

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФЭТ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. В. ХАРЧЕНКО, доктор технических наук, профессор
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), г. Москва, Россия

***Аннотация.** Целью исследования была оценка состояния работ по моделированию ФЭТ модулей и перспектив использования такого подхода.*

Представлены результаты исследования параметров теплофотоэлектрических модулей, которые на практике трудно получить для проектирования энергетических систем с использованием ФЭТ модулей. Поэтому необходимый объем информации было бы удобно получать, применяя методы компьютерного или математического моделирования.

Предлагаемые в настоящее время решения не позволяют сформулировать подход для решения практических задач по оптимизации конструкции ФЭТ модулей, а также по выбору оптимальных технологических решений для их применения в конкретных технологиях или комплексах. Это показывает, что работа в направлении создания простого, но в то же время эффективного аппарата для моделирования в заданной области представляется крайне полезной.

Ключевые слова: *солнечная радиация, солнечный элемент, фотоэлектрический модуль, теплофотоэлектрический модуль*

Актуальность. Солнечная энергетика несомненно, особенно с учетом темпов ее развития, может быть названа энергией будущего, а объемы ее рынка будут неуклонно расти рис.1

Анализ последних исследований и публикаций. В качестве установок, осуществляющих энергоснабжение автономных потребителей с использованием солнечной энергии, успешно применяются комбинированные системы на основе фотоэлектрических модулей и солнечных коллекторов. При этом электрическая энергия вырабатывается одним типом приборов (фотоэлектрический модуль), а тепловая – в приборах другого типа (солнечный коллектор). Но кроме этих двух типов устройств для утилизации солнечной энергии существует и представлен на рынке третий тип – устройства, совмещающие в себе одновременно приборы двух вышеуказанных типов. Это, так называемые фотоэлектрические тепловые (ФЭТ) модули, которые в зарубежной литературе именуются как PV Thermal modules (PVTM).

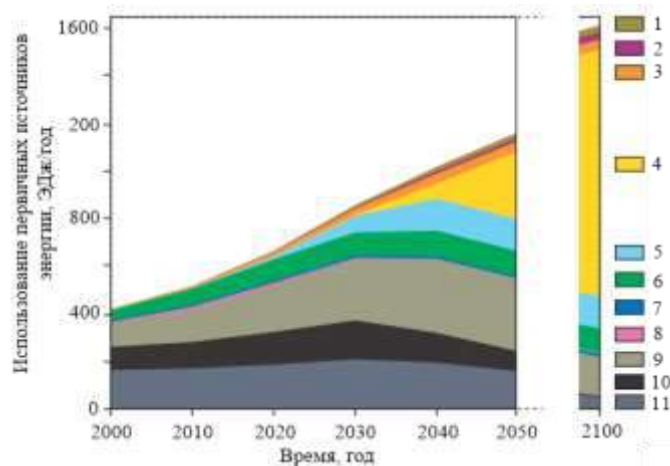


Рис 1. Оценка состояния и прогноз производства энергии первичных источников в мире до 2100 года [1]

1 – энергия геотермальных источников; 2 – энергия других возобновляемых источников; 3 – тепло от солнечного излучения (СИ); 4 – электроэнергия от СИ (фотоэлектрическое преобразование); 5 – ветровая электроэнергия; 6 – энергия биомассы; 7 – энергия ГЭС; 8 – энергия АЭС; 9 – энергия газа; 10 – энергия угля; 11 – энергия нефтепродуктов

Расширение масштабов использования на практике специальных устройств для комплексной утилизации приходящего солнечного излучения с одновременной выработкой электроэнергии и теплоты (Фотоэлектрические тепловые модули) требует совершенствования их конструкции и отработки технологии применения, что, в свою очередь, вызывает необходимость проведения широкого круга исследований

Экспериментальные исследования в направлении изучения параметров ФЭТ модулей и их характеристик в процессе функционирования в реальных энергетических системах трудоемки и затратны. Существенную помощь в получении необходимых массивов информации могло бы дать применение методов моделирования.

Цель исследования – оценка состояния работ по моделированию ФЭТ модулей и перспектив использования такого подхода.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются теплофотоэлектрические модули. Основным методом решения поставленной задачи – анализ представленных в литературе источников на предмет получения данных о полученных результатах оценки параметров ФЭТ модулей в процессе работы энергетических систем и выделение результатов применения методов моделирования для исследования модулей и систем.

Результаты исследований и их обсуждение. Типы ФЭТ модулей и их общая характеристика. Когенерационный фотоэлектрический тепловой (ФЭТ) модуль – это устройство, которое одновременно выполняет преобразование солнечной энергии в электричество и тепло. ФЭТ модуль, объединенный с баком-аккумулятором, аккумуляторной батареей, инвертором и вспомогательным оборудованием, составляют систему

энергоснабжения. В зависимости от вида теплоносителя различают жидкостные (а) и воздушные (б) ФЭТ модули (рис. 2). Особенно перспективными можно рассматривать ФЭТ модули, созданные как сочетание обычных PV и SC-коллекторов в одном компоненте [3, 4]. Коллекторы PVT, как уже отмечалось, обычно изготавливают с использованием стандартного теплового коллектора, поглотитель которого покрыт слоем PV.

