

Photoelectric Water Heaters Use in Hot Climate Conditions

Frid S.E., Lisitskaya N.V., Tarasenko A.B., Frolova N.D., Suleimanov M.Zh.

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper is devoted to the hot water production using photoelectric modules. The research goal was to estimate required photovoltaic array peak power to provide necessary hot water amount for an individual residential building in Uzbekistan climate conditions. To achieve this goal, the water heater operation has been simulated with TRNSYS software using data from NASA POWER meteorology database. To verify photovoltaic water heater mathematical models three-month experiment has been conducted. Operation with and without maximum power point tracking controller was considered. The main results are approximation equations, which were constructed basing on simulation outcome to estimate the required photovoltaic array power without numerical calculations for the region. As for electric boilers, consuming energy generated by traditional thermal power plants photovoltaic water heaters have been still considered inefficient and quite expensive. However solar collectors market growth slowdown and substantial decrease of photovoltaic panels cost make the heat generation by photovoltaic panels economically justified. Such photovoltaic panels application can be proposed as alternative to thermal and optical method of solar radiation concentration in solar heaters. The main advantage is a possibility to obtain any temperature from the generated electricity without limitations concerned with the coolant presence in the system. The obtained results significance is concerned with highlighting of photovoltaic heating systems technical and economic competitiveness for some applications and with simplified calculation technique to estimate system composition for different climate conditions.

Keywords: solar water heater, photovoltaic panel, controller, maximum power point tracking, mathematical model, solar fraction, concentrator.

DOI: 10.5281/zenodo.4018982

UDC: 620.92:662.997

Utilizarea încălzitoarelor fotovoltaice de apă în zonele cu climă caldă

Frid S.E., Lisitskaya N.V., Tarasenko A.B., Frolova N.D., Suleimanov M.Zh.

Institutul mixt pentru temperaturi ridicate al Academiei de Științe din Rusia (SITC AȘR)
Moscow, Federația Rusă

Rezumat. Lucrarea este dedicată evaluării eficienței utilizării energiei electrice generate de modulele fotovoltaice pentru a obține apă caldă. Scopul lucrării constă în calculare capacitatea de pașaport necesară pentru o baterie solară ca parte a unui încălzitor de apă fotovoltaic pentru a asigura sarcina standard de alimentare cu apă caldă pentru o clădire rezidențială individuală din Uzbekistan. Scopul a fost atins prin simularea funcționării unui încălzitor de apă în sistemul TRNSYS folosind datele din baza de date de observare a climatului prin satelit NASA POWER. Modelele încălzitorului de apă fotovoltaic au fost, de asemenea, verificate în conformitate cu rezultatele unui experiment de trei luni. Rezultatul principal al lucrării este raportul de aproximare construit pe baza datelor calculate și care face posibilă estimarea puterii necesare pentru condiții climatice date, fără a efectua modelări numerice în fiecare caz concret. Sunt luate în considerare cazurile de prezență și absență a unui controler a baterie solare din sistem. O astfel de utilizare a centralelor fotovoltaice se propune a fi considerată ca o altă metodă (împreună cu cea termică și optică) de concentrare a radiației solare în încălzitoarele solare; un avantaj suplimentar este că căldura la orice temperatură poate fi obținută din electricitatea generată. Importanța rezultatelor obținute se datorează faptului că, atât prin calcul, cât și experimental, a fost demonstrată posibilitatea utilizării în mod constant a unor module fotovoltaice mai ieftine pentru obținerea energiei termice, inclusiv cu potențial ridicat, precum și a obținerii curbelor de aproximare pentru calcularea sistemului în condiții climatice specifice, permițând evitarea simulării numerice lungi.

Cuvinte-cheie: încălzitor solar de apă, modul fotovoltaic, controler, urmărirea punctului de putere maximă, model matematic, cota de acoperire a sarcinii, concentrator.

Использование фотоэлектрических водонагревателей в условиях жаркого климата

Фрид С.Е., Лисицкая Н.В., Тарасенко А.Б., Фролова Н.Д., Сулейманов М.Ж.

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена оценке эффективности использования электроэнергии, выработанной фотоэлектрическими модулями, для получения горячей воды. Цель работы — расчет необходимой

