

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОБАТАРЕЙ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ – ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ*

С.Е. Фрид, А.Б. Тарасенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
д. 13/2, ул. Ижорская, г. Москва, 125412, Россия
тел.: +7(495)485-93-90; e-mail: s_frid@oivtran.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.023-038

Заключение совета рецензентов: 18.04.18 Заключение совета экспертов: 10.05.18 Принято к публикации: 01.06.18

Рассмотрена возможность использования солнечных батарей для подогрева воды в системах горячего водоснабжения. Показано, что фотоэлектрические водонагреватели обладают рядом преимуществ перед традиционными солнечными водонагревателями. Построена классификация выпускаемых в мире контроллеров для фотоэлектрических водонагревателей. Отмечено, что только несколько производителей выпускают специализированные контроллеры солнечных батарей для таких систем. Как правило, водонагреватель рассматривается как элемент «умного» дома, и контроллер представляет собой дополнительное устройство в системе энергоснабжения дома, обеспечивающее утилизацию излишков вырабатываемой электроэнергии.

Разработаны математические модели традиционного и фотоэлектрического водонагревателей. В результате имитационного моделирования показано, что соотношение площадей фотобатарей и солнечных коллекторов в водонагревателях сравнимой производительности составляет для южных регионов России 1,6–2,3, а для северных – 1,2–1,6. Оценка стоимости аналогичных по производительности солнечных водонагревателей показала, что фотоэлектрические водонагреватели в климатических условиях Российской Федерации могут составить конкуренцию традиционным солнечным установкам, особенно в северных регионах страны.

Современные фотоэлектрические водонагреватели оборудованы поддерживающими работу солнечных батарей в точке максимальной мощности контроллерами. Стоимость выпускаемых специализированных контроллеров неоправданно велика, что делает целесообразной разработку недорогого контроллера для фотоэлектрического водонагревателя. Показано, что возможным вариантом снижения стоимости фотоэлектрического водонагревателя является отказ от контроллера и работа фотобатарей на электронагреватель постоянного сопротивления, при этом снижение производительности фотобатарей ввиду работы на удалении от точки максимальной мощности компенсируется установкой дополнительных модулей, и годовая выработка тепла превышает таковую для традиционного солнечного водонагревателя сравнимой стоимости.

Ключевые слова: солнечный водонагреватель; солнечный коллектор; солнечная батарея; фотоэлектрический нагреватель; фотоэлектрический модуль.

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF WATER HEATING USING PV PANELS

S.E. Frid, A.B. Tarasenko

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
13/2 Izhorskaya St., Moscow, 125412, Russia
tel.: +7 495 485 93 90, e-mail: s_frid@oivtran.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.023-038

Referred 18 April 2018 Received in revised form 10 May 2018 Accepted 1 June 2018

*Фрид С.Е., Тарасенко А.Б. Использование фотобатарей для горячего водоснабжения – опыт и перспективы // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;16-18:23-38.

The paper deals with the photovoltaic panels application for water heating purposes. We have developed and tested the mathematical models for traditional and PV-based water heaters. Modeling shows that the area ratio for PV-based and collector-based water heaters with close productivity is about 1.6–2.3 for Russian southern regions and 1.2–1.6 for northern ones. PV-based water heating systems are shown to have several advantages compared to collector-based ones, including close capital costs in Russian conditions and simpler installation and operation, especially in northern regions of the country.

The paper classifies the commercial controllers for PV-based water heating systems. Modern commercial PV water heating systems are supplied with maximum power point (MPP) tracker technology controllers. Cost for such special controllers is quite high, and several manufacturers make them. The most of manufacturers consider PV water heating systems as a part of “smart home” or way to utilize excess of energy produced by PV array. Thus, the researches of possible improvement and cost decrease for PV water heaters are actual. It is shown that the possible way to simplify and make cheaper the whole PV water heater is to make it without controller but to use constant resistance element as electric load. In this case, PV array productivity decrease can be compensated by additional PV panels in the array, and the year heat production is higher than for collector-based system with comparable capital cost.

