

УДК 535.215, 621.472, 535.8, 53.06, 620.91

В.С.Антощенко, Ю.В.Францев, И.Х.Жарекешев, О.А.Лаврищев

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы (E-mail: isa2020@mail.ru)

Концентраторный тепло-фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии

В статье представлены методы оптимизации и повышения эффективности работы теплового фотовольтаического преобразователя (ТФЭП). В основе ТФЭП лежит использование концентрированной солнечной радиации. Предложенная гибридная система независимо преобразует как видимый солнечный свет, так и тепловую радиацию. Исходя из затрат определена себестоимость единичной системы как функция степени концентрации. Рассчитана эффективность концентраторного ТФЭП для процессов передачи тепла и преобразования энергии.

Ключевые слова: фотоэлектричество, преобразование солнечной энергии, солнечные элементы, технология фотоприемников, фотопреобразователи, термоколлекторы, возобновляемые источники.

Введение

По мере того, как глобальные изменения климата становятся очевидными и мировые резервы нефти, по-видимому, подходят к пределу своего пикового производства, все больше необходимым и актуальным становится решение проблем совершенствования новых типов энергоснабжения. Помимо увеличения эффективности использования традиционных видов энергопотребления, развитие альтернативных источников является насущной задачей сегодняшнего дня. В особенности играют важную роль в этом процессе разработка и внедрение в экономику *возобновляемых источников энергии*. Наиболее перспективной и многообещающей технологией для преобразования энергии возобновляемыми источниками представляется прямое использование солнечной радиации. Фотовольтаические элементы «конвертируют» свет солнца непосредственно в электричество, в то время как солнечные коллекторы производят тепло.

Концентраторные (или концентрированные) системы предлагают возможность увеличения электрического выхода из фотовольтаических элементов (или фотоэлементов, сокращенно ФЭ). Высокая концентрация солнечного излучения достигается за счет рефлектирования или фокусирования радиации на сравнительно небольшом участке, где располагается ФЭ. Например, с помощью отражения (рефлектирования) можно добиться степени концентрации солнечного света в десятки и сотни раз на малой площади поверхности ФЭ, со стороны которой падает световое излучение. Ключевая идея при этом заключается в том, что материалы для создания рефлектора значительно дешевле (из расчета на единицу площади), чем цена относительно дорогих фотоэлементов, основу которых зачастую составляют различные дорогостоящие полупроводниковые (и зачастую высокотехнологичные) компоненты. Исходя из теории, замещение всей площади, занимаемой ФЭ только материалом рефлектора, позволит производить электричество от солнечной радиации по более низким и, следовательно, более конкурентоспособным ценам.

Однако следует иметь в виду, что с увеличением концентрации падающего на систему солнечного излучения нарастает потребность в эффективном охлаждении фотоэлементов. Это необходимо для того, чтобы удерживать умеренную температуру (не допуская перегрева) и, тем самым, обеспе-

чить нормальный режим функционирования ФЭ. В результате вынужденного понижения температуры можно добиться дополнительного выигрыша в энергии, отводимой от системы в форме тепла. Эта «энергодобавка» достигается за счет использования воздуха, воды или другого теплоносителя в качестве охлаждающего агента.

Фотоэлектрические преобразователи

Общеизвестно, что фотоэлектрическое преобразование солнечной радиации представляет собой одно из перспективных направлений развития альтернативной энергетики. В основе этого преобразования лежит фундаментальное квантовое явление — фотоэффект, суть которого заключается в том, что световая энергия Солнца прямым образом преобразуется в электрическую энергию. Электронный прибор, работающий на основе фотоэффекта, принято называть фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП). На роль и применение ФЭП в промышленности впервые указывал А.Ф.Иоффе еще в 1932 г. [1].