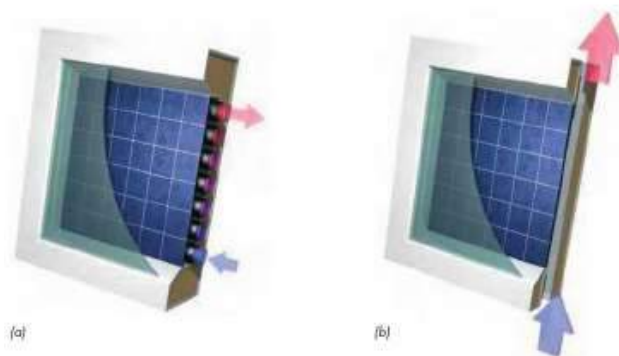


Рис. 2. Изображение жидкостного (а) и воздушного (б) ФЭТ (PVT) модулей [1]

Тепловая энергия передается воздуху [5] или воде [6–8], тогда как PV вырабатывают электроэнергию [3, 4]. Общий результат этих технологий – одновременное производство электроэнергии и тепла [9].

В целом ФЭТ установки могут быть классифицированы по ряду различных признаков, таких как: тип используемой фотоэлектрической панели (на аморфном кремнии, поли- и монокристаллическом кремнии, тонких пленках), остекленный или неостекленный модуль, тип теплоносителя (вода/гликоль или воздух), наличие концентратора, и т. д.

Можно выделить следующие основные группы систем энергоснабжения с использованием ФЭТ модулей:

1. Установки на основе плоских жидкостных ФЭТ модулей.
2. Установки на основе плоских воздушных ФЭТ модулей.
3. ФЭТ фасады зданий.
4. ФЭТ установки с концентратором.
5. Системы на основе теплового насоса и плоских ФЭТ модулей.

Принципиальная схема системы энергоснабжения с использованием ФЭТ модуля представлена на рис. 3 [2].

Потребитель, имея такую установку (систему), получает возможность получать одновременно и электрическую и тепловую энергию. Развитие ФЭТ модули получили, в основном, за рубежом, где были созданы различные типы систем на их основе, некоторые из которых получили коммерческую реализацию [1, 2]. В России подобных разработок выполнено немного. В основном это работы, выполненные в ВИЭСХ [12–15]. За длительный период развития работ в данном направлении было проведено множество исследований различных

аспектов работы ФЭТ модуля, к наиболее интересным из которых можно отнести ряд работ [4, 5, 7–11, 18, 19].

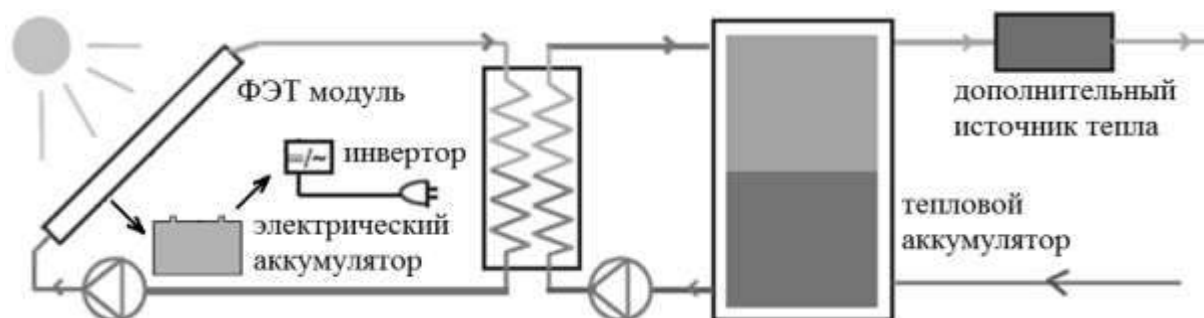


Рис. 3. Типовая схема системы энергоснабжения с использованием ФЭТ модуля

На базе плоского солнечного теплового коллектора, выполненного в форме пустотелой фляги и входящего в состав солнечной водогрейной установки [3], ранее мы разработали и изготовили макет когенерационного ФЭ теплового модуля, принципиальная схема которого представлена на рис. 4 [20].

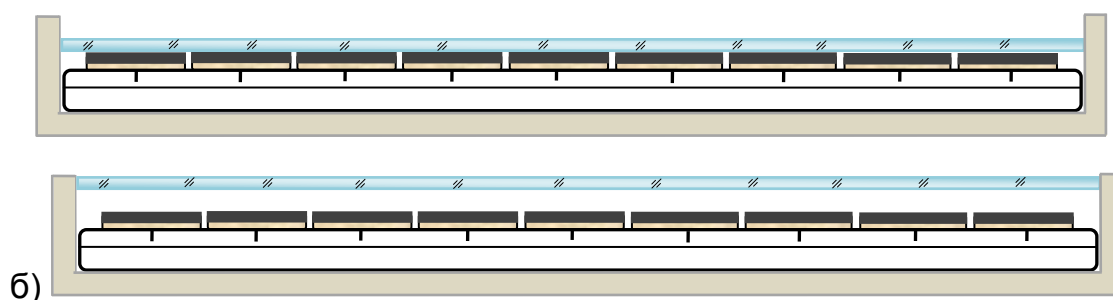


Рис. 4. Схема фотоэлектрического модуля на поверхности гелиоводонагревателя в форме пустотелой фляги (продольный разрез):
а) без воздушной прослойки; б) с воздушной прослойкой.

