

УДК 53.06:535.215, 535.8, 621.472

В. С. АНТОЩЕНКО, Ю. В. ФРАНЦЕВ, И. Х. ЖАРЕКЕШЕВ,
О. А. ЛАВРИЩЕВ, Е. В. АНТОЩЕНКО

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ОРИГИНАЛЬНЫХ ТЕПЛО-ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Представлены основные этапы разработки нового типа преобразователя солнечной энергии- комбинированного монолитного тепло-фотоэлектрического модуля. Рассмотрена работа такого преобразователя в условиях концентрированного облучения. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности эффективного преобразования более чем десятикратных потоков солнечной радиации при использовании - в качестве базовых - промышленных солнечных элементов типоразмера 125 мм. Продемонстрирован прототип тепло-фотоэлектрической концентраторной установки с двухосевой системой слежения с пиковой мощностью 45 Вт при восьмикратной оптической концентрации.

1. Введение. Гелиоэнергетика все чаще сталкивается с проблемой развития наиболее экономичных и эффективных преобразователей солнечной энергии. Одним из решений создания возобновляемых источников может являться использование гибридных систем. Фотовольтаические тепловые гибридные солнечные коллекторы, известные в литературе как системы hybrid-PV/T или PVT [1, 2], представляют собой системы, которые конвертируют солнечную радиацию в тепловую и электрическую энергию одновременно. В этих системах фотоэлектрический элемент (или модуль, состоящий из множества фотоэлектрических элементов), который преобразует электромагнитное излучение (фотоны) в электрический ток, комбинируется с обычным солнечным тепловым коллектором, размещаемым снизу и захватывающим оставшуюся энергию. В таких конструкциях фотоэлектрический и тепловой элементы пространственно разделены и используются самостоятельно.

Известно, что эффективность преобразования фотоэлектрических элементов падает с ростом температуры в основном вследствие отрицательного температурного коэффициента напряжения холостого хода. Логично, что можно создать монолитную систему с низким тепловым сопротивлением, в которой тепло забирается от фотоэлектрических элементов, например, рабочей жидкостью, предупреждая их перегрев, и, тем самым, сохраняя высокую эффективность преобразования. Кроме того, передвигаясь далее по замкнутому контуру, жидкий теплоноситель покидает фотоэлектрический элемент с более высокой температурой и передает приобретенную тепловую энергию в теплообменник для ее дальнейшего использования во втором контуре.

Охладившись в теплообменнике, теплоноситель возвращается к фотоэлектрическому элементу, имея более низкую температуру, и замыкает цикл Карно. Тем самым, источник помимо электрической энергии производит еще и тепловую энергию за счет прямого инфракрасного излучения. Несмотря на то, что КПД цикла Карно достаточно низок, тем не менее, доля выработки тепловой энергии по отношению к электрической после преобразования солнечной энергии автономным источником составляет до 80%.

2. Гибридная концепция. Концентраторные системы (CPVT или PV/T-концентраторы) имеют явное преимущество перед неконцентраторными системами, которое проявляется в том, что в них значительно снижается количество необходимых фотоэлектрических элементов, которых зачастую являются сравнительно более дорогостоящими, чем другие компоненты системы. Основными трудностями в разработке концентраторных источников являются обеспечение надежного охлаждения фотоэлементов [3, 4] и оснащение долговременной механической системой слежения за Солнцем, трекером [5-7].

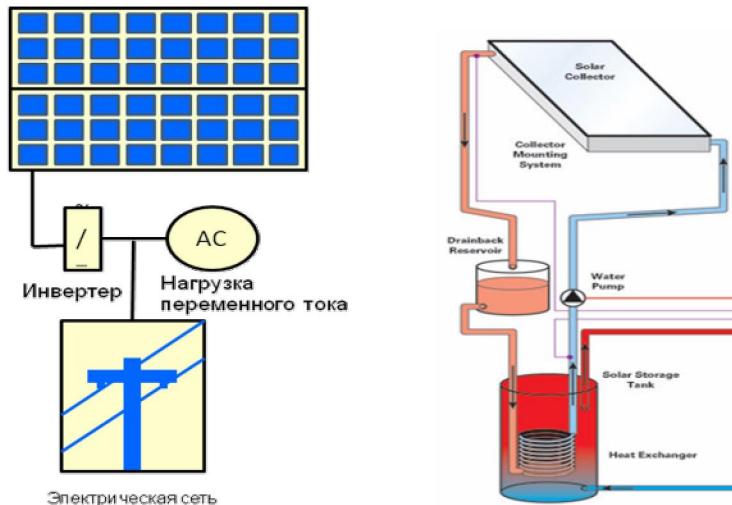


Рис. 1. Гибридный автономный источник на основе совмещения фотоэлектрического преобразователя (слева) и солнечного теплового коллектора (справа)

Фотовольтаический модуль (см. рис. 1 слева) и солнечный коллектор (см. рис. 1 справа), используемые обычно как самостоятельные преобразователи солнечной энергии, в нашем источнике объединены в одном устройстве, обеспечивая суммарный энергетический выход.

