

УДК 620.92:662.997

С.Е. Фрид, Н.В. Лисицкая

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Объединенный институт высоких температур РАН

Рассмотрены вопросы использования электроэнергии, выработанной солнечными батареями для получения горячей воды. В условиях, когда снижаются темпы роста рынка солнечных коллекторов и значительно снижена стоимость фотоэлектрических модулей, экономически оправданным становится получение низкопотенциального тепла за счет выработанной солнечными батареями энергии. Выполнено динамическое моделирование работы фотоэлектрического солнечного водонагревателя на территории России и расчет необходимого количества модулей (паспортной мощности солнечной батареи) для обеспечения потребителя горячей водой с долей покрытия нагрузки 0,5 и 0,7. Показано, что благоприятными для такого использования солнечных батарей являются территории большей части Восточной Сибири и Дальнего Востока вплоть до широт, превышающих  $60^\circ$ . Для проведения подобных оценок построены аппроксимационные соотношения. Исследована возможность отказа от такого контроллера с прямой работой солнечной батареи на электронагреватель постоянного сопротивления. Оптимизация величины этого сопротивления показала, что максимальный среднегодовой КПД солнечной батареи достигается в диапазоне сопротивлений 5-7 Ом в расчете на один фотоэлектрический модуль. Динамическое моделирование работы фотоэлектрического водонагревателя без контроллера с электронагревателем сопротивлением 6 Ом на модуль показало, что требуемое количество модулей по сравнению с установкой с контроллером увеличивается. Однако это увеличение в местах, благоприятных для использования фотоэлектрических водонагревателей, составляет порядка 30%. Это может оказывать меньшее влияние на стоимость системы, нежели включение в ее состав дорогостоящего контроллера, поэтому возможность работы солнечных батарей на электронагреватель постоянного сопротивления следует рассматривать как перспективную.

**Ключевые слова:** MPPT-контроллер, солнечная батарея, солнечный водонагреватель, фотоэлектрический модуль, фотоэлектрический нагреватель.

### I. Введение

Одной из важнейших задач энергетики является теплоснабжение, на которое в России приходится около трети всего энергопотребления. В течение длительного времени использование для подогрева воды электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями, считалось чрезмерно дорогим и нерациональным.

Основным элементом солнечных водонагревателей до последнего времени служил солнечный коллектор. Это теплообменник, состоящий из панели, поглощающей солнечное излучение, с присоединенными к ней каналами для нагреваемого теплоносителя. Панель помещается в плоский ящик с застекленной лицевой поверхностью и теплоизолированными остальными поверхностями [1]. Интерес к использованию солнечных батарей для получения горячей воды возник задолго до экономической обоснованности таких решений. В 1994 году был получен патент на схему фотоэлектрического водонагревателя (ФЭВН) [2].

Суммарная установленная мощность фотоэлектрических установок в мире к 2016 году достигла 303 ГВт, выработка – 375 ТВтч [3]. Темпы роста рынка фотоэлектрических модулей (ФЭМ) увеличиваются: в 2014 году они составляли 28%, в 2016 – 33% [3]. За последние 10 лет цена ФЭМ упала на порядок [4, 5], что было достигнуто преимущественно за счет организационно-финансовых мер, поэтому есть перспективы дальнейшего снижения цены. Приблизительно к 2012 году нижняя граница стоимости ФЭМ опустилась ниже 0,4 долл за пиковый ватт, и экономические оценки стали благоприятными для ФЭВН, что заставило вновь обратить внимание на использование электроэнергии от солнечных батарей для нагрева воды.

В России солнечные водонагреватели широкого распространения пока не получили. Суммарная площадь солнечных коллекторов в стране составляет 30–60 тыс. м<sup>2</sup>. Производство сосредоточено в основном на двух предприятиях, выпускающих приблизительно по 2000 м<sup>2</sup> коллекторов в год. В отличие от солнечного теплоснабжения фотоэлектрическая генерация в России поддерживается государством. Общий объем производства ФЭМ составляет около 300 МВт/год. Характерная цена ФЭМ в России составляет менее 1 долл за пиковый ватт, что соответствует уровню конкурентоспособности ФЭВН по данным Американского Общества инженеров-механиков [2].