паспортной мощности солнечной батареи в составе фотоэлектрического водонагревателя для обеспечения нормативной нагрузки горячего водоснабжения индивидуального жилого дома на территории Узбекистана. Цель достигалась путем моделирования работы водонагревателя в системе TRNSYS с использованием данных базы спутниковых климатических наблюдений NASA POWER. Модели фотоэлектрического водонагревателя также верифицировались по результатам трехмесячного эксперимента. Основным результатом работы являются аппроксимационные соотношения, построенные на основе расчетных данных и позволяющие оценить необходимую мощность для заданных климатических условий без проведения численного моделирования в каждом конкретном случае. Рассмотрены случаи наличия и отсутствия в системе контроллера солнечной батареи. Выполненная оценка показала, что увеличение необходимой паспортной мощности солнечной батареи без регулятора составляет 25%, что допускает сценарий отказа от регулятора. По аналогии с использованием электронагревателей, потребляющих энергию, вырабатываемую тепловыми электростанциями, фотоэлектрические водонагреватели до сих пор считаются неэффективными и чрезмерно дорогими, однако уменьшение темпов роста рынка солнечных коллекторов и снижение стоимости фотоэлектрических модулей делают генерацию тепла за счет выработанной солнечными батареями энергии экономически оправданной. Такое использование солнечных батарей предлагается рассматривать как ещё один (наряду с тепловым и оптическим) способ концентрации солнечного излучения в солнечных нагревателях, дополнительным достоинством является то, что из вырабатываемой электроэнергии можно получить тепло с любой температурой. Важность полученных результатов обусловлена тем, что как расчетным, так и экспериментальным путем показана возможность использования постоянно дешевеющих фотоэлектрических модулей для получения тепловой энергии, в том числе и высокопотенциальной, а также получением аппроксимационных кривых для расчета системы в заданных климатических условиях, позволяющих избежать длительного численного моделирования.

Ключевые слова: солнечный водонагреватель, фотоэлектрический модуль, контроллер, отслеживание точки максимальной мощности, математическая модель, доля покрытия нагрузки, концентратор.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее освоенных к настоящему времени технологий использования возобновляемых источников энергии является преобразование солнечной энергии в тепло в солнечных водонагревательных установках (СВУ). Их история насчитывает уже более ста лет (первый коммерческий солнечный водонагреватель был запатентован в 1891 г. [1] и к 1900 г. было выпущено более 1600 таких установок [2]). Схема СВУ, близкая к современному, с пространственно разделенными плоским солнечным коллектором и баком-аккумулятором, была предложена уже в 1909 г. [2, 3]. Впоследствии появились многоконтурные схемы СВУ с незамерзающим теплоносителем в первом контуре, а также схемы с принудительной циркуляцией теплоносителя.

Помимо гидравлической схемы усовершенствованиям подвергался и солнечный коллектор. В 1963 г. был разработан [4] трубчатый вакуумированный коллектор, у которого фрагменты поглощающей панели с каналами для прокачки теплоносителя располагались внутри откачанных стеклянных трубок, что существенно уменьшило тепловые потери такого коллектора по сравнению с плоским. Основная технологическая проблема производства таких коллекторов — вывод канала с

теплоносителем через стенку стеклянной трубки. Она была решена позже ценой некоторого снижения эффективности в двухслойных трубчатых коллекторах (Sydney-tube collectors) [5], собираемых из двухслойных коаксиальных трубок-термосов с поглощающим солнечное излучение покрытием, нанесенным на наружную поверхность внутренней трубки, внутрь которой вставляется металлическая конструкция для отвода тепла. В настоящее время более 70% установленных в мире солнечных коллекторов — трубчатые вакуумированные [6], и в большинстве из них используются двухслойные трубки китайского производства [5, 7].

К концу 2018 г. в мире было установлено 690 млн м² коллекторов [6] (почти в 8 раз больше, чем в 2000 г.). Начавшееся в 2014 г. падение темпов роста мирового рынка СВУ привело к тому, что в 2019 г. они стали отрицательными, и общая площадь установленных коллекторов сократилась до 684 млн м². Технологии изготовления солнечных коллекторов достаточно отработаны, их параметры практически не меняются [8]. Исчерпаны и резервы снижения их стоимости, хотя подобные попытки и предпринимаются [9].

В отличие от рынка солнечных коллекторов рынок фотоэлектрических модулей

(ФЭМ) продолжает устойчиво развиваться, хотя темпы его роста и снизились с 33% (по сравнению с предыдущим годом) в 2016 и 2017 гг. до 21% в 2019 г. [6]. Увеличение объема производства ФЭМ и связанные с ним конкуренция производителей, автоматизация производственных процессов, а также организационно-финансовые мероприятия (прежде всего, государственное стимулирование строительства мощных солнечных электростанций) привели к падению цены модулей за последние 10 лет примерно на порядок [10, 11]. Тем не менее, использование для нагрева воды электроэнергии, генерируемой фотоэлектрическими установками, до последнего времени считалось дорогой экзотической технологией [12], однако интерес к фотоэлектрическим водонагревателям (ФЭВН) возник задолго до того, как был поставлен вопрос об их конкурентоспособности с водонагревателями, построенными на основе солнечных коллекторов. В 1994 г. авторами [13] был получен патент на несколько схемных решений таких нагревателей, расчетные [13, 14] и экспериментальные [13, 15, 16] исследования показали их работоспособность, в [13] была выполнена оценка стоимости ФЭМ, при которой ФЭВН становится конкурентоспособным с традиционными СВУ, она составила порядка 1 долл. за пиковый ватт. Сегодня цена фотоэлектрических модулей ниже этой цифры, что стимулирует интерес к такому использованию электричества, получаемого от солнечных батарей.

