, The Netherlands, 1998.
- 12 T. Fujisawa and T. Tani, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47, (1–4), 135–148, (1997). DOI: 10.1016/S0927-0248(97)00034-2.
- 13 B. Norton and J.E.J. Edmonds, *Solar Energy*, 47 (5), 375–382, (1991). DOI: 10.1016/0038-092X(91)90031-Q.
- 14 G. Rockendorf, R. Sillmann, L. Podlowski and B. Litzemberger, *Solar Energy*, 67, (4–6), 227–237, (1999).
- 15 M.W. Davis, A.H. Fanney, and B.P. Dougherty, *Journal of Solar Energy Engineering*, 123, (3), 200–210, (2001). DOI: 10.1115/1.1385825
- 16 B. Moshfegh and M. Sandberg, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2 (3), 287–301, (1998). DOI: 10.1016/S1364-0321(98)00005-7
- 17 T.T. Chow, G.N. Tiwari and C. Menezo, *International Journal of Photoenergy*, 2012, 307287, 17 p., doi:10.1155/2012/307287 DOI: 10.1155/2012/307287
- 18 V.S. Antoschenko, Ye.V. Antoschenko, O.A. Lavrishchev, Yu.V. Francev, and A.G. Nesterenkov, *Energetika i toplivnyye resursy Ka-zakhstana*, 2, 27-31, (2010). (in Russ).
- 19 Katic, A Report of IEA-SHC – Task 35 PV/Thermal Solar Systems, Report DC4-1, December, 2006, http://archive.iea-shc.org/publications/downloads/DC4-1_Measurement_Report_Test_of_PVT_module_PVTwin_inkl_forside.pdf
- 20 A.A. Alzaabi, N.K. Badawiyeh, H.O. Hantoush and A.K. Hamid, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 4(3), 385-389, (2014). DOI: 10.12720/sgce.3.4.385-389
- 21 V.S. Antoschenko, O.A.Lavrishchev, Yu.V.Francev and E.V.Antoschenko., *Innovatsionnyy patent RK, #27952, bul. #12, 25.12.2013.* (in Russ).