Key words: PV-based water heaters; solar collector; photovoltaic panel; photoelectric heater; photoelectric module.



Семен Ефимович Фрид
Semen Frid

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Образование: МЭИ (1979 г.).

Область научных интересов: процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники энергии; оценка ресурсного потенциала возобновляемой энергетики; математическое моделирование.

Публикации: 85.

h-index (РИНЦ) 11; *h*-index (Скопус) 7

SPIN-код: 2420-5962

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Head of Laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Education: MPEI, 1979.

Research interests: heat and mass transfer; renewable energy; renewable energy potential estimation; numerical simulation.

Publications: 85.

ResearcherID: C-3046-2014

ScopusID: 6602192623

ORCID: 0000-0001-8089-8225



Алексей Борисович
Тарасенко
Alexey Tarasenko

Сведения об авторе: старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Образование: МИФИ (2005 г.).

Область научных интересов: накопители электрической энергии; функциональные наноматериалы; возобновляемые источники энергии.

Публикации: 73.

h-index (РИНЦ) 7; *h*-index (Скопус) 2

SPIN-код 6346-1356

Information about the author: Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Education: MPEI, 2005.

Research interests: energy storage; functional nanostructured materials; renewable energy.

Publications: 73.

ResearcherID: E-2683-2014

ScopusID: 36773802600

1. Введение

Одной из важнейших задач энергетики, особенно в северной стране, является получение низкопотенциального тепла. На теплоснабжение в России приходится около трети всего энергопотребления. Эксплуатация электродомов считается малоэффективной, поскольку эффективность использования энергии первичного топлива, с учетом КПД выработки электроэнергии, составляет всего около 30 %. В течение длительного времени не рассматривалась и возможность использования вырабатываемой солнечными батареями электроэнергии для теплоснабжения, в частности получения горячей воды. Солнечные батареи были для такого применения чрезмерно дорогими, однако быстрое снижение их

стоимости в последние годы и преимущества перед солнечными коллекторами изменили ситуацию.

Вне зоны централизованного энергоснабжения находится около 70 % территории России, при этом для обеспечения жизнедеятельности жителей регионов с нецентрализованным энергоснабжением требуются 20 % тепла и 10 % электроэнергии, производимых в стране [1]. Благоприятные для солнечной энергетики южные регионы в большинстве своем попадают в зону централизованного энергоснабжения. Значительными ресурсами солнечной энергии располагают и северные регионы страны, например Якутия [2], однако круглогодичная работа солнечных водонагревателей в этих местах затруднена из-за низких зимних температур, существенно увеличи-

вающих тепловые потери солнечных коллекторов, и необходимости мер защиты от замерзания в них теплоносителя. На этих территориях применение фотоэлектрических водонагревателей, лишенных этих недостатков, представляет несомненный интерес.

Настоящая статья посвящена анализу современного состояния рынков солнечных коллекторов и фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и вопросам использования последних для нагрева воды. Наиболее эффективным устройством для нагрева воды электроэнергией от солнечных батарей является тепловой насос, однако он требует наличия холодного источника, от которого отбирается тепло. Кроме того, тепловые насосы имеют сложную конструкцию и дороги для применения в индивидуальных водонагревателях, поэтому системы с тепловыми насосами не рассматриваются, так же как и совмещенные решения, в которых охлаждаемые водой ФЭМ работают в качестве солнечных коллекторов (PV/T), по-

скольку они как источники тепла преимуществами перед солнечными коллекторами не обладают.