## **II. Постановка цели и задач**

Около 70% территории России располагается вне зоны централизованного энергоснабжения. Благоприятные для использования солнечного тепла южные регионы страны в большинстве своём попадают в зону централизованного энергоснабжения. Значительными ресурсами солнечной энергии располагают и некоторые северные регионы страны, например, Якутия [6], однако работа солнечных коллекторов в этих местах затруднена низкими зимними температурами, существенно увеличивающими тепловые потери коллекторов и обуславливающими необходимость мер защиты от замерзания в них теплоносителя. На этих территориях могут быть применены ФЭВН, лишенные этих недостатков.

Систематические исследования применимости и конкурентоспособ-

ности фотоэлектрических водонагревателей в климатических условиях России до последнего времени не проводились, господствующей остается точка зрения, что такое использование электроэнергии, выработанной солнечными батареями, нерационально. В то же время нам удалось показать, что в условиях как южных регионов России, так и Якутии, ФЭВН по стоимости сравнялись с традиционными солнечными водонагревателями [7]. ФЭВН обладают целым рядом преимуществ, среди которых:

- 1) удобство работы с электрическими нагревателями вместо гидравлических схем;
- 2) при снижении температуры окружающего воздуха эффективность ФЭВН не падает, как у солнечных коллекторов, а, наоборот, растет;
- 3) эффективность нагрева воды электронагревателем от температуры воды не зависит, что позволяет, аккумулируя горячую воду при более высокой температуре, чем у традиционной СВУ, использовать бак меньшего объема и стоимости;
- 4) возможность работать вместе с солнечным электрогенератором в составе когенерационной установки.

Как показано еще в 2014 году, в некоторых случаях наличие электродвигателя снижает стоимость когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания [8]. Выработка тепла дополнительно к электроэнергии фотоэлектрической установкой позволяет уменьшить емкость и стоимость аккумулятора электроэнергии, используя вместе с ним аккумулятор тепла.

Принято считать, что площадь фотоэлектрических батарей должна быть втрое больше, чем площадь солнечных коллекторов для получения сравнимой производительности водонагревателей [9, 10]. Но, по нашим оценкам, соотношение площадей солнечных батарей и коллекторов составляет для южных регионов России 1,6-2,3, а для северных – 1,2-1,6 [7].

В состав ФЭВН входят солнечные батареи, контроллер и бак-аккумулятор с электронагревателями. Уникальным из них является только контроллер. Он согласует сопротивление нагрузки с внутренним сопротивлением солнечных батарей и обеспечивает работу последних в точке максимальной мощности (maximum power point tracking, MPPT).

Настоящая работа продолжает исследования использования ФЭМ для нагрева воды [7]. Основная цель – оценка перспектив ФЭВН в Российской Федерации. При этом решались задачи оценки необходимой установленной мощности солнечных батарей для обеспечения нормативной нагрузки по горячему водоснабжению индивидуального жилого дома на 50% и 70% на всей территории России. Одновременно оценивалась возможность работы солнечных батарей на электронагреватель постоянного сопротивления и отказа от дорогостоящего MPPT контроллера.

### III. Методика расчета

Необходимая установленная мощность солнечных батарей оценивалась путем математического моделирования ФЭВН с использованием системы динамического моделирования установок возобновляемой энергетики TRNSYS [1, 11]. При этом 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.

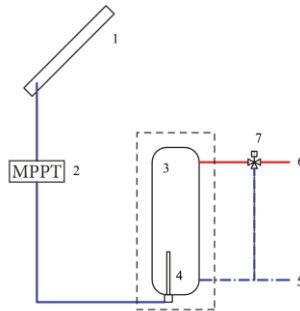


Рис. 1. Принципиальная схема ФЭВН:

- 1 – ФЭП; 2 – MPPT-контроллер; 3 – бак-аккумулятор; 4 – электронагреватель;  
5 – ввод холодной воды; 6 – вывод горячей воды; 7 – смеситель

Моделирование по существу сводилось к численному решению дифференциального уравнения теплового баланса бака-аккумулятора, который считался полностью перемешанным и идеально теплоизолированным. В расчетах использовался типовой суточный график нагрузки из «Основ солнечной теплоэнергетики» [1]. Нормативы суточного расхода горячей воды в различных регионах России несколько отличаются друг от друга, но типичное значение для благоустроенных жилых домов составляет 100 л в день на человека. Исходя из типичного состава семьи в четыре человека, в расчетах суточный расход горячей воды принимался равным 400 л, температура горячей воды – 60° С, холодной водопроводной воды – 5° С [12]. В систему также добавлен смеситель, регулирующий расход воды через установку таким образом, чтобы после смешения с поступающей в обход установки холодной водой её температура была равна требуемой.