Ключевой компонентой фотоэлектрического преобразователя является полупроводниковый солнечный элемент, в котором под воздействием электромагнитного излучения генерируются носители заряда. Фактически происходит пространственное разделение электронно-дырочных пар за счет электрического поля запирающего слоя p-n-перехода. В результате создается фототок, т.е. генерируется электрическая энергия. КПД полупроводниковых фотоэлектрических генераторов на практике варьируется от 15 до 20 % и может достигать 35–40 %, в зависимости от материала и его чистоты [2].

Следует отметить, что ФЭП обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими традиционными преобразователями энергии. Этими преимуществами являются бесшумность, минимум воздействия на окружающую среду, низкий уровень эксплуатационных расходов и др. За счет компактности и удобства логистики ФЭП-генераторы могут быть инсталлированы в непосредственной близости от конечного потребителя малой энергии, что, в свою очередь, значительно облегчает и, как следствие, экономит транспортировку электроэнергии от источника до удаленного потребителя.

Территория Казахстана обладает большим потенциалом для использования солнечной энергии с помощью возобновляемых источников. Это связано с благоприятными климатическими условиями республики (высокая среднегодовая продолжительность солнечного сияния, безоблачное состояние атмосферы). Несмотря на это, устройства солнечной энергетики, в частности фотоэлектрические генераторы, не находят в настоящее время достаточно широкого применения в РК. Это происходит по разным причинам, главной из которых выступает сравнительно высокая стоимость ФЭП. Рынок фотоэлектрических батарей и солнечных коллекторов в Казахстане начал формироваться только в последние годы. Различные отечественные и производимые за рубежом фотоэлектрические преобразователи варьируют по цене от 6 до 15 US\$ за один ватт пиковой мощности.

Гибридные ТФЭП

Одним из путей повышения эффективности возобновляемых источников и дальнейшего снижения себестоимости их производства является использование так называемых концентраторных гибридных систем, сочетающих в себе преимущества фотоэлектрических систем и тепловых коллекторов [3]. Фактически *гибридность* означает совмещение фотоэлектрического и теплового преобразования солнечной энергии в одном устройстве, которое принято называть тепло- фотоэлектрическим преобразователем, сокращенно ТФЭП. В настоящей статье предлагаются разработка и создание экономически эффективных тепло-фотоэлектрических преобразователей с концентрированием солнечной энергии почти в десять раз.

Комбинация фотоэлектрического преобразователя и теплового солнечного коллектора в одном устройстве, генерирующем как электрическую, так и тепловую энергию, в зарубежной литературе получила название систем типа CPVT (concentrated photovoltaic thermal systems). Эти системы конвертируют солнечную радиацию по двум различным частям спектра солнечного излучения: видимой и инфракрасной. Видимая часть спектра, соответствующая ширине запрещенной зоны полупроводника (1.4 эВ для GaAs и 1.1 эВ для кремния), используется для преобразования светового потока в фототок, в то время как инфракрасная часть спектра (<0.8 эВ) служит для прямого нагрева жидкого агента в первом контуре теплообменника.



Рисунок 1. Опытный образец-прототип концентраторной гибридной тепло-фотоэлектрической системы ТФЭП с пиковой мощностью 45 Вт с солнечной концентрацией $C = 8$. Приведена конструкция с двумя солнечными элементами

На рисунке 1 изображена комбинированная конструкция разработанной нами гибридной системы, в которой фотоэлектрический и тепловой компоненты преобразования пространственно разделены и используются функционально независимо друг от друга. Однако оба компонента объединены на одной общей несущей конструкции. Понятно, что такая комбинация в единичном устройстве приводит к почти двойной экономии денежных затрат и трудовых ресурсов для создания полной (гибридной) установки. Кроме того, один и тот же локальный потребитель использует как тепловую, так и электрическую энергию от одной системы.