Помимо конкурентной цены ФЭВН обладают целым рядом преимуществ перед традиционными СВУ [17, 18], среди которых можно выделить простоту монтажа и эксплуатации из-за отсутствия в системе трубопроводов с теплоносителем, гидравлической арматуры, циркуляционных насосов и теплообменников, увеличение КПД ФЭВН при снижении температуры окружающего воздуха и не рассматриваемая в настоящей статье возможность работы вместе с солнечным электрогенератором в когенерационном режиме с использованием излишков вырабатываемой электроэнергии для нагрева воды электронагревателем или тепловым насосом и уменьшения обычно не выгодного потребителю из-за разницы цен покупки и продажи электроэнергии взаимодействия с сетью.

ФЭВН обычно включает в себя фотоэлектрические модули, бак-аккумулятор с электронагревателями и контролер, обеспечива-

ющий работу модулей в окрестностях точки максимальной мощности (maximum power point tracking, MPPT) на их вольтамперной характеристике. Специализированные контроллеры для фотоэлектрических водонагревателей выпускаются рядом компаний [19, 18] небольшими партиями, их стоимость составляет 1 — 3 тыс. евро при мощности электронагревателя 2 — 3 кВт. В качестве альтернативного варианта можно рассмотреть работу фотоэлектрических модулей на электронагреватель постоянного сопротивления, подобранного таким образом, чтобы обеспечить максимум генерации тепла в течение года. Такая схема была предложена авторами и исследована в [20] в климатических условиях Российской Федерации, отличающейся расположением в высоких широтах.

Результатов исследований ФЭВН к настоящему времени опубликовано не много. Кроме работ авторов идеи [13, 15, 16], водонагреватель моделировался в условиях Кувейта [21] и в нескольких точках по всему миру [22], а также исследовался теоретически и экспериментально в [23].

Проведенный обзор позволяет утверждать, что резервы снижения стоимости традиционных СВУ практически исчерпаны, рынок не растет. При этом рост рынка ФЭМ продолжается, их стоимость постоянно снижается, и к настоящему времени использование фотоэлектрических установок для нагрева воды может быть экономически целесообразным.

Настоящая работа посвящена оценке эффективности ФЭВН в Республике Узбекистан. С этой целью в отличие от других исследований решается задача расчета необходимой паспортной мощности батареи фотоэлектрических модулей для обеспечения нормативной нагрузки горячего водоснабжения индивидуального жилого дома на 50% и 70% на всей территории Узбекистана и разработки упрощенной методики такого расчета.

Постановка такой обратной задачи позволяет сразу оценить параметры водонагревателя в зависимости от климатических условий места его работы. Рассматривается автономный ФЭВН, вопросы взаимодействия с сетью не обсуждаются.

Одновременно оценивается возможность работы фотоэлектрических модулей на электронагреватель постоянного сопротивления и, в отличие от [23] делается вывод о конкурентоспособности такого ФЭВН. Математи-

ческая модель ФЭВН экспериментально верифицируется.

I. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

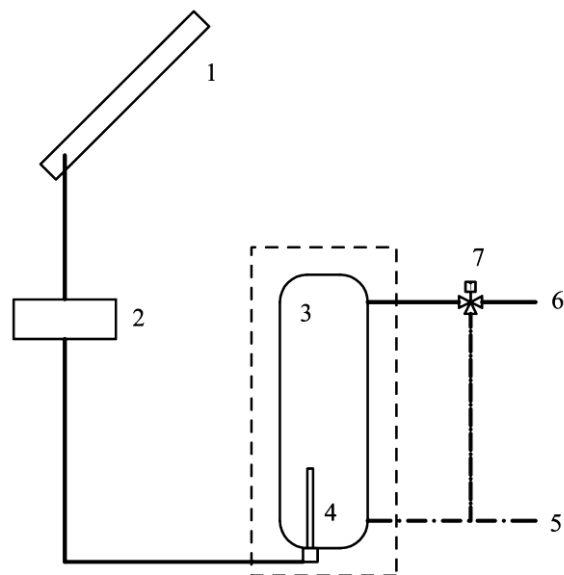
Необходимая установленная мощность солнечных батарей оценивалась путем математического моделирования ФЭВН с использованием системы TRNSYS [24, 25]. Доля покрытия нагрузки за счет солнечной энергии определялась как отношение использованной на подогрев воды электроэнергии, выработанной солнечной батареей, к энергии, необходимой для нагрева воды от температуры в водопроводе до требуемой температуры горячей воды. Схема моделируемого ФЭВН приведена на рис. 1.