Наиболее сложной в составе ФЭВН является модель фотоэлектрического модуля, эквивалентная схема которого приведена на рис. 2.

В рамках использованной модели вольтамперная характеристика (ВАХ) ФЭМ описывается четырьмя параметрами: фототоком  $I_L$  и обрат-

ным током  $p - n$  перехода  $I_0$  в стандартных условиях, внутренним сопротивлением  $R_s$  и изменяющимся от 1 до 2 коэффициентом неидеальности ВАХ  $\gamma$  [1]. Эти параметры производителем ФЭМ, как правило, не предоставляется. Обычно в наличии имеются результаты испытаний в стандартных условиях STC (standard test conditions: 1000 Вт/м<sup>2</sup>, 25° С): напряжения и токи в точках холостого хода, короткого замыкания и максимальной мощности характеристики ФЭМ. Для определения по ним параметров модели необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений [1], что выполняется в модуле TRNSYS, описывающем ФЭМ, до начала моделирования. Расчет температуры ФЭМ в зависимости от температуры окружающего воздуха и учет ее влияния на его параметры выполняется с использованием результатов испытаний NOCT (nominal operating cell temperature: 800 Вт/м<sup>2</sup>, 20° С, скорость ветра 1 м/с, без нагрузки): температурных коэффициентов тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. В результате рассчитываются ток и напряжение в точке максимальной мощности, а также ток при заданном напряжении на нагрузке.

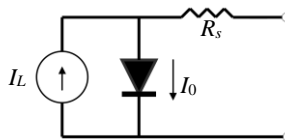


Рис. 2. Эквивалентная схема ФЭМ

Большое количество параметров ФЭП, необходимых для расчета, не позволяет моделировать произвольный модуль. В качестве типичных были выбраны изготавливаемые по наиболее часто встречающейся технологии широко распространенные кремниевые мультикристаллические модули YL255P-29В производства одного из крупнейших мировых производителей – китайской компании Yingli Solar (паспортная мощность – 255 Вт, площадь – 1,62 м<sup>2</sup>, паспортный КПД – 15,7% [13]).

Поскольку анализировались ФЭВН круглогодичного действия, расчет выполнялся только для территории России южнее Полярного круга. Использовались дневные суммы поступающего на земную поверхность солнечного излучения и температуры окружающего воздуха из базы данных спутниковых наблюдений NASA POWER [14]. Угол наклона фотоэлектрических модулей к горизонту считался на 15° больше широты местности (что обеспечивает максимальное поступление солнечного излучения в зимний период). Результаты расчета приведены ниже.

#### IV. Обсуждение результатов

Построенная по результатам расчета карта распределения требуемого для обеспечения доли покрытия нагрузки  $\delta = 0,5$  количества ФЭМ ( $N$ )

приведена на рис. 3. Ожидается благоприятными для использования ФЭВН являются южные регионы России, однако невысокие значения  $N$  характерны для большей части Восточной Сибири и Дальнего Востока вплоть до широт, превышающих  $60^\circ$ , в частности, большей части Якутии. В этих регионах фотоэлектрические водонагреватели весьма перспективны.