Основная цель работы заключалась в оценке конкурентоспособности и перспектив фотоэлектрических водонагревателей (ФЭВН) в Российской Федерации. При этом решались задачи анализа мирового и российского рынков солнечных коллекторов и ФЭМ, обзора и классификации выпускаемых в мире специализированных контроллеров, позволяющих использовать солнечные батареи для получения низкопотенциального тепла. Впервые удалось выделить группы контроллеров, показать, что в климатических условиях России при существующих ценах на традиционные солнечные водонагреватели, ФЭМ и контроллеры применение ФЭВН экономически оправдано, что возможно также построение фотоэлектрических водонагревателей без контроллеров, причем такие нагреватели могут быть эффективнее традиционных СВУ при более низкой стоимости.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
δ	Доля покрытия тепловой нагрузки горячего водоснабжения за счет использования солнечной энергии
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
L	Суточное потребление горячей воды, л/день
<i>Аббревиатуры</i>	
MPPT	Работа солнечных батарей в точке максимальной мощности
НОСТ	Условия испытания фотомодуля для определения температурных коэффициентов (800 Вт/м ² , 20 °С, скорость ветра 1 м/с, без нагрузки)
PV/T	Фотоэлектрический модуль, совмещенный с солнечным коллектором
STC	Стандартные условия испытания фотомодуля (1 000 Вт/м ² , 25 °С)
ТМУ	Типичный метеогод
СВУ	Солнечная водонагревательная установка
ФЭВН	Фотоэлектрический водонагреватель
ФЭМ	Фотоэлектрический модуль
ФЭП	Фотоэлектрический преобразователь

2. Краткая история развития солнечных водонагревателей

Первым коммерческим образцом СВУ был Climax Solar-Water Heater (США, 1891 г. [3]). К 1900 г. было смонтировано более 1 600 таких установок аккумуляторного типа [4]. Успешные продажи стимулировали исследования и разработки в этой области [5, 6], и предложенная в 1909 г. СВУ [7] отличалась тем, что солнечный коллектор и бак-аккумулятор были пространственно разделены. Такая установка содержала в себе все элементы наиболее распространенной в наши дни индивидуальной термосифонной СВУ [8]: плоский солнечный коллектор и установленный выше коллектора бак-аккумулятор.

Наблюдавшиеся зимой 1913 г. в Южной Калифорнии заморозки заставили разместить в баке установки змеевиковый теплообменник [9], а солнечный контур заполнить незамерзающей водно-спиртовой смесью. Впоследствии в схеме солнечного водонагревателя появился циркуляционный насос (в много-

контурных системах циркуляционных насосов несколько) и управляющий его включением и выключением регулятор [8].

Технологии изготовления плоских солнечных коллекторов с металлическими теплоприемными панелями и стеклом в качестве светопрозрачного ограждения как за рубежом, так и в России уже к началу двухтысячных годов были достаточно отработанными и вышли на параметры, близкие к предельным [10]. Резервы снижения стоимости плоских солнечных коллекторов также практически были исчерпаны.

В 1963 г. был предложен трубчатый вакуумированный солнечный коллектор [11, 12], у которого элемент поглощающей панели с каналами для прокачки теплоносителя располагался внутри откачанной стеклянной трубки, а сам коллектор собирался из таких трубок. Использование вакуумированного пространства в качестве теплоизоляции позволило резко снизить тепловые потери такого коллектора по сравнению с плоским. Основная технологическая проблема при изготовлении вакуумированных коллекторов –



вывод каналов с теплоносителем через стенку стеклянной трубки – позже была изящно решена за счет некоторого снижения эффективности в двухслойных трубчатых коллекторах (так называемых *sydney-tube collectors*) [13]. В этих коллекторах применяются двухслойные коаксиальные трубки-термосы, а поглощающее покрытие наносится на наружную поверхность внутренней трубки, в которую вставляется металлическая конструкция для съема тепла.

Недостатками такого коллектора являются открытые торцы трубок, которые необходимо дополнительно теплоизолировать, и несколько большее, чем у однослойной трубки, термическое сопротивление между поглощающей поверхностью и теплоносителем. Однако эти недостатки перекрываются простотой и дешевизной трубок. Стеклозное производство (изготовление трубок) полностью отделяется от механосборочного (сборка трубок с устройствами теплосъема и коллектора в целом). Сделав ставку прежде всего на двухслойные трубки, китайские производители уже в 2003 г. выпустили 2,5 млн м² трубок (15 млн шт.) [13], а в 2009 г. только 6 крупнейших китайских фирм произвели более 10 млн м² трубок [14]. В результате сегодня более 70 % установленных в мире солнечных коллекторов – трубчатые вакуумированные [15], в большинстве из которых используются двухслойные трубки китайского производства.