Опытно-конструкторский образец состоит из солнечного модуля, концентратора (т.е. системы зеркал с трэккером) и системы охлаждения. Концентратор представляет собой единую систему зеркал (на рис. 1 слева), жестко монтированных под разными углами к плоскости несущей металлической рамы. В нашем случае солнечная радиация концентрируется восьмью зеркалами, следовательно, степень концентрации равна $C = 8$. Двухэлементный солнечный модуль содержит два солнечных pol-Si элемента и тыльную сетку для отвода тепла, входящую в систему охлаждения. Для того чтобы на солнечный модуль постоянно падал свет, система зеркал снабжена трэккером. Последний обеспечивает точное слежение поверхности зеркального коллектора за траекторией солнца в течение светового дня.

Подчеркнем, что любой выигрыш в энергии сопровождается определенными необратимыми потерями энергии в ТФЭП. Энергетические потери связаны с:

- а) отражением солнечного излучения от поверхности кремниевого преобразователя;
- б) отражением радиации от зеркал концентратора;
- в) рассеянием электромагнитного поля на тепловых колебаниях решетки;
- г) обратным фототоком вследствие безизлучательной электронно-дырочной рекомбинации в объеме и на поверхности полупроводника;
- д) потерями фототока при движении к токосъемникам;
- е) прохождением части излучения сквозь ТФЭП без поглощения.

Уменьшение и предотвращение перечисленных выше энергетических потерь представляет собой большую задачу по оптимизации себестоимости ТФЭП. С другой стороны, устранение перечисленных факторов (а–е) потерь энергии содержит в себе значительный потенциал для дальнейшего повышения эффективности работы концентраторного гибридного тепло-фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии.

Концентрирование солнечной радиации

Вторым важным аспектом на пути повышения экономической эффективности ФЭП солнечной энергии является разработка систем *концентраторов* солнечных лучей. Концентрированный солнечный свет создается применением систем сравнительно недорогих линз (в нашем случае линз Френеля) или плоских зеркал, с тем чтобы собирать значительную солнечную энергию на сравнительно небольшой поверхности солнечных элементов. Это достигается, например, отражением природного солнечного света от поверхности различных наклоненных под определенными углами зеркал, «зай-

чик» от которых падает на одну и ту же поверхность солнечного элемента или ряда солнечных элементов. За счет такой концентрации, т.е. искусственного, в десятки раз, усиления солнечной радиации, резко уменьшается доля высокой цены полупроводниковых солнечных элементов в общей себестоимости всего устройства ТФЭП. Практика показывает, что концентраторные системы по сравнению с неконцентраторными, имеют меньшую стоимость, продолжительный период эксплуатации ФЭП [4].

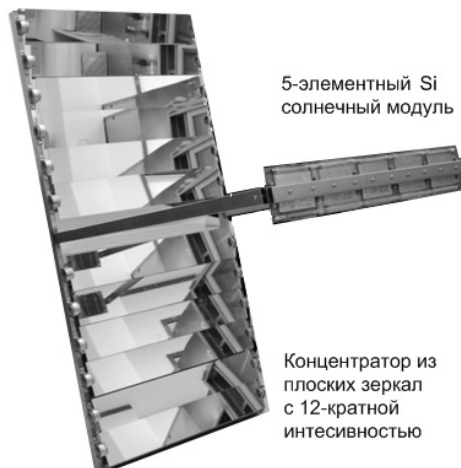


Рисунок 2. Концентраторный фотоэлектрический преобразователь на основе ансамбля плоских прямоугольных зеркал с солнечной концентрацией $C = 12$. Приведена конструкция с пятью солнечными элементами

Себестоимость одного ватта пиковой мощности предлагаемого в данной работе гибридного концентраторного преобразователя общей мощностью 295 Вт (из них 45 Вт электрической составляющей и 250 Вт тепловой составляющей для трехэлементной солнечной батареи) снижается до 2,00-3,00 US\$. Для сравнения, подобная себестоимость фотоэлектрических преобразователей, изготовленных за рубежом и реализуемых в дальнейшем на отечественном рынке, достигает 5,00-6,00 US\$ за ватт. Важно отметить, что снижение почти вдвое удельной цены за единицу вырабатываемой энергии является значительным преимуществом автономных комбинированных систем и свидетельствует о конкурентоспособности предлагаемого нами преобразователя на местных рынках.