Схема прихода солнечного излучения на поверхность абсорбера с размещенными на ней солнечными элементами представлена на рис. 5 [19].

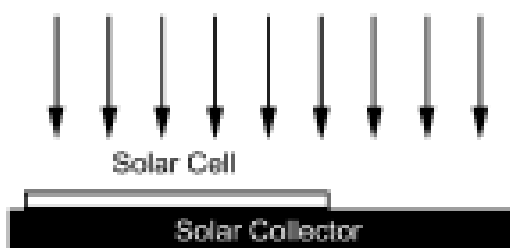


Рис. 5. Поступление СИ на поверхность абсорбера (справа) и солнечных элементов (слева)

Жидкостные ФЭТ модули на основе коммерчески доступных гелиоколлекторов с солнечными элементами, располагающимися на поверхности абсорбера, широко представлены на рынке. (Фирма Millennium Electric с 1991 года поставляет на рынок ФЭТ модули такого типа) [6]. Жидкостные ФЭТ модули производятся в Китае (фирма Helios Photovoltaic Co., Ltd.) [7]. Фирмой Res-regenerative energietechnik und systeme GmbH (Германия) выпускаются модули двух типов. Такие компании как Zhuhai Singyes Green Building Technology Co. Ltd. (Китай) [8], Solimpeks Solar Energy Corp. (Турция) [9], NES Ltd. (Болгария) [10], SIA ALTENERGO (Латвия) [11] в номенклатуре производимой ими продукции имеют ФЭТ модули.

Исследования параметров ФЭТ модулей и энергетических установок на их основе. Результаты ряда работ, посвященных рассмотрению конструкции модуля, динамике нагрева жидкости в баке-аккумуляторе и ряду других проблем, детально рассмотрены в [17]. Для такого рода исследований разрабатывались специальные технические средства и приспособления для фиксации показаний датчиков, установленных в различных частях ФЭТ модуля (рис. 6).

В [5] выполнены работы по теоретической оценке эффективности работы основных конструкций и конфигураций ФЭТ модулей. Рассмотрены варианты конструкций девяти модулей. При оценке предполагалось, что модули работают по схеме с принудительной циркуляцией теплоносителя с расходом жидкости $76 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$. В расчетах солнечная радиация была принята на уровне 800 Вт/м^2 , температура окружающей среды – $20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра – 1 м/с , температура неба – $4 \text{ }^\circ\text{C}$ и угол наклона коллектора 45° .

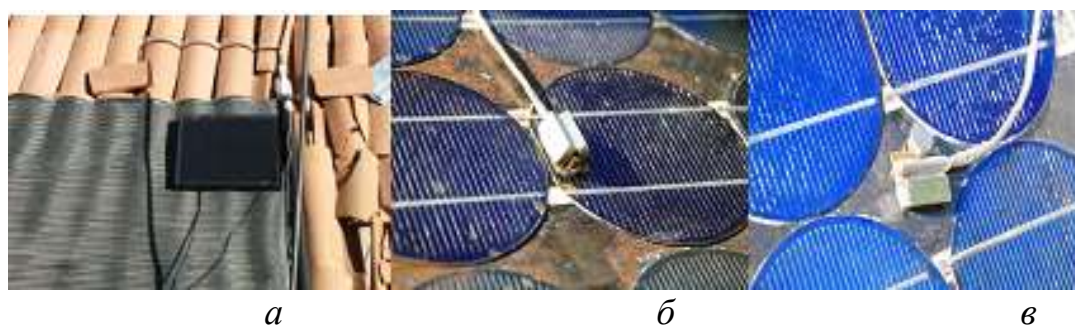


Рис. 6. Размещение датчиков в различных участках ФЭТ модуля и системы на их основе [5]

В ряде работ приводятся подробные описания проблем создания и использования ФЭТ модулей [5, 17, 21]. В обзоре [17], в котором приведен обширный материал по описанию и исследованию работы ФЭТ модулей различных типов, приводится, в частности, информация о комплексном исследовании динамики нагрева ФЭТ модуля в течение первого периода эксплуатации, анализ которой открывает большие возможности получения информации для дальнейшего совершенствования конструкции ФЭТ модуля и поиска оптимальных режимов его эксплуатации. Выборочная информация по динамике поведения системы приведена на рис.7.