В TRNSYS реализована пятипараметрическая модель ФЭМ [24, 26-28], описывающая работу кремниевых фотопреобразователей. Параметры модели — фототок и обратный ток р-п перехода в стандартных условиях, внутреннее и шунтирующее сопротивления и изменяющийся от 1 до 2 коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики — позволяют смоделировать вольтамперную характеристику модуля, но его производителем, не предоставляются. Они определяются по имеющимся в технической документации производителем напряжениям и токам в точках холостого хода, короткого замыкания и максимальной мощности модуля, условием максимума мощности в последней, температурным коэффициентом тока короткого замыкания и напряжения холостого хода в стандартных условиях испытаний STC, а также температуре модуля для условий испытаний NOCT [29] путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений [28].

Большое количество параметров ФЭМ, необходимых для расчета, не позволяет моделировать произвольный модуль. В качестве типичных были выбраны кремниевые мультикристаллические модули YL255P-29B одного из крупных мировых производителей — китайской компании Yingli Solar (паспортная мощность — 255 Вт, площадь — 1,62 м², паспортный КПД — 15,7% [30]).

Бак-аккумулятор считался полностью перемешанным и идеально теплоизолированным. В расчетах использовался типовой суточный график нагрузки из [24]. Типичное значение расхода горячей воды для благоустроенных жилых домов составляет 100 л в день на человека. Суточный расход горячей воды принимался равным 400 л (в расчете на

семью из 4 чел.), температуры горячей воды 60°C и холодной водопроводной воды 5°C соответствовали рекомендациям [31]. В систему был добавлен смеситель, регулирующий расход воды через установку таким образом, чтобы после смешения с поступающей в обход установки холодной водой её температура была равна требуемой.



1 — ФЭМ, 2 — контроллер, 3 — бак-аккумулятор, 4 — электронагреватель, 5 — ввод холодной воды, 6 — вывод горячей воды, 7 — смеситель

Рис. 1. Принципиальная схема ФЭВН.¹

При моделировании использовались дневные суммы поступающего на земную поверхность солнечного излучения, температуры воздуха и скорости ветра из базы климатических данных NASA POWER [32]. Из дневных сумм солнечного излучения с помощью описанного в [24] алгоритма генерировались часовые суммы. Прямая и рассеянная составляющие солнечного излучения определялись с применением рекомендованных в TRNSYS моделей Рейндла [24], потоки солнечного излучения пересчитывались с горизонтальной поверхности на наклонную с помощью модели Переса [24, 27]. Угол наклона фотоэлектрических модулей к горизонту считался на 15° больше широты местности (что обеспечивает максимальное поступление солнечного излучения в зимний период и несколько выравнивает его годовой график).

В расчете использовались среднесуточные температуры окружающего воздуха и скорости ветра, причем считалось, что днем темпе-

¹ Appendix 1

ратура превышает среднесуточную на 10°C. Принятые допущения были аналогичны [33], где было отмечено хорошее согласие результатов расчета в TRNSYS по данным NASA POWER с результатами эксплуатации трех сетевых фотоэлектрических станций.

$$N = \sqrt{\cos(\phi)} \cdot [N_0 - a \cdot S] \quad (1)$$

Расчет выполнялся для всей территории Республики Узбекистан с пространственным разрешением 1°×1° по широте и долготе, соответствующим разрешению актинометрических данных NASA POWER, за весь период наличия в NASA POWER исходных данных в течение всего года (с 1984 г.).

II. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несомненный интерес представляет оценка требуемого количества ФЭМ в зависимости от имеющейся в справочниках и климатических базах данных среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность (S). Результаты расчета (рис. 2) позволяют такую оценку выполнить. Поскольку фотоэлектрические модули водонагревателя располагаются не горизонтально, помимо S в представлении результатов расчета необходимо ввести зависимость от широты (ϕ). На рис. 2 это сделано путем деления необходимого количества ФЭМ N на $\cos^{0.5}(\phi)$, что позволяет уменьшить разброс данных. В отличие от экспоненциальной зависимости, предложенной в [20] для территории России (пунктирные линии на рис. 2), для Узбекистана пригодна линейная аппроксимация (1), где значения коэффициентов N_0 и a составляют, соответственно, 31.1 и 4.0 для доли покрытия нагрузки за счет солнечной энергии $\delta = 0,5$ и 47.3 и 6.6 — для $\delta = 0,7$.

Хотя расчет был выполнен только для расхода горячей воды 400 л в день, его результаты могут быть распространены и на другие нагрузки, поскольку по отношению к N и нагрузке задача линейна.

Величиной, характеризующей потребность в ФЭМ, может быть мощность батареи ФЭМ $P_{\text{МРРТ}}$ в расчете на 100 л в день горячей воды, равная нормированному на нагрузку производству паспортной мощности ФЭМ на N . Данные по $P_{\text{МРРТ}}$ приведены вместе с N на рис. 2.

Построенные аппроксимационные соотношения позволяют сделать оценку необходимого для покрытия части нагрузки по горячему водоснабжению количества модулей в солнечной батарее, или необходимой паспортной мощности батареи, и могут быть использованы в качестве упрощенной методики расчета параметров ФЭВН для условий Республики Узбекистан и климатически близких к ней регионов.