Применение концентрированного света дополнительно повышает эффективность работы совмещенной тепло-фотоэлектрической системы за счет снижения тепловых потерь от фронтальной поверхности модуля благодаря ее малым размерам. Экономический выигрыш от использования гибридных концентраторных систем состоит в том, что большая часть дорогостоящих полупроводниковых солнечных элементов замещается более дешевыми конструкционными элементами тепло-фотоэлектрической системы, такими как рама и закрепленным на ней ансамблем плоских зеркал.

3. Исследовательская компонента. Научно-исследовательская часть связана с разработкой новой конструкции концентраторного тепло-фотовольтаического модуля, обеспечивающей наиболее низкие потери электрической мощности на последовательном сопротивлении, эффективное охлаждение и устранение потерь отводимой тепловой энергии. На рис. 2 показано распределение электрических потерь мощности для обычной (слева) и предлагаемой нами конструкции распределенных контактов (справа). Видно, что благодаря наличию распределенного электрического контакта суммарные потери мощности, равные соответствующим площадям под треугольниками, резко снижаются.

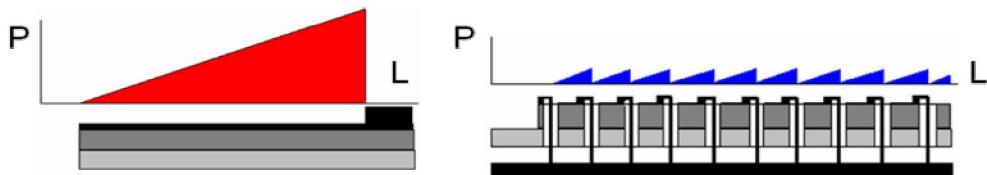


Рис. 2. Распределение потерь мощности Р как функция расстояния до контакта вдоль поверхности солнечного элемента.

Слева – без распределения контактов, справа – с распределенными контактами.

На рис. 3 схематично изображен поперечный разрез конструкции тепло-фотоэлектрического модуля с фронтальными и тыльными контактами, распределенными по всей площади солнечного элемента. Наличие в конструкции зазора между токосъемной пластиной и солнечным элементом позволяет жидкостному теплоносителю непосредственно омывать солнечный элемент и, таким образом, осуществлять эффективный теплоотвод. Эта оригинальное конструктивное решение было запатентовано в работе [8].

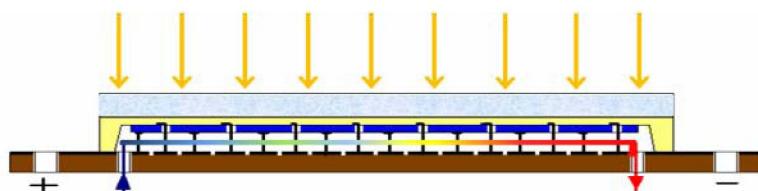


Рис. 3. Схема тепло-фотоэлектрического модуля с распределенной тыльно-контактной структурой.
Жидкостной теплоноситель входит в зазор слева снизу с низкой температурой
и выходит справа снизу с высокой температурой

Чтобы проверить высокую эффективность фотоэлектрического модуля нами были измерены различные рабочие режимы при температуре 25С. На рис. 4 приведены экспериментальные вольтамперные характеристики нашего тепло-фотоэлектрического устройства при разных уровнях облучения. Кривые справа показывают, что если при однократном облучении его вольтамперная характеристика совпадает с таковой для обычного элемента (нижняя кривая), то при восьмикратной концентрации он генерирует мощность на 60% больше, чем традиционный солнечный элемент. Эта разница в мощности ΔP соответствует площади между верхней и средней кривой.