На рисунке 2 представлена концентраторная тепло-фотоволтаическая система с выходной пиковой мощностью электрической составляющей в 75 Вт. В дальнейшем нами планируется создать и апробировать в натуральных условиях тепло-фотоэлектрическую систему мощностью 180 Вт фотоэлектрической составляющей.

Оптимизация себестоимости ТФЭП как функции степени концентрации солнечной радиации

Нами также были проведены исследования по оптимизации себестоимости фотоэлектрических преобразователей с концентрированием солнечной энергии. Вполне ясно, что концентрирование солнечных лучей ведет к прямому снижению общей себестоимости системы ФЭП, так как большая часть поверхности, покрытой дорогостоящим полупроводниковым материалом, фактически заменяется сравнительно дешевым материалом (зеркалами, линзами) концентратора. С увеличением степени концентрации C солнечной энергии уменьшается и цена за один ватт генерируемой энергии.

Следует отметить, что чем выше степень концентрации C , тем сложнее и дороже становится система охлаждения ФЭП. При больших степенях концентрации ($C > 20$) применяемая нами система охлаждения ФЭ жидкостным агентом значительно усложняется. Кроме того, изменяются условия обеспечения необходимого температурного режима солнечных элементов, что, в свою очередь, приводит к усложнению всей системы и повышению эффективной себестоимости ТФЭП.

Усложняется и тем самым дорожает конструкция самого трекера, отслеживающего траекторию Солнца, стоимостная часть которого является преобладающей в общей цене системы. Другие факторы также приводят к повышению себестоимости системы фотоэлектрического преобразователя при

больших степенях концентрации. К этим факторам относятся: а) удорожание технологии производства; б) большое количество применяемых конструкционных материалов; с) увеличение массы всей системы. Исходя из этого становится невыгодным с экономической точки зрения дальнейшее наращивание степени концентрации.

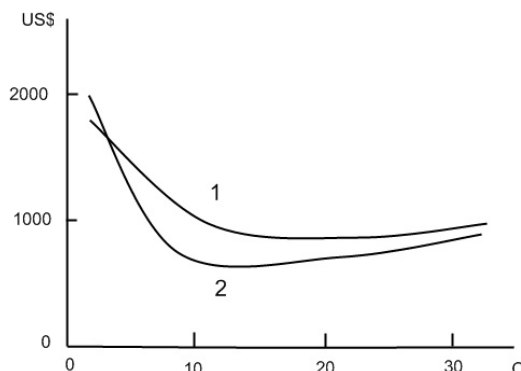


Рисунок 3. Цена в US долларах концентраторного фотоэлектрического преобразователя в зависимости от степени солнечной концентрации C . Кривая 1 соответствует параболо-цилиндрической форме концентратора. Кривая 2 рассчитана для ансамбля плоских прямоугольных зеркал, число которых равно концентрации C

Вполне логично предположить, что существует определенное оптимальное значение степени концентрации солнечной энергии C , при котором концентраторный фотоэлектрический преобразователь имеет минимальную себестоимость. Экспериментальные измерения, проведенные нами при различных концентрациях C , показали, что наиболее оптимальное значение, при котором достигается минимум себестоимости из расчета на единицу генерируемой мощности, лежит в диапазоне $C = 8-12$. Соответствующие данные приведены на рисунке 3. Расчеты на основе математической модели по поиску экстремумов себестоимости как функции концентрации, проведенные в работе [5] для параболо-цилиндрических концентраторов мощностью 500 Вт, дали оптимальное значение концентрации $C = 14,4$. Последнее видно из кривой 1 на рисунке 3. Это теоретическое значение приемлемо согласуется с нашими экспериментальными данными [6], при этом наблюдается более низкая себестоимость плоских систем на своем оптимальном значении концентрации.