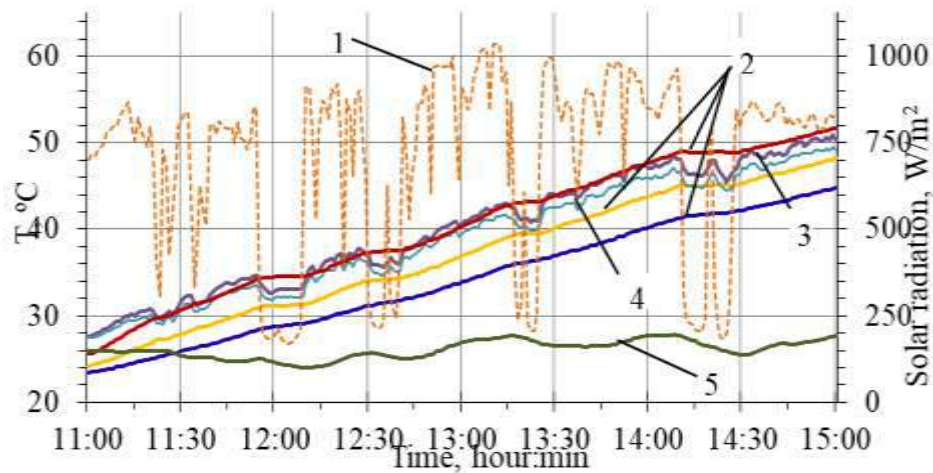


Рис. 7. Динамика изменения параметров системы с ФЭТ модулем в течение заданного периода его эксплуатации

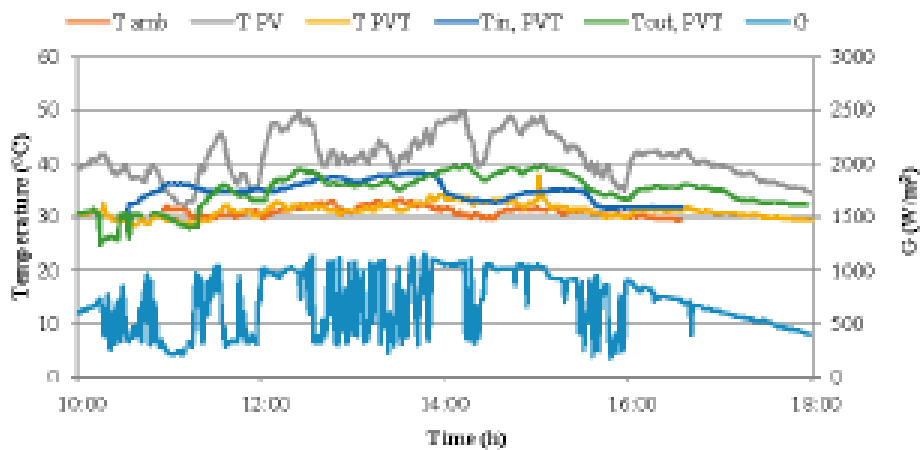


Рис. 8. Температура окружающей среды, ФЭТ и ФЭ модулей и солнечная радиация

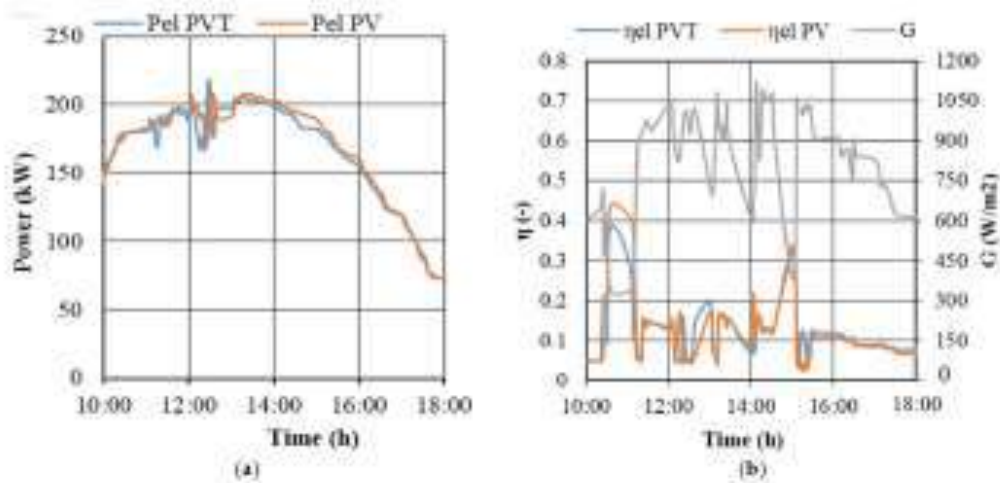


Рис. 9. Дневная температура ФЭТ и ФЭ модулей (а) и эффективность (б)

В [21] приведены аналогичные результаты (рис. 8, 9). Здесь же, наряду с экспериментальными исследованиями, проведены работы по моделированию. Для динамического моделирования энергетических характеристик была разработана схема экспериментальной установки, состоящая из четырех стеклянных солнечных PVT-коллекторов и четырех поликристаллических кремниевых PV-панелей для производства электроэнергии и бытовой горячей воды (рис. 10). Установка также включает водоохлаждаемый резервуар для хранения воды, с внутренним теплообменником. Схема расчетной системы изображена на рис. 10, она включает в себя три основные системные петли: жидкостная петля солнечного коллектора, связывающая по воде солнечное поле и накопительный бак с помощью насоса, подающего воду с постоянной скоростью; контур горячей воды, связанный с выходной водой из резервуара-хранилища ТК и поставляемый непосредственно потребителям или смешиваемый через тройник (TP), с водопроводной водой до набора горячей воды заданной температуры; водопроводная вода, связанная с сетевой водой, подаваемой с помощью жидкостного потока с контролируемой температурой (FD) в резервуар-хранилище.