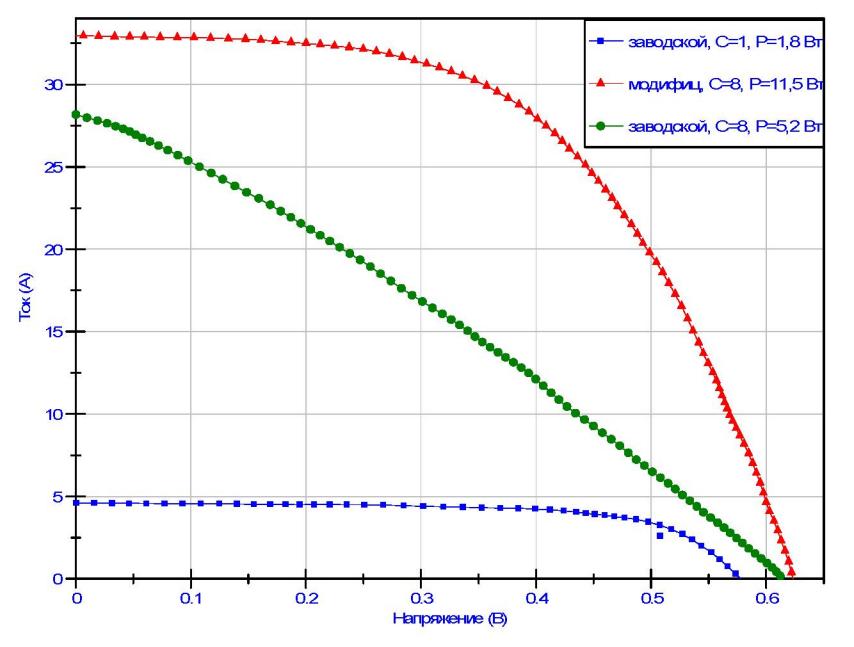


Рис. 4. Зависимость электрического тока от напряжения при двух кратностях солнечной интенсивности $C=1$ и $C=8$.
Верхняя кривая соответствует нашему концентраторному гибридному при $C=8$

Следует отметить, что при такой высокой интенсивности обычный элемент перегревается и выходит из строя уже через несколько секунд тестирования (средняя кривая), в то время как тепло-фотоэлектрический преобразователь сохраняет свои параметры в течение всего периода испытаний (верхняя кривая).

На рис. 5 представлено семейство вольтамперных характеристик для трехэлементной концентраторной батареи при различных уровнях облучения от $C=1$ до $C=11$ крат. Видно, что с ростом интенсивности светового потока C наблюдается слабая нелинейность.

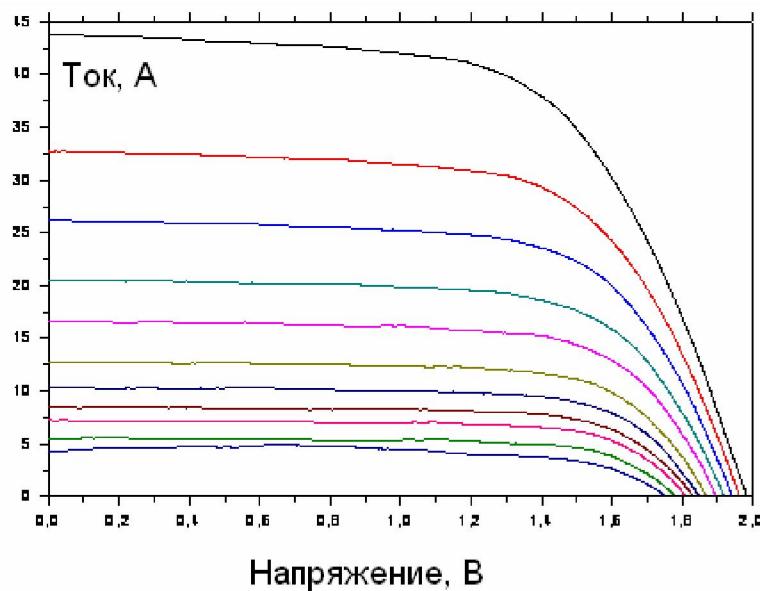


Рис. 5. Зависимость электрического тока от напряжения при различной кратности солнечной интенсивности от $C=1$ до $C=11$ снизу вверх

4. Автономный тепло-фотоэлектрический преобразователь. На основе разработанных и экспериментально проверенных усовершенствований конструкции эффективного охлаждения и отвода тепла был создан образец-прототип тепло-фотоэлектрической системы с пиковой мощностью 45 Вт с тремя солнечными модулями на основе кремния. Опытная установка автономного источника электрической и тепловой энергии на основе оригинальных тепло-фотоэлектрических солнечных модулей изображена на рис. 6. В систему входит трекерная установка слежения за солнцем, потребляемая мощность которой минимизирована за счет оптимальных решений программного управления изменения угла от времени. Электрическая мощность этой установки при стандартных условиях составляет приблизительно 45 Вт, а тепловая мощность – около 250 Вт.