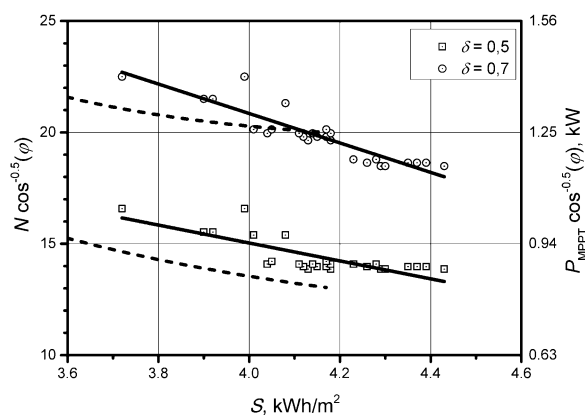


Рис. 2. Требуемое количество ФЭМ N и мощность в расчете на 100 л горячей воды $P_{\text{МРРТ}}$ в зависимости от среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, приходящей на горизонтальную поверхность, S .²

Одним из дорогостоящих элементов схемы ФЭВН, как уже отмечено выше, является МРРТ-контроллер, увеличивающий стоимость фотоэлектрической части установки в 1,5...2 раза. Одной из целей настоящей работы была оценка эффективности отказа от контроллера и работы батареи ФЭМ напрямую на электронагреватель постоянного сопротивления (на рис. 1 это соответствует исключению из схемы элемента 2). При этом среднегодовой кпд ФЭМ ($\eta_{\text{ФЭМ}}$) меньше кпд модулей при работе с МРРТ-контроллером ($\eta_{\text{МРРТ}}$) и зависит от сопротивления электронагревателя (R). Зависимость имеет широкий максимум, расположенный в диапазоне 5—7 Ом в расчете на один ФЭМ [20]. Аналогичный расчет для г. Ташкента с использованием типичного метеорологического года Meteororm, входящего в комплект поставки TRNSYS, показал максимум $\eta_{\text{ФЭМ}}$ при сопротивлении нагревателя 5 Ом, но отличие $\eta_{\text{ФЭМ}}$ от его величины при $R = 6$ Ом составило менее 1.5%, поэтому для возможности сравнения с результатами [20] расчет проводился при $R = 6$ Ом.

² Appendix 1

Результаты оценки требуемой мощности батареи ФЭМ ($P_{R=const}$) в сравнении с мощностью при ее работе с МРРТ-контроллером (P_{MRPT}) в зависимости от среднегодовой суммы солнечного излучения на горизонтальной поверхности представлены на рис. 3. В условиях Узбекистана отказ от контроллера требует увеличения мощности батареи ФЭМ в среднем примерно на 25%.

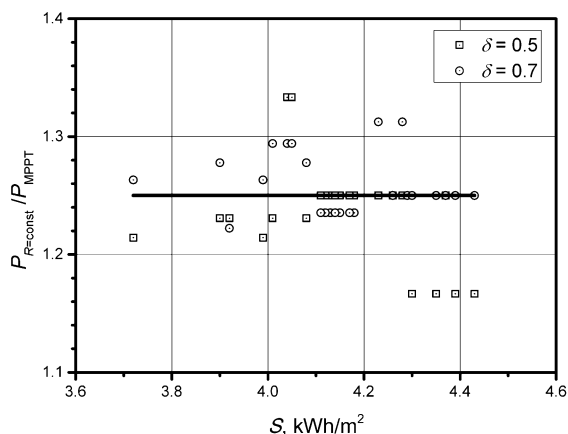


Рис. 3. Соотношение требуемых мощностей батареи ФЭМ при $R = 6$ Ом и при использовании МРРТ-контроллера в зависимости от среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность.³

Несмотря на некоторое увеличение среднегодовой дневной суммы поступающего на горизонтальную поверхность солнечного излучения по сравнению с условиями России, требуемое увеличение паспортной мощности батареи ФЭМ практически не отличается от полученного в [20] для территорий в РФ с $S \geq 3$ кВтч/м² требуемого приращению мощности в 30%, оставляя в силе вывод [20] о том, что отказ от использования в ФЭВН МРРТ-контроллера к резкому снижению эффективности установки не приводит. При этом следует отметить, что отказ от контроллера ухудшает параметры ФЭВН и не позволяет «выжать» из батареи ФЭМ всё, на что она способна, однако в автономных установках такое ухудшение может быть экономически оправданным. Аналогичные решения применяются, например, в системах питания автономных светосигнальных навигационных приборов [34], в которых аккумуляторы соединяются непосредственно с ФЭМ.