Интерес к солнечным батареям для теплоснабжения и горячего водоснабжения возник уже тогда, когда был ещё очень далек от экономически обоснованного. В 1994 г. был получен патент [16] на несколько вариантов схемы фотоэлектрического водонагревателя. Расчетные [9, 17, 18] и экспериментальные [9, 19] исследования таких установок показали их работоспособность и предсказуемость характеристик, однако до последнего времени они оставались в обзорах солнечных водонагревателей примерами принципиально возможных, но неоправданно дорогих и весьма экзотических технологий [20, 21]. Тем не менее, по оценкам авторов [9], при стоимости ФЭМ порядка 1 долл. за пиковый ватт (в 1997 г., когда была написана статья, стоимость составляла 5 долл. за ватт) фотоэлектрический водонагреватель мог конкурировать с традиционной СВУ.

Особенностью предложенного в [9] водонагревателя являлась реализация контроллера поддержания точки максимальной мощности солнечной батареи. Схема содержала 6 электронагревателей, один из которых был включен постоянно, по мере роста измеряемой специальным датчиком освещенности к нему параллельно подключались остальные. Потоки солнечного излучения, при которых производилась перекоммутация нагревателей, и сопротивления этих нагревателей подбирались в результате моделирования работы водонагревательной установки. Такое дискретное регулирование сопротивления нагрузки поддерживало солнечную батарею близко к точке максимальной мощности (отклонение от максималь-

но возможной производительности около 4 %). Полученные результаты, в том числе экспериментальные [9, 19], позволили авторам [9] рекомендовать такую дискретную схему вместо сложных и дорогих в то время контроллеров, непрерывно отслеживающих точку максимальной мощности (*maximum power point tracking*, MPPT).

3. Сопоставительный анализ аналогов и выявление основных тенденций развития СВУ

3.1. Мировой рынок СВУ

Получение низкопотенциального тепла нагретой воды и других теплоносителей является в настоящее время наиболее востребованной технологией использования солнечной энергии. В 2016 г. суммарная мощность действующих в мире солнечных коллекторов составила 456 ГВт (652 млн м²) [15]. На водонагревательные установки различного назначения в 2015 г. приходилось 93,5 % площади солнечных коллекторов, более 70 % солнечных коллекторов (71 %, 2015 г.) установлено в Китае. 71,5 % всех солнечных коллекторов являются трубчатыми вакуумированными [15]. Из солнечных коллекторов, введенных в эксплуатацию только в 2015 г., 75,8 % установлено в Китае, 75,1 % являются трубчатыми вакуумированными. С 2000 г. по 2016 г. общая площадь установленных в мире солнечных коллекторов увеличилась в 7,3 раза, выработка тепла в 2016 г. составила 375 ТВтч [15].

Долгое время основным двигателем рынка солнечных коллекторов было развитие малоэтажного домостроения. В последние годы тенденции изменились – растет количество крупных систем централизованного солнечного теплоснабжения. Установок мощностью более 350 кВт (более 500 м² солнечных коллекторов) в мире насчитывается 300, их общая мощность составляет 1 154 МВт, площадь солнечных коллекторов в них – 1 648 тыс. м². Лидером этого направления является Дания, в которой построено 110 установок общей мощностью 922 МВт (1 318 тыс. м²) [15]. На начало 2017 г. в мире также действовали 50 солнечных установок, производящих тепло для промышленных нужд (416 тыс. м² солнечных коллекторов).