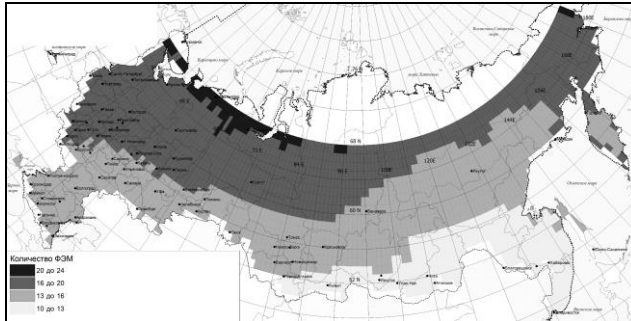


Рис. 3. Распределение по территории России требуемого для обеспечения доли покрытия нагрузки  $\delta = 0,5$  количества ФЭМ в ФЭВН

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. 4) позволяют такую оценку выполнить. Поскольку фотоэлектрические модули водонагревателя располагаются не горизонтально (как указано выше, принятый угол наклона был на  $15^\circ$  больше широты местности), помимо  $S$  в представление результатов расчета необходимо ввести зависимость от широты ( $\varphi$ ). На рис. 4 это сделано путем деления  $N$  на  $\cos^{1/2}(\varphi)$ , что позволяет уменьшить разброс данных. Полученные результаты удовлетворительно аппроксимируются пригодным для оценки количества фотоэлектрических модулей соотношением:

$$N = \cos^{1/2}(\varphi) \cdot [N_0 + a \cdot \exp(-S/t)], \quad (1)$$

где значения коэффициентов  $N_0$ ,  $a$  и  $t$  составляют, соответственно, 10,9, 360 и 0,82 для  $\delta = 0,5$  и 19,4, 7000 и 0,45 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, ха-

рактически характеризующей потребность в ФЭМ, может быть требуемая мощность солнечной батареи в расчете на 100 л в день горячей воды  $P_{\text{МРРТ}}$ , равная нормированному на нагрузку произведению паспортной мощности ФЭМ на  $N$ . Данные по  $P_{\text{МРРТ}}$  приведены вместе с  $N$  на рис. 4.

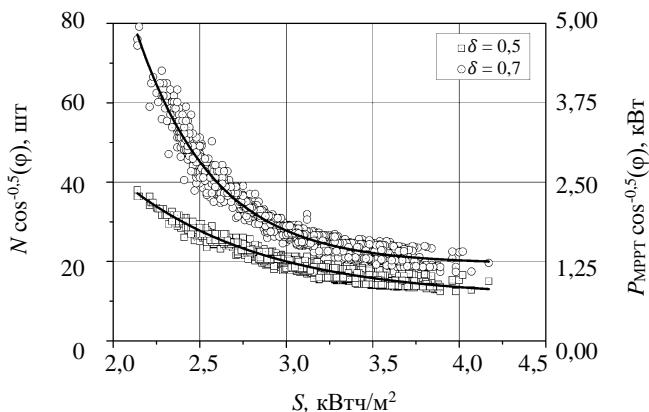


Рис. 4. Требуемое количество панелей  $N$  и мощность в расчете на 100 л горячей воды  $P_{\text{МРРТ}}$  в зависимости от среднегодовой суммы солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность  $S$

Одним из дорогостоящих элементов схемы ФЭВН является МРРТ контроллер, стоимость которого у российских поставщиков составляет 60-70 тыс. руб., при этом он обслуживает 6-8 ФЭМ, увеличивая стоимость фотоэлектрической части установки в 1,6-2 раза [13, 15]. Одним из способов снижения затрат может быть отказ от контроллера и работа солнечной батареи напрямую на электронагреватель постоянного сопротивления (на рис. 1 это соответствует исключению из схемы элемента 2). При этом среднегодовой КПД ФЭМ ( $\eta_{\text{ФЭМ}}$ ) уменьшается в сравнении с КПД модуля при работе с контроллером МРРТ ( $\eta_{\text{МРРТ}}$ ). Среднегодовой КПД в зависимости от сопротивления электронагревателя ( $R$ ) приведен рис. 5.

Зависимость имеет широкий максимум, расположенный в диапазоне 5-7 Ом в расчете на один ФЭМ. Результаты оценки требуемой мощности солнечной батареи ( $P_{R=\text{const}}$ ) в сравнении с мощностью при ее работе с контроллером МРРТ ( $P_{\text{МРРТ}}$ ) в зависимости от среднегодовой суммы солнечного излучения на горизонтальной поверхности при  $R = 6$  Ом представлены на рис. 6. На благоприятных для использования ФЭВН территориях ( $S \geq 3$  кВтч/м²) отказ от МРРТ-контроллера требует увеличения мощности солнечной батареи (количества ФЭМ) примерно на 30%, что дешевле контроллера.