Более точное экономическое сравнение ФЭВН с традиционными СВУ и бесконтроллерных ФЭВН с оснащенными МРРТ-контроллерами в условиях Республики Узбе-

кистан затруднительно, поскольку гелиотехнический рынок в Узбекистане находится лишь на начальной стадии. Вместе с тем, предпринимаемые руководством Республики Узбекистан меры по стимулированию возобновляемой энергетики [35] позволяют надеяться на его быстрое развитие.

Для верификации математической модели ФЭВН на стендовой площадке (55.89° с.ш., 37.52° в.д.) под углом 70° к горизонту был установлен ФЭМ YL255P-29B (площадка развернута от направления на юг к востоку на 42°). Модуль был соединен с находящимся в помещении имитатором электронагревателя в виде батареи резисторов сопротивлением 6,2 Ом. В процессе проведения эксперимента измерялись плотность потока солнечного излучения в плоскости ФЭМ (пиранометром Kipp & Zonen CMP 3), напряжение на батарее резисторов и ток через неё. Измерения проводились с 14 по 20 февраля, с 11 по 27 марта и в течение всего апреля 2020 г.

Одновременно с экспериментом было выполнено моделирование этого экспериментального ФЭВН. Как и в приведенных выше оценках, моделирование выполнялось в системе TRNSYS с использованием описанной выше пятипараметрической модели. Необходимые для расчета доли прямого, рассеянного и отраженного от земной поверхности излучения в потоке излучения, падающем на ФЭМ, а также зенитный угол Солнца и угол падения солнечного излучения на поверхность ФЭМ рассчитывались пересчитывающим потоки солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную модулем TRNSYS с использованием данных NASA POWER, температура окружающего воздуха задавалась по данным метеостанции Москва ВДНХ [36]. При моделировании также учитывалось ненулевое сопротивление соединительных проводов и контактные сопротивления, суммарная величина которых была оценена в 0,5 Ом. Построенная по результатам измерений и моделирования диаграмма рассеяния рис. 4, демонстрирует хорошее согласие расчета с экспериментом и подтверждает адекватность математической модели ФЭВН.

Фотоэлектрические водонагреватели обладают, как отмечено выше, определенными преимуществами перед традиционными СВУ, их использование часто экономически оправдано, однако господствующей остается точка зрения, что такое использование электроэнергии, выработанной фотоэлектрическими мо-

³ Appendix 1

дулями, нерационально. Помимо долго державшейся в прошлом высокой стоимости ФЭМ, такая точка зрения обычно обосновывается нерациональностью любого преобразования электроэнергии, большинство которой производится на тепловых электростанциях, в тепло. Однако в отличие от паро- и газотурбинных энергоустановок, ФЭМ не является тепловой машиной и кроме преобразования солнечного излучения в электроэнергию может решать другие задачи.

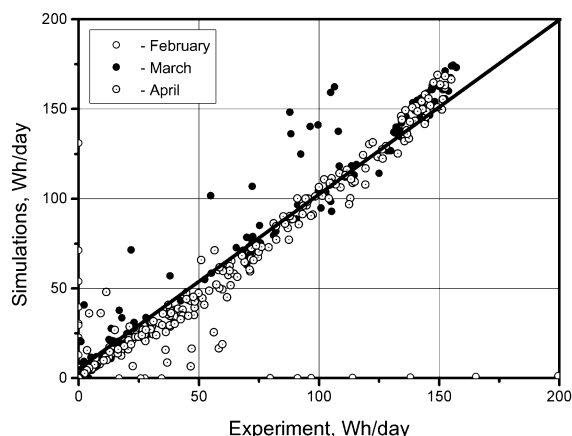


Рис. 4. Диаграмма рассеяния суточной энергии, рассеиваемой на имитаторе нагрузки экспериментального ФЭВН.⁴

Как и многие другие возобновляемые источники энергии, солнечное излучение обладает низкой плотностью, и для полезного использования его энергию необходимо собрать с большой площади и сконцентрировать. В плоских и вакуумированных солнечных коллекторах реализуется тепловая концентрация потока энергии на поглощающей панели при передаче тепла к каналам с теплоносителем. Оптические концентраторы известны уже много лет и в последнее время завоевывают популярность в нагревательных установках промышленного назначения [6, 37]. Сбор солнечной энергии с большой площади производится и фотоэлектрическими модулями, которые с этой точки зрения можно рассматривать как разновидность концентраторов, а то, что из вырабатываемой электроэнергии можно получить тепло с любой температурой, позволяет рассматривать установки с фотоэлектрической концентрацией как конкурентов разнообразным солнечным тепловым установкам [38], вплоть до солнечных печей.

⁴ Appendix 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование работы фотоэлектрических водонагревателей в климатических условиях Республики Узбекистан позволило определить для всей территории Узбекистана необходимую паспортную мощность фотобатарей для покрытия 50% и 70% нагрузки горячего водоснабжения жилого дома. Показано, что эта мощность зависит от широты местности и среднегодовой дневной суммы солнечного излучения на горизонтальной поверхности, получено аппроксимационное уравнение для этой зависимости.