3.2. Тенденции развития мирового рынка СВУ

На европейском рынке в течение целого ряда лет наблюдается некоторый застой (годовой объем ввода солнечных коллекторов в эксплуатацию падает с 2009 г.), четыре года подряд сокращается производство солнечных коллекторов в Китае (в 2014 г. – на 18 % [22], в 2015 г. – на 17 % [15, 22], в 2016 г. – на 9 % [15], в 2017 г. – на 6 % [23]). По информации [22], это объясняется резким падением инвестиций в жилищное строительство и прекращением государственной поддержки оснащения сельских жилых домов солнечными водонагревателями и аналогичных городских программ. Учитывая ведущую роль Китая



в мировом производстве солнечных коллекторов, а также уменьшение объема их ввода в эксплуатацию в Австралии (10 % в 2015 г. [15]) и на Ближнем Востоке (19 % в 2015 г. [15]), такое сокращение привело к уменьшению мирового объема ввода солнечных коллекторов в эксплуатацию в 2014 г. – на 16 %, в 2015 г. – на 14 %. Темпы роста мирового рынка солнечных коллекторов упали с 18 % в 2011 г. до 6 % в 2015 г. и 5 % в 2016 г. Имеет место тенденция к замедлению роста рынка солнечных водонагревателей, и развитие крупных установок коллективного пользования переломить её не может.

4. Сопоставительный анализ аналогов и выявление основных тенденций развития ФЭВН

4.1. Мировой рынок фотоэлектрических модулей

Рост спроса на фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) с 2005 г. подстегнул темпы создания серийных производств по всей технологической цепочке – поликристаллический кремний, пластины моно- и мультикристаллического кремния, фотоэлектрические преобразователи, фотоэлектрические модули. Увеличение объемов выпуска фотоэлектрической продукции с одновременным переносом большинства производств в Китай (в топ-5 мировых производителей ФЭМ входят преимущественно китайские компании) привело к резкому снижению цен по всей цепочке [24] как за счет роста конкуренции на рынке, так и более широкой автоматизации производства. Растет и КПД модулей: в 2006–2008 гг. для монокристаллических ФЭМ высоким показателем считались 13 ÷ 15 % [25], сейчас за счет внедрения новых пассивирующих и просветляющих покрытий, а также оптимизации контактных структур КПД вырос до 17 ÷ 18 % [26], а у отдельных производителей, использующих существенно более дорогие и развитые технологии, – до 19 ÷ 22 % [27].

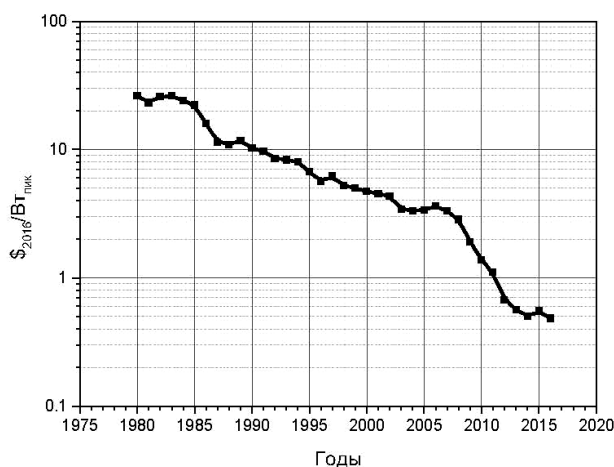


Рис. 1 – Цена пикового ватта ФЭМ с 1980 г. по 2016 г. (приведенная к доллару 2016 г.) [29]

Fig 1 – PV-module price from 1980 to 2016 (inflation adjusted to 2016) [29]

В 2016 г. суммарная установленная мощность фотоэлектрических установок достигла 303 ГВт, выработка – 375 ТВтч [15], что соответствует выработке солнечных тепловых установок, имеющих в 1,5 раза большую установленную мощность. В отличие от мирового рынка солнечных коллекторов, темпы роста рынка ФЭМ в последние три года увеличиваются: в 2014 г. они составляли 28 %, в 2015 г. – 29 %, в 2016 г. – 33 % [15].

Цена фотоэлектрических модулей за последние 10 лет упала примерно в 10 раз [28, 29] (динамику иллюстрирует рис. 1).