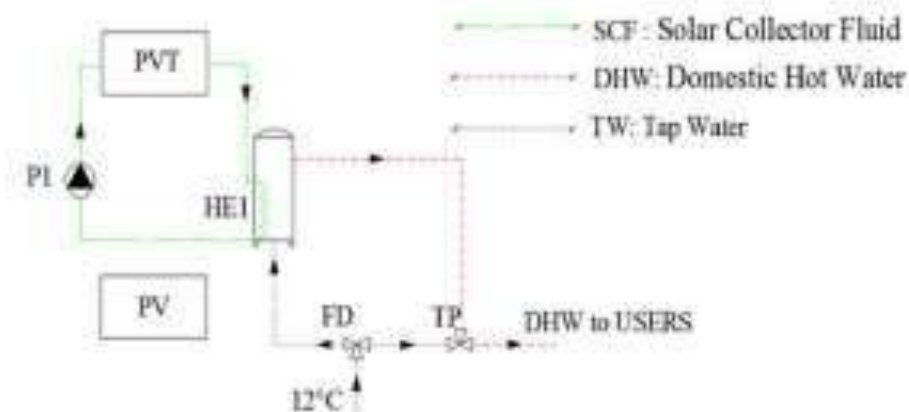


Рис. 10. Схема установки

Одновременно с технической моделью была рассмотрена и экономическая модель. Конечной целью рассматриваемой статьи было сравнение ФЭТ модулей, полученных по новой технологии (глазурированные коллекторы, с более традиционными ФЭ панелями).

Выполнено два типа анализов: численные, основанные на динамическом моделировании, и экспериментальный, целью которых было сравнение реальных характеристик ФЭ и ФЭТ коллекторы, состоящие из одних и тех же ФЭ-моделей в сочетании с установками для отбора воды. В обоих случаях результаты проанализированы с энергетической и экономической точек зрения. Необходимо отметить, что эти два подхода строго связаны, поскольку входные параметры численных моделей соответствуют экспериментальной установке. Симуляционная модель установки была разработана в среде TRNSYS с целью оценки энергетической и экономической эффективности эталонной

технологии PVT (то есть остекления коллекторов) по сравнению с испытанной PV-технологией. Численные результаты показали, что:

- электрическая энергия, создаваемая чисто фотоэлектрическими панелями PV (1778 кВтч/год), выше, чем PVT (1156 кВтч /год). Но при этом коллекторы PVT, кроме того, дают значительное количество тепловой энергии (1433 кВтч /год);

- электрическая эффективность фотоэлектричества, равная 17,9 %, тогда как коллекторы PVT показывают суммарную эффективность 26 % (сумма электрической эффективности – 11,6 % и тепловой – 14,4 %);

- во время летней работы температура на выходе PVT часто достигала 40 °С, тогда как зимой коллекторы PVT в основном используются для предварительного нагрева воды до заданной температуры с последующим догревом с помощью резистивного нагрева;

- экономическая целесообразность исследуемых систем (системы PV и PVT) в обоих случаях является положительной. Срок окупаемости около 4 лет.

Экспериментальные результаты показывают, что между фотоэлектрическими панелями и коллекторами PVT наблюдается значительная разность температур (около 10 °С). Средние электрические характеристики коллекторов и PV и PVT почти совпадают и варьируются в пределах 15 %. В отличие от указанной работы, в [23] догрев воды после ФЭТ модуля осуществляется в дополнительно устанавливаемых солнечных коллекторах.

В работе [24] была разработана и испытана в MANIT Bhopal, с целью проверки ее работоспособности, солнечная теплофотоэлектрическая (PV/T) система (рис. 11). Было установлено, что электрическая эффективность ФЭ части системы снижается по мере увеличения ее рабочей температуры. Предложена специальная конструкция, позволяющая снизить рабочую температуру ФЭ модулей и поддерживать электрическую эффективность на достаточном уровне.