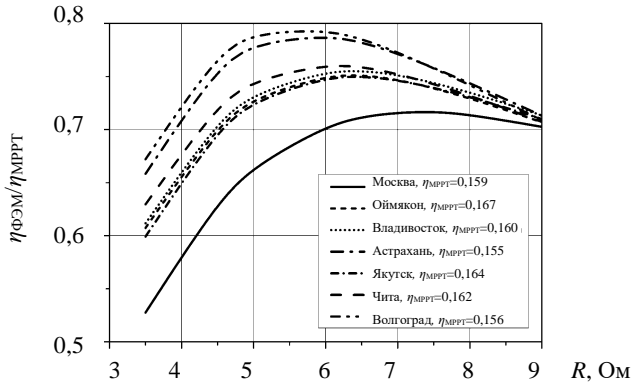


Рис. 5. Среднегодовой КПД ФЭМ в зависимости от сопротивления электронагревателя  $R$

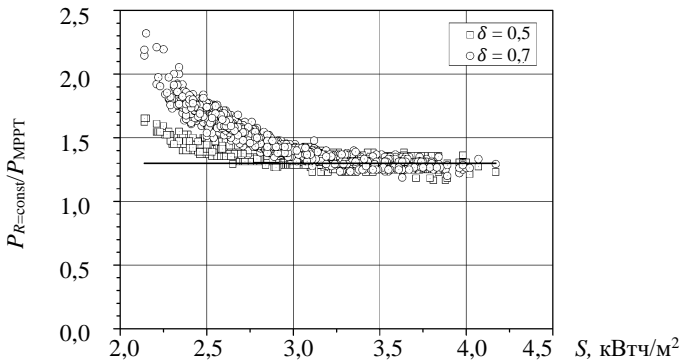


Рис. 6. Соотношение требуемых мощностей солнечной батареи при  $R = 6$  Ом при использовании МРРТ контроллера в зависимости от среднегодовой дневной суммы солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность  $S$

## V. Заключение

Выполненные расчеты позволили выявить регионы России, благоприятные для получения горячей воды с использованием электроэнергии, выработанной солнечными батареями. Построены аппроксимационные соотношения, позволяющие сделать оценку необходимого для покрытия части нагрузки по горячему водоснабжению количества модулей в солнечной батарее. Показано, что отказ от использования в фотоэлектриче-



ском водонагревателе контроллера MPPT не приводит к резкому снижению эффективности установки и может быть экономически оправдан.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-00670.*

© Фрид С.Е., 2018

© Лисицкая Н.В., 2018

### Библиографический список

- [1] Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. Долгопрудный: Интеллект, 2013. – 888 с.
- [2] Fanney A.H., Dougherty B.P. A Photovoltaic Solar Water Heating System // Trans. ASME. J. Solar Energy Eng. 1997. № 119 (5). Pp. 126-133.
- [3] Weiss W., Spörk-Dür M., Mautnier F. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015. 2017 edition. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf>. (дата обращения 01.10.2018).
- [4] Haegel N.M. et al. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges // Science. 2017. № 356 (6334). Pp. 141-143.
- [5] Photovoltaics Report. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. (дата обращения 11.09.2018).
- [6] Попель О.С. и др. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: ОИВТ РАН, 2010. – 84 с.
- [7] Фрид С.Е., Тарасенко А.Б. Использование фотобатарей для горячего водоснабжения – опыт и перспективы // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 16-18. С. 23-38.
- [8] Директор Л.Б., Иванин О.А. О применении электродкотлов в энергетических комплексах малой энергетики // Промышленная энергетика. 2014. № 12. С. 23-27.
- [9] Marken C., Sanchez J. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback // Home power. 2008. № 127. Pp. 40-45.
- [10] Matuska T., Sourek B. Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System // International Journal of Photoenergy. 2017. Article ID 7540250.
- [11] TRNSYS – Transient System Simulation Tool [Электронный ресурс]. URL: <http://trnsys.com/> (дата обращения 05.10.2018).
- [12] СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. Введ. 07.1986. М.: ГУП ЦПП, 1996. – 60 с.
- [13] Ваш Солнечный Дом. [Электронный ресурс]. URL: <http://shop.solarhome.ru/y1250p-29b-yingli-poli-solnechnye-paneli.html> (дата обращения 05.10.2018).
- [14] POWER Project Data Sets. Solar and meteorological data sets from NASA research for support of renewable energy, building energy efficiency and agricultural needs. [Электронный ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения 05.10.2018).