Рис. 6. Опытный образец-прототип тепло-фотоэлектрической системы с пиковой мощностью 45 Вт с тремя модулями. Справа показан вид модулей с лицевой и тыльной стороны

Концентратор представляет собой аналог линзы Френеля. Каждая пара из двенадцати зеркал имеет определенный угол наклона к плоскости рамы концентратора. С его помощью солнечный свет, отражаясь от ансамбля зеркал, фокусируется на лицевой поверхности тепло-фотоэлектрической батареи в пятно прямоугольной формы размером 135x440 мм с восьмикратной

интенсивностью. Фотоэлектрическая панель с помощью двух штанг жестко закреплена к раме. Использованием плоских зеркал прямоугольной формы достигается высокая однородность светового пятна на фронтальной стороне фотоэлектрического модуля.

Поминутный режим слежения за положением Солнца обеспечивает фокусировку излучения на модуле в процессе работы установки при минимальном потреблении энергии аккумулятора (менее 1% от вырабатываемой энергии). Угловое положение рамы управляется трекером, двухосевое вращение которого программируется точной ориентацией на траекторию движения Солнца в течении светового дня. По истечению светового дня трекер возвращает концентратор на стартовую угловую позицию. С началом следующего светового дня цикл вращения трекера повторяется.

5. Технологическая аспект. Инженерная комонента производства включает в себя отработку более чем двадцати отдельных технологических и сборочных операций при создании тепло-фотоэлектрического модуля. Основными операциями являются:

- а) изготовление токосъемной платы с контактными дорожками,
- б) фотолитография токосъемной шины,
- в) формирование набора контактных столбиков,
- г) электрохимическое осаждение контактных пятаков на тыльную сторону солнечных батарей,
- д) монтаж солнечных батарей на токосъемную плату,
- е) ламинирование герметическим компаундом и
- ж) изготовление узла циркуляции охлаждающей жидкости.

На рис. 6 справа изображены фотографии фронтальной и тыльной поверхности фотоэлектрической батареи, состоящей из трех модулей, изготовленных в результате вышеуказанных технологических операций.

Интересно отметить также, что многие концентраторные системы, изготовленные за рубежом, основаны на параболоидной форме зеркального коллектора, изготовление которого предполагает достаточно трудоемкую технологию [6]. В нашем случае геометрия основной монтажной рамы коллектора и системы зеркал является плоскостной, что значительно упрощает процесс их изготовления. Немаловажным преимуществом предлагаемой планарной конструкции представляется то обстоятельство, что система легко разбираема, может складироваться, не занимая больших площадей, и также без затруднений транспортироваться. Указанный аспект логистики мобильных преобразователей малой и средней мощности особенно важен с экономической точки зрения для удаленных или локально разбросанных потребителей.

Себестоимость одного ватта пиковой мощности предлагаемого в работе совмещенного преобразователя составляет 2-3 \$US, в то время как для преобразователей, изготовленных за рубежом и впоследствии реализуемых на отечественном рынке, она достигает 5-6 \$US и более. Почти двукратное снижение удельной цены выступает явным преимуществом автономных комбинированных систем и свидетельствует о конкурентоспособности предлагаемого нами преобразователя на местных рынках. В дальнейшем планируется создать и опробовать в естественных погодных условиях тепло- фотоэлектрическую систему мощностью 160 Вт и выше.

Важным фактором при производстве солнечных тепло-фотоэлектрических концентраторных батарей является оснащение и последовательность операций на производственной линии. Планируемое производство должно состоять из пяти участков: химической обработки и фотолитографии, вакуумного напыления, сборочного участка, участка тестирования и участка механической обработки. Кроме того, должно быть предусмотрено также специальное помещение, предназначенное для складирования готовой продукции.

6. Заключение и выводы. Концентраторные источники солнечной энергии на основе комбинирования теплых коллекторов и фотоэлектрических модулей в единую систему обладают большим потенциалом и могут занять существенную долю на рынке альтернативной энергетики [9, 10]. В Казахстане они занимают даже лидирующую позицию, так как отраслями энергетики республики не производятся конечные фотоэлектрические системы, готовые к прямому использованию. Большинство реализуемых на отечественном рынке солнечных преобразователей импортировано либо целиком, либо по компонентам.