Рис. 11. Экспериментальная система с ФЭТ и ФЭ (слева) модулями

Предложена классификация ФЭТ систем, выполнена оценка эффективности плоской пластины солнечного коллектора PV/T и сравнения его характеристик с солнечной ФЭ системой. Эксперименты проводились в метеоусловиях Бхопала (широта 23.16 °N; долгота 77.24 °E) в Индии в

течение 18/04/2014 с 10.00 утра до 5.00 вечера. ФЭТ модуль был построен с использованием солнечной панели из поликристаллического кремния мощностью 37 Вт площадью 0,3216 м², за панелью устанавливался медный лист и медная трубка, которые выполняли функцию поглотителя, воспринимающего тепло от панели и передающего его воде в медных трубах. Насос мощностью 18 Вт использовался для циркуляции воды в системе. Электрическая эффективность системы составляла около 7,57 %, дневной тепловой КПД составлял 50,1 %, а общая эффективность системы превышала 73 %. Эти результаты показывают, что электрические и тепловые характеристики комбинированной системы при использовании ФЭТ модулей намного выше, чем при использовании только ФЭ (PV). Этот вид системы (PV/T) особенно подходит для получения нагретой воды с низкой температурой, например для предварительного нагрева бытовой воды.

Одним из способов повышения эффективности фотоэлектрических систем является охлаждение их во время работы тонкой пленкой воды, с дополнительной системой утилизации теплоты, переданной этой воде [25]. Экспериментальные измерения как комбинированной системы, так и стандартной фотоэлектрической панели показали, что мощность и электрический КПД объединенной системы выше традиционной. Кроме того, поскольку тепло, удаляемое с PV-панели водной пленкой, не теряется, общая эффективность комбинированной системы становится еще выше. Опытная установка (рис. 12), состояла из двух аналогичных фотоэлектрических панелей (PV) каждая площадью 0,44 м². Максимальное выходное напряжение и ток составляли, соответственно, 23 В, 2,61 А с max выходной мощностью 60 Вт. Одна из панелей охлаждалась пленкой воды. Другая панель использовалась в качестве контрольной. Чтобы создать пленку воды над фотогальванической панелью, трубка с разрезом вдоль нее была установлена на верхнем конце этой панели. Вода, закачиваемая в питающую трубку, из щели течет по панели в виде тонкой пленки. Мощность насоса для циркуляции воды составляет 0,25 л.с.



Рис. 12. Солнечная фотоэлектрическая панель с пленкообразующим устройством

Результаты работы показали, что вода, собранная в нижней части панели, может использоваться для отопления. Если вода откачивается назад, к верхнему концу панели, она будет иметь желаемый уровень температуры. Общий выход энергии комбинированной системы (собранная тепловая и электрическая энергия для объединенных площадей) значительно увеличился по сравнению с электрической энергией с обычной фотоэлектрической панели.

Было показано, что общая эффективность комбинированной системы на один порядок больше, чем эффективность обычной панели. В работе моделирование не использовалось, что существенно снизило объем возможных получаемых результатов.

Выводы и перспективы. Экспериментальные работы по созданию макетов ФЭТ модулей и оценке их параметров чрезвычайно трудоемки. Поэтому для получения всей информации, необходимой для проектирования энергетических систем, на практике получить трудно. Необходимый объем информации было бы удобно получать, применяя методы компьютерного или математического моделирования. Однако такого рода работ в литературе представлено совершенно недостаточно.

В некоторых из описанных выше работ вопросы моделирования в большей или меньшей степени рассматриваются, но недостаточно активно. Предлагаемые решения не позволяют сформулировать подход, который мог бы обеспечить создание продукта, который можно было бы использовать на практике для решения практических задач по оптимизации конструкции ФЭТ модулей, а также по выбору оптимальных технологических решений для их применения в конкретных технологиях или комплексах. Это показывает, что работа в направлении создания простого, но в то же время эффективного аппарата для моделирования в заданной области, представляется крайне полезной.

Список литературы

1. Global market for residential and commercial solar thermal technologies // BCC Research LLC. – Available at: <http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/EGY069A>.

2. PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology; 2006, PVT forum. – Available at: <http://www.pvtforum.org/index.html>.

3. Никитин Б. А. Солнечная водогрейная установка // Сельский механизатор. – 2006. – № 8. – С. 36.

4. Zondag H. A., Vries D. W., Van Hendel, W.G.J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. The thermal and electrical yield of a PV- thermal collector // Solar Energy. – 2002. – 72 (2). – P. 113–128.

5. Zondag H. A., Vries D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. // Solar Energy. – 2003. – 74 (3). – P. 253–269.

6. Fraisse G., Ménézo C., Johannes K. Fraisse G., Menezos C., Johannes K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type // Solar Energy. – 2007. – 81 (11). – P. 1426–1438.