Важно отметить, что плоская геометрия концентратора с системой закрепленных на нем зеркал прямоугольной формы (см рис. 2), закрепленных на прямоугольном металлическом каркасе под различными углами, имеет явное стоимостное преимущество по сравнению с концентраторами, имеющими параболо-цилиндрическую или параболическую форму, за счет значительной дешевизны его технико-механического изготовления [7]. Оптимизированная нами разработка тепло-фотоэлектрического преобразователя с выходной мощностью в 180 Вт выражается себестоимостью около 540 US\$ при стоимости трэкера 340 US\$. Таким образом, один ватт фотоэлектрической энергии, вырабатываемой при помощи предлагаемой в работе концентраторной конструкции ТФЭП, имеет цену 3,4 US\$. Эта оценка почти в два раза ниже, чем цена для зарубежных аналогов [8].

References

- 1 *Ioffe A.F.* Mat. of allunion conference. General plan of electrification of USSR // Moscow, vol. 10, p. 6–10.
- 2 *Williams J.R.* Solar energy: technology and applications, Ann Arbor Science. Ann Arbor (MI), 1977, 266 p.
- 3 *Antoshenko V.S., Francev Yu.V., Zharekeshev I. Kh., Lavrishev O.A., Antoshenko E.V.* Thermal photoelectric system based on concentrator solar cells // Vestnik KazNU, series physics. 2011, vol. 39, № 4, p. 3–8.
- 4 *Coventry J.S.* Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector // Sol. Energy. 2005, vol. 78, p. 211–222.
- 5 *Antoshenko V.S., Francev Yu.V., Zharekeshev I. Kh., Lavrishev O.A., Antoshenko E.V.* Autonomous sources of electric and heat energy on original thermal photovoltaic solar batteries // Izvestiya NAS RK, Series phys.-math. 2011, vol. 280, № 6, p. 37–42.
- 6 *Vardanyan R.R., Martirosyan G.A., Dallakyan V.K.* Engineering of economically efficient photoelectric converters of solar energy // Izv. NAS RA and GIUA. Series TN. 2004, vol. LVII, № 2, p. 280–286.

7 Zhao J.F., Song Y.C., Lam W.H., et al. Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system // Energy Conversion and Management, 2011, vol. 52, p. 1343–1353.

8 Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems // Solar Energy. 2007, vol. 81, p. 1117–1131.

В.С.Антощенко, Ю.В.Францев, И.Х.Жарекешев, О.А.Лаврищев

Концентраторлық күн элементтері негізінде жасалған жылу-фотоэлектрлік түрлендіргіш

Мақалада фотовольттық жылылықты қайта өзгерту (ЖФҚӨ) жұмысының оңтайлығын және тиімділігін арттырудың әдістері берілген. ЖФҚӨ-дің жұмысы шоғырланған күн радиациясын пайдалануға негізделген. Ұсынылған гибридік жүйе көрініп тұрған күн сәулесімен қатар, жылу радиациясын да қайта өзгертеді. Шығындар негізінде шоғырлану деңгейінің жекеленген жүйесінің өзіндік құны анықталды. Жылу мен энергияны қайта өзгерту барысында алынатын процестер үшін концентраторлық ЖФҚӨ-дің тиімділігі есептеліп шығарылды.

V.S.Antoshchenko, Yu.V.Francev, I.Kh.Zharekeshev, O.A.Lavrishchev

Concentrating thermal photoelectric converter of solar energy

This paper presents the design optimization and efficiency increase of a photovoltaic/thermal system (PV/T). The operation of the PV/T bases on the use of concentrated solar radiation. The system separately utilizes the solar visible light, as well as the infrared radiation. A thermal T-unit absorbs the infrared radiation before the visible spectral part heats the PV module. The efficiencies and price of the single PV/T system were calculated based on the radiation transfer and the energy conservation.