[15] Торговый дом «Солнечная корона». Солнечное отопление и ГВС. [Электронный ресурс]. URL: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-igvs> (дата обращения 05.10.2018).

**S.E. Frid, N.V. Lisitskaya**

## **PHOTOVOLTAIC GENERATORS FOR HOT WATER SUPPLY**

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

**Abstract.** The paper concerns of using electricity generated by solar batteries to produce hot water. The reduction of solar collector market growth rate and a significant reduction of photovoltaic modules cost makes economically feasible to produce low-potential heat with the energy generated by solar panels. Dynamic simulation of photovoltaic solar water heater in Russia and the calculation of required number of PV-modules (module peak power) for the consumer to provide hot water with a load fraction of 0,5 and 0,7 was performed. It is shown that the territories of most of Eastern Siberia and the Far East are favorable for such use of solar batteries up to latitudes exceeding 60°. To carry out similar estimates, approximation equations are constructed. A necessary element of solar power plants is a maximum power point tracking controller. The possibility of rejecting such a controller and solar battery operation on a constant resistance electric heater is investigated. Optimization of the magnitude of this resistance has shown that the maximum average annual efficiency of solar battery is achieved in the resistance range of 5-7 ohms per PV module. Dynamic simulation of photovoltaic water heater without a controller with an electric heater of 6 ohms per module showed that the required number of modules compared to the heater with controller increases, but this increase is about 30% in places favorable for using photovoltaic water heaters. The influence on the cost of the system may be less than the inclusion of an expensive controller, so the possibility of solar batteries operation with a constant resistance electric heater should be considered as promising.

**Keywords:** MPPT-controller, PV-based water heater, photoelectric heater, photoelectric module, photovoltaic panel, solar water heater.

### **References**

- [1] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes* (3d ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [2] A.H. Fanney and B.P. Dougherty. A Photovoltaic Solar Water Heating System // *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 119, no. 5, pp. 126-133, 1997.
- [3] W. Weiss, M. Spörk-Dür and F. Mautnier, *Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015*. 2017 edition. [Online]. Available at: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf> [Accessed: Oct. 1, 2018].

- [4] N.M. Haegel et al. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges // *Science*, vol. 356, no. 6334, pp. 141-143, 2017.
- [5] Photovoltaics Report. [Online]. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [Accessed: Sept. 11, 2018].
- [6] O.S. Popel, S.E. Frid, Yu.G. Kolomiets, S.V. Kiseleva and E.N. Terekhova, Atlas of Resources of Solar Energy on the Territory of Russia. Moscow: OIVT RAS, 2010.
- [7] S.E. Frid and A.B. Tarasenko. Experience and prospects of water heating using PV panels // *Alternative Energy and Ecology*, no. 16-18, pp. 23-38, 2018.
- [8] L.B. Direktor and O.A. Ivanin. On the application of electric boilers in the energy complexes of small-scale power generation // *Industrial power engineering*, no. 12, pp. 23-27, 2014.
- [9] C. Marken and J. Sanchez. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback // *Home power*, no. 127, pp. 40-45, 2008.
- [10] T. Matuska, B. Sourek. Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System // *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017, article ID 7540250.
- [11] TRNSYS – Transient System Simulation Tool. [Online]. Available at: <http://trnsys.com/> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [12] SNiP 2.04.01-85. Internal water supply and water carriage of buildings. Entered 07.1986, 1996.
- [13] Solar Home. [Online]. Available at: <http://shop.solarhome.ru/yl250p-29b-yingli-poli-solnechnye-paneli.html> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [14] POWER Project Data Sets. Solar and meteorological data sets from NASA research for support of renewable energy, building energy efficiency and agricultural needs. [Online]. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/> [Accessed: Oct. 5, 2018].
- [15] Solar crown. Solar heating and hot water supply. [Online]. Available at: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-i-gvs> [Accessed: Oct. 5, 2018].