7. The Multi Solar System (PVT) // Millennium Electric. – Available at: <http://www.millenniumsolar.com/default.asp?catid=>.
8. PV Thermal (PVT) Module // Helios Photovoltaic. – Available at: <http://www.helios-pv.com/en/products/pv-thermal>.
9. Photo-Thermal and Photovoltaic Composite Module // Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. – Available at: http://ru.made-in-china.com/co_sye750/product_Photo-Thermal-and-Photovoltaic-Composite-Module-Anjia01-_hesogyey.html.
10. PV-T Hybrid Collectors // Solimpeks Solar Energy Corp. – Available at: <http://www.solimpeks.com/pv-t-hybrid-collectors>.
11. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240 // SUNSYSTEM. – Available at: <http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T/>.
12. Никитин Б. А. Оценка распределения энергии приходящей солнечной радиации на выработку электричества и тепла в когенерационном фотоэлектрическом модуле / Б. А. Никитин, П. В. Тихонов, В. В. Харченко // Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 18–19 мая 2010 года. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – С. 159–164.
13. Тихонов П. В. Системы энергоснабжения на основе когенерационных фотоэлектрических и тепловых модулей и тепловых насосов / П. В. Тихонов, В. В. Харченко // Труды 7-й Международной научно-технической конференции, 18–19 мая 2010 года. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2014. – С. 275–279.
14. Ковалёв А. А. Использование солнечных теплофотоэлектрических модулей для энергоснабжения биогазовой установки с тепловым насосом / А. А. Ковалёв, В. А. Панченко, В. В. Харченко // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 5 (20). – С. 233–240.
15. Харченко В. В. Повышение эффективности энергетических установок на базе тепловых фотоэлектрических модулей / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, А. Т. Беленов // Науковий вісник НУБіП України. – 2014. – Вип. 194, ч. 3. – С. 45–51.
16. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 365–369.
17. Kharchenko V., Panchenko V., Tikhonov P., Vasant. P. Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply // Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. – IGI Global, 2018. – P. 86–120.
18. Zakharchenko R., Licea-Jime'nez L, Pe'rez-Garci'a S. A., Vorobeiv P., Dehesa-Carrasco U., Pe'rez-Robels J. F. et al. Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. // Sol Energy Mater Sol Cells. – 2004. – № 82 (1–2). – P. 253–261.
19. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Gusarov V. Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions // Proceedings of 5th International Conference TAE 2013, Trends in Agricultural Engineering, 2–3 September, 2013, Prague, Czech Republic. – P. 309–313.
20. Харченко В. В. Выбор параметров фотоэлектрического теплового модуля / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, П. В. Тихонов // Сборник трудов IX Международной ежегодной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2012». – М. : Комитет по проблемам применения возобновляемых источников энергии. – С. 292–297.

21. Buonomano A., Calise F., Vicidomini M. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies* 2016, 9, 497.

22. Zondag H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 891–895.

23. Теплоснабжение с использованием фотоэлектрических модулей / В. В. Харченко, Б. А. Никитин, П. В. Тихонов, А. Э. Макаров // *Техника в сельском хозяйстве.* – 2013. – № 5. – С. 11.

24. Rawat P., Debbarma M., Mehrotra S., Sudhakar K. Design, development and investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system. *International Journal of Science, Environment and Technology*, Vol. 3, No 3, 2014, 1173–1183.

25. Hosseini R., Hosseini N., Khorasanizadeh H. An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. *World Renewable Energy Congress 2011-Sweden 8–13 May 2011, Linkoping, Sweden, Photovoltaic Technology, Proceedings.* P. 2993–3000.

References

1. Global market for residential and commercial solar thermal technologies // BCC Research LLC. – Available at: <http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/EGY069A>.

2. PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology; 2006, PVT forum. – Available at: <http://www.pvtforum.org/index.html>.

3. Nikitin, B. A. (2006). Solnechnaya vodogreynaya ustanovka [Solar water heater]. *Sel'skiy mekhanizator*, 8, 36.

4. Zondag, H. A., Vries, D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. (2002). The thermal and electrical yield of a PV- thermal collector // *Solar Energy*. 72 (2), 113–128.

5. Zondag, H. A., Vries, D. W., Van Hendel, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74 (3), 253–269.

6. Fraisse, G., Ménézo, C., Johannes, K. Fraisse, G., Menezo, C., Johannes, K. (2007). Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 81 (11), 1426–1438.

7. The Multi Solar System (PVT). Millennium Electric. Available at: <http://www.millenniumsolar.com/default.asp?catid=>.

8. PV Thermal (PVT) Module. Helios Photovoltaic. Available at: <http://www.helios-pv.com/en/products/pv-thermal>.

9. Photo-Thermal and Photovoltaic Composite Module. Zhuhai Singyes Green Building Technology Co., Ltd. Available at: http://ru.made-in-china.com/co_sye750/product_Photo-Thermal-and-Photovoltaic-Composite-Module-Anjia01-_hesogyey.html.

10. PV-T Hybrid Collectors. Solimpeks Solar Energy Corp. Available at: <http://www.solimpeks.com/pv-t-hybrid-collectors>.

11. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240. SUNSYSTEM. Available at: <http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T/>.

12. Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V., Kharchenko, V. V. (2010). Otsenka raspredeleniya energii prikhodyashchey solnechnoy radiatsii na vyrabotku elektrichestva i tepla v kogeneratsionnom fotoelektricheskom module [Estimating the

distribution of energy of incoming solar radiation to the generation of electricity and heat in a cogeneration photovoltaic module]. Trudy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Ch. 4. Vozobnovlyayemye istochniki energii. Mestnyye energoresursy. Ekologiya. Moskow: GNU VIESKH, 159–164.