Выполненная оценка влияния на эффективность фотоэлектрического водонагревателя предлагаемого авторами отказа в схеме нагревателя от МРРТ-контроллера показала, что увеличение необходимой паспортной мощности фотобатарей практически не отличается от полученного для перспективных для распространения фотоэлектрических водонагревателей регионов Российской Федерации, и составляет 25—30%. Экспериментальная верификация использованной в расчете модели подтвердила адекватность последней. Сформулирован подход к фотоэлектрическим нагревателям как к устройствам с фотоэлектрической концентрацией солнечного излучения.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Schematic diagram of PV water heater. (1 — PV-panels, 2 — controller, 3 — storage tank, 4 — electric heating unit, 5 — cold water inlet, 6 — hot water outlet, 7 — mixer).

²**Fig. 2.** Required number of PV panels (N) and necessary PV battery peak power per 100 l of hot water (P_{MPPT}), depending on the average annual sum of solar radiation coming to the horizontal surface (S).

³**Fig. 3.** The ratio of required PV battery power at $R = 6$ Ohms and when using an MPPT controller depending on the annual average daily sum of solar radiation coming to a horizontal surface.

⁴**Fig. 4.** Scatter diagram of daily energy dissipated on the load simulator of experimental PV water heater.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Kemp C.M. Apparatus for Utilizing the Sun's rays for heating water. US Patent no. 451384, 1891.
- [2] Bainbridge D.A. The integral Passive Solar Water Heater Book. Solar Usage Now, 1981. 104 p. Available at: <http://deltavolt.pe/documentos/Integral-Passive-Solar-Water-Heater-Book.pdf>. (accessed 30.08.2020).
- [3] Bailey W.J. Solar Heater. US Patent no. 966070, 1910.

- [4] Speyer E. Solar Energy Collection with Evacuated Tubes *Trans. ASME. J. Eng. Power*, 1965, vol. 86, no. 7, pp. 270-276.
- [5] Meyer J.-P. Power from the Tube *Sun & Wind Energy*, 2003, no. 1, pp. 40-46.
- [6] Weiss W., M. Spörk-Dür. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2019. Detailed Market Figures 2018. 2020 edition Available at: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf>. (accessed 30.08.2020).
- [7] Epp B. World Map of the Solar Thermal Industry. The disparity is growing. *Sun & Wind Energy*, 2010, no. 12, pp. 42-61.
- [8] Frid S.E., Lisitskaya N.V. State-of-the-Art Solar Collectors: Typical Parameters and Trends. *Appl. Sol. Energy*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 279-286.
- [9] The Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme. Technology Position Paper. Price Reduction of Solar Thermal Systems. Available at: <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Technology-Position-Paper--Price-Reduction-Solar-Systems--May2020.pdf>. (accessed 30.08.2020).
- [10] Haegel N.M., Margolis R., Buonassisi T., Feldman D., Froitzheim A., Garabedian R., Green M., Glunz S., Henning H.-M., Holder B., Kaizuka I., Kroposki B., Matsubara K., Niki S., Sakurai K., Schindler R.A., Tumas W., Weber E.R., Wilson G., Woodhouse M., Kurtz S. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges. *Science*, 2017, vol. 356, no. 6334, pp. 141-143.
- [11] Photovoltaics Report. Prepared by Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, with support of PSE Projects GmbH. Freiburg, 23 June 2020 Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. (accessed 30.08.2020).
- [12] Raisul I.M., Sumathy K., Ullah K.S. Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 17, pp. 1-25.
- [13] Fanney, A.H., Dougherty B.P. A Photovoltaic Solar Water Heating System. *Trans. ASME. J. Solar Energy Eng*, 1997, vol. 119, no. 5, pp. 126-133.
- [14] Williams P.M. Development and Analysis Tool for Photovoltaic-Powered Solar Water Heating Systems. M.S. Thesis. Madison, 1996, 171 p. Available at: <https://sel.me.wisc.edu/publications/theses/williams96.zip>. (accessed 30.08.2020).
- [15] Dougherty B.P., Fanney A.H., Richardson J.O. Field Test of a Photovoltaic Water Heater. *ASHRAE Transactions*, 2002, vol. 108, pt. 2, pp. 780-791.
- [16] Dougherty B.P., Fanney A.H. Experiences with Using Solar Photovoltaics to Heat Domestic Water. *Trans. ASME. J. Solar Energy Eng.*, 2003, vol. 125, no. 2, pp. 195-202.
- [17] Morris G. Heating water, not as simple as it used to be. *Solar Progress*, 2014, no. 2, pp. 30-32.
- [18] Frid S.E., Tarasenko A.B. Ispol'zovanie fotobatarey dlya goryachego vodosnabzheniya – opyt i perspektivy [Experience and Prospects of Water Heating Using PV Panels]. *Al'ternativnaya Energetika i Ecologiya – Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018, no. 16-18, pp.23-38. (In Russian). doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.023-038.
- [19] Meyer J.-P. Heating with PV. Economics of Electric Heating. A question of priorities. *Sun & Wind Energy*, 2015, no. 2, pp. 48-53.
- [20] Frid S.E., Lisitskaya N.V. Fotoelektricheskue generatory dlya goryachego vodosnabzheniya [Photovoltaic generators for hot water supply]. *Intellectual'naya Elektrotekhnik – Smart Electrical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 52-62. (In Russian).
- [21] Ghoneim A.A., Al-Hasan A.Y., Abdullah A.H. Economic analysis of photovoltaic-powered solar domestic hot water systems in Kuwait. *Renewable Energy*, vol. 25, no. 1, pp. 81-100.
- [22] Meyers S., Schmitt B., Vajen K. Renewable process heat from solar thermal and photovoltaics: The development and application of a universal methodology to determine the more economical technology. *Applied Energy*, 2018, vol. 212, pp. 1537-1552.
- [23] Matuska T., Sourek B. Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System. *Int. J. Photoenergy*, 2017, vol. 2017, art. 7540250, doi: 10.1155/2017/7540250.
- [24] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2006, 918 p.
- [25] TRNSYS – Transient System Simulation Tool. Available at: <http://trnsys.com/>. (accessed 30.08.2020).
- [26] Rauschenbach H.S. Solar Cell Array Design Handbook. The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1980, 549 p.
- [27] TRNSYS 17. V. 4. Mathematical Reference. Available at: <http://web.mit.edu/parmstr/Public/TRNSYS/04-MathematicalReference.pdf>. (accessed 30.08.2020).
- [28] De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, no. 1, pp. 78-88.
- [29] IEC 61215-2:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type