Предлагаемый в настоящей работе источник тепла и электричества основан на оригинальной конструкции теплофотоэлектрических солнечных батарей. По сравнению с обычными стационарными плоскостными батареями, на ее производство требуется значительно меньше денежных

затрат на единицу пиковой мощности. Более того, с экологической точки зрения производство и работа автономных источников более безвредны из-за меньшего влияния на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Sonneveld, P.J., Swinkels B., van Tuijl A.J., et al. Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses // Solar Energy. – 2011. – V. 85. – P. 432-442.
- 2 Segal A, Epstein M, Yogeve A Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands // Solar Energy. – 2004. – V. 76. – P. 591-601.
- 3 Mittelman G., Kribus A., Dayan A. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems // Energy Convers Manage. – 2007. – V. 48. – P. 2481-2490.
- 4 Kribus A., Kaftori D., Mittelman D., Hirshfeld F., Flitsanov A., Dayan A. A miniature concentrating photovoltaic and thermal system // Energy Convers Manage. – 2006. – V. 47. – P. 3582-3590.
- 5 Zondag H.A., van Helden W.G.J., Elswijk M.J., Bakker M. PV-Thermal collector development – an overview of the lessons learnt / In: Hoffmann W., Bal J.L., Ossenbrink H., Palz W., Helm P. / Editors. 19th EPSEC. – Paris, 2004. – 214 p.
- 6 Zondag H.A., de Vries D.W., van Helden W.G.J., van Zolingen R.J.C., van Steenhoven A.A., The yield of different combined PV-thermal collector designs // Solar Energy. – 2003. – V. 74. – P. 253-269.
- 7 A. Tiwari A., Sodha M.S. Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation // Solar Energy. – 2006. – V. 80. – P. 751-759.
- 8 Антощенко В.С., Лаврищев О.А. Способ формирования контактного рисунка // Инновационный патент РК №20593 приор.12.11.2007.
- 9 Sarhaddi F, Farahat S, Ajam H, Behzadmehr A. Energetic optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector // Int. Jour. Energy Res. – 2010. – P. 343-348.
- 10 Huang B.J., Lin T.H., Hung W.C., Sun F.S. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems // Solar Energy. – 2001. – V. 70. – P. 443-448.

*B. C. Антощенко, Ю. В. Францев, И. Х. Жарекешев,
О. А. Лаврищев, Е. В. Антощенко*

ОҢТАЙЛЫ ЖЫЛЫЛЫҚ-ФОТОЭЛЕКТРЛІК КҮН КӨЗІ БАТАРЕЯЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ЭЛЕКТРЛІК ЖӘНЕ ЖЫЛЫЛЫҚ ЭНЕРГИЯСЫНЫң АВТОНОМДЫ КӨЗДЕРІ

Мақалада күн көзі энергиясын өзгертудің жана үлгісі – құрастырылған монолиттік жылыштық-фотоэлектрлік модулін жасап шыгарудың негізгі кезеңдері зерделенген. Мұндай өзгертудің шоғырланған сәулеге түсіру жағдайындағы жұмысы қарастырылған. Эксперименталды зерттеудің қорытындылары күн радиациясы тасқынын 125мм көлеміндегі базалық өнеркәсіптік күн көзі элементтерін пайдаланғанда он есе және одан да жоғары тиімділікпен өзгертуге болатынын көрсетті. Сегизеселік оптикалық шоғырландыру жағдайында екібілікті байқау жүйесі бар, қуаттылығы 45 Вт жылыштық-фотоэлектрлік концентраторлық қондырығының үлгісі бейнеленген.

*V. S. Antoshenko, Yu. V. Francev, I. Kh. Zharekeshev,
O. A. Lavrishev, E. V. Antoshenko*

AUTONOMOUS SOURCES OF ELECTRIC AND HEAT ENERGY ON ORIGINAL THERMAL PHOTOELECTRIC SOLAR BATTERIES

The main stages for development of a new type of solar energy converter – a combined monolith thermo-photoelectric module are presented in the paper. Working regimes of this converter under conditions of the concentrated are considered. Obtained experimental results manifest themselves a possibility of effective conversion of more than tenfold flows of solar radiation by using - as the base – industrial solar elements of linear size of 125mm. A prototype of the thermo-photoelectric concentrator set-up with the sun-tracking system of double axes rotation with 45W peak power at the eight-fold optical concentration is demonstrated.

Key words: solar energy conversion, photovoltaic engineering, solar elements, thermal collectors, photoelectric modules.