13. Tikhonov, P. V., Kharchenko, V. V. (2014). Sistemy energosnabzheniya na osnove kogeneratsionnykh fotoelektricheskikh i teplovykh moduley i teplovykh nasosov [Power supply systems based on cogeneration photovoltaic and thermal modules and heat pumps]. Trudy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Ch. 4. Vozobnovlyayemye istochniki energii. Mestnyye energoresursy. Ekologiya. Moskow: GNU VIESKH, 275–279.

14. Kovalev, A. A., Panchenko, V. A., Kharchenko, V. V. (2016). Ispol'zovaniye solnechnykh teplofotoelektricheskikh moduley dlya energosnabzheniya biogazovoy ustanovki s teplovym nasosom [Use of solar thermal and photovoltaic modules for the power supply of a biogas plant with a heat pump]. Innovatsii v sel'skom khozyaystve, 5 (20), 233–240.

15. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Belenov, A. T. (2014). Povysheniye effektivnosti energeticheskikh ustanovok na baze teplovykh fotoelektricheskikh moduley [Increasing the efficiency of power plants based on thermal photovoltaic modules]. Naukoviy visnik NUBiP Ukraïni, 194 (3), 45–51.

16. Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy, 87, 365–369.

17. Kharchenko, V., Panchenko, V., Tikhonov, P., Vasant, P. (2018). Cogenerative PV Thermal Modules of Different Design for Autonomous Heat and Electricity Supply. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. IGI Global, 86–120.

18. Zakharchenko, R., Licea-Jime'nez, L., Pe'rez-Garci'a, S. A., Vorobeiv, P., Dehesa-Carrasco, U., Pe'rez-Robels, J.F. et al. (2004). Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. Sol Energy Mater Sol Cells, 82 (1–2), 253–261.

19. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Gusarov V. (2013). Investigation of experimental flat PV thermal module parameters in natural conditions. Proceedings of 5th International Conference TAE 2013, Trends in Agricultural Engineering, 2-3 September, 2013, Prague, Czech Republic, 309–313.

20. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V. (2012). Vybor parametrov fotoelektricheskogo teplovogo modulya [Choice of the parameters of the photoelectric thermal module]. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy ezhegodnoy konferentsii «Vozobnovlyayemaya i malaya energetika 2012. Moskow: Komitet po problemam primeneniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii, 292–297.

21. Buonomano, A., Calise, F., Vicidomini, M. (2016). Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. Energies, 9, 497.

22. Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renew. Sustain. Energy Rev., 12, 891–895.

23. Kharchenko, V. V., Nikitin, B. A., Tikhonov, P. V., Makarov, A. E. (2013). Teplosnabzheniye s ispol'zovaniyem fotoelektricheskikh moduley [Heating with photovoltaic modules]. Tekhnika v sel'skom khozyaystve, 5, 11.

24. Rawat, P., Debbarma, M., Mehrotra, S., Sudhakar, K. (2014). Design, development and investigation of solar photovoltaic/thermal (PV/T) water collector system. International Journal of Science. Environment and Technology, 3 (3), 1173 – 1183.

25. Hosseini, R., Hosseini, N., Khorasanizadeh, H. (2011). An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. World Renewable Energy Congress 2011-Sweden 8–13 May 2011, Linköping, Sweden, Photovoltaic Technology, Proceedings, 2993–3000.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФЕТ МОДУЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В. В. Харченко

Анотація. Метою дослідження була оцінка стану робіт з моделювання ФЕТ модулів і перспектив використання такого підходу.

Подано результати дослідження параметрів теплофотоелектричних модулів, які на практиці отримати важко для проектування енергетичних систем з використанням ФЕТ модулів. Тому необхідний обсяг інформації було б зручно отримувати, застосовуючи методи комп'ютерного або математичного моделювання.

Пропоновані нині рішення не дають змоги сформулювати підхід для вирішення практичних завдань щодо оптимізації конструкції ФЕТ модулів, а також з вибору оптимальних технологічних рішень для їх застосування в конкретних технологіях або комплексах. Це показує, що робота зі створення простого, але, водночас, ефективного апарату для моделювання в заданій області є вкрай корисною.

Ключові слова: сонячна радіація, сонячний елемент, фотоелектричний модуль, теплофотоелектричний модуль

STUDY OF THE FET MODULE WORK WITH USE ELEMENTS OF MATHEMATICAL MODELING

V. Kharchenko

Abstract. The aim of the study was to assess the status of the work on the modeling of FET modules and the prospects for using this approach.

The results of the study of the parameters of the thermoelectric photovoltaic modules are presented, which show that in practice it is difficult to design power systems using FET modules in practice. Therefore, the necessary amount of information would be convenient to receive, using methods of computer or mathematical modeling.

The solutions currently proposed do not allow us to formulate an approach for solving practical problems in optimizing the design of FET modules, as well as in selecting the optimal technological solutions for their application in specific technologies or complexes. This shows that the work towards the creation of a simple but at the same time an effective apparatus for modeling in a given area is extremely useful.

Keywords: solar radiation, solar cell, photoelectric module, thermoelectric photoelectric module