- approval – Part 2: Test procedures. Geneva, IEC, 2016, 97 p.
- [30] Yingli Solar. YGE 60 Cell Series 2 1500V. Available at: http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60CELL%20SERIES%20%201500V-29b_35mm_EU_EN_20170721_V04.pdf. (accessed 30.08.2020).
- [31] SNiP 2.04.01-85. Vnutrenniy vodoprovod i kanalizatsiya zdaniy [Building Norms and Regulations 2.04.01-85. Internal water supply and sewerage of buildings]. Moscow, GUP TsPP, 1996, 60 p.
- [32] NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>, (accessed 30.08.2020).
- [33] Tarasenko A.B., Kiseleva S.V., Popel' O.S., Frid S.E., Gabderakhmanova T.S., Avezova N.R., Simonov V.M., Suleimanov M.Zh. Sravnitel'nyi analiz raschetnykh modeley setevykh fotoelektricheskikh stantsiy [Comparative analysis of grid-connected PV power plants simulation models]. *Geliotekhnika*, 2020, no. 3 (In Russian, In press).
- [34] Technomarine JSC. Lanterns and Range Lights Equipment. Available at: <https://technomarine.ru/eng/products/34/>. (accessed 30.08.2020).
- [35] RB Asia. Uzbekistan Energy Market Review. Available at: https://en.rbasia.uz/rynok-energetiki-uzbekistan?fbclid=IwAR2wPOFgaM HpN_Q9j0IBea4APZSUlultgTMav88N3za0old o7DK8mOjJz8. (accessed 30.08.2020).
- [36] Reliable prognosis. Weather archive in Moscow. Available at: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Moscow. (accessed 30.08.2020).
- [37] Heliogen. Replacing fuels with sunlight. Available at: <https://heliogen.com/>. (accessed 30.08.2020).
- [38] Frid S.E., Lisitskaya N.V. Konkurentosposobnost' solnechnykh batarey pri generatsii tepla [Competitiveness of solar batteries in the heat generation] REENCON-XXI. Proceeding of the IV International Congress Renewable Energy – XXI Century: Energy & Economic Efficiency, 5-6 June, 2018, Skolkovo, Russia, pp. 219-222. (In Russian).

Сведения об авторах.



Фрид Семен Ефимович – к.т.н., заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН. Область научных интересов: процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники энергии; численное моделирование.
E-mail: s_frid@oivtran.ru



Тарасенко Алексей Борисович – научный сотрудник ОИВТ РАН. Область научных интересов: накопители электрической энергии; функциональные наноматериалы; возобновляемые источники энергии.
E-mail: a.b.tarasenko@gmail.com



Лисицкая Наталья Владимировна – ведущий инженер ОИВТ РАН. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; прогнозирование; математическое моделирование; базы данных.
E-mail: talico@mail.ru



Фролова Наталья Дмитриевна – стажер-исследователь ОИВТ РАН. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии
E-mail: frolova.i.d@mail.ru



Сулейманов Муси Жамалутдинович – к.т.н., заместитель заведующего лабораторией возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН. Область научных интересов: энергосбережение, возобновляемые источники энергии.
E-mail: smusi@mail.ru