Примечательно, что этот эффект в основном был достигнут за счет не технических, а организационно-финансовых мер, прежде всего государственного стимулирования строительства мощных солнечных парков. Это означает, что свой вклад в снижение цен пока не внесли технологические аспекты: переход на алмазную резку слитков кремния с меньшим процентом отходов, уменьшение толщины пластин до 80 ÷ 100 мкм против современных 160 ÷ 200 [30], отказ от энергозатратного Сименс-процесса в пользу реакторов кипящего слоя или плазмохимических технологий разложения силанов [30], что сулит снижение удельного энергопотребления на производство поликристаллического кремния примерно втрое.

4.2. Преимущества и тенденции развития ФЭВН

По сравнению с традиционными СВУ фотоэлектрические водонагреватели обладают определенными преимуществами (частично сформулированными в [31]):

1. Работа с электрическими нагревателями легче, чем с громоздкими гидравлическими схемами – отсутствие теплоносителя в генерирующем контуре делает излишними трубопроводы, промежуточные теплообменники и циркуляционные насосы; не нужны и меры защиты контура от замерзания.

2. Монтаж и эксплуатация ФЭМ проще, чем солнечных коллекторов: они легче и требуют прокладки электропроводки, а не труб.

3. При снижении температуры окружающего воздуха эффективность фотоэлектрического водонагревателя не падает, как при использовании солнечных коллекторов, а наоборот, растёт, что наиболее существенно для установок, работающих в умеренных и высоких широтах, в частности в России, особенно в зимнее время.

4. Эффективность нагрева воды электронагревателем от температуры воды практически не зависит, что позволяет, аккумулируя горячую воду при более высокой температуре, чем у традиционной СВУ, задействовать бак меньшего объема (и стоимости), лучше теплоизолированный (в противном случае теплопотери бака могут быть недопустимо большими [9]).

5. Фотоэлектрические модули и электронагреватель менее инерционны, чем солнечные коллекторы и трубопроводы солнечного контура.

6. Генерируемую энергию можно легко измерить, что существенно при её продаже и при эксплуатации установок коллективного пользования.

7. При наличии у потребителя бака горячей воды с электронагревателем затраты на ФЭВН значительно меньше, чем на традиционную СВУ (в условиях, например, Австралии [31] – примерно вдвое).

8. Возможность работать вместе с солнечным электрогенератором в составе когенерационной установки – существенное достоинство ФЭВН. Как показано в [32], в некоторых случаях наличие электродвигателя снижает стоимость когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания. Выработка тепла дополнительно к электроэнергии фотоэлектрической установкой позволяет не отдавать электроэнергию в сеть [31], а использовать дополнительно к аккумулятору электроэнергии аккумулятор тепла. Более подробно этот вопрос исследовался в [33], где применение солнечных батарей для получения горячей воды и нужд теплоснабжения рассматривалось как часть концепции здания с нулевым потреблением ресурсов. Изучались схемы комбинации фотоэлектрических модулей как с электронагревателем, так и с тепловым насосом: в первом случае выработка энергии солнечными батареями возрастала на $15 \div 70\%$, во втором – на $20 \div 40\%$, причем более эффективная система с тепловым насосом оказывалась существенно дороже и себя не окупала.

Приблизительно к 2012 г. минимум стоимости ФЭМ опустился ниже 0,4 долл. за пиковый ватт, экономические оценки стали благоприятными для эксплуатации фотоэлектрических водонагревателей, что заставило вновь обратить внимание на такое использование электричества, полученного от солнечных батарей, причём в некоторых публикациях [34, 35] декларировалась «смерть» тепловой солнечной энергетики (при излишней категоричности такое утверждение основывается на появлении на рынке оборудования для создания ФЭВН, сравнимых по стоимости с традиционными СВУ, и особенно – когенерационных установок, в составе которых производство низкопотенциального тепла обходится ещё дешевле).

5. Особенности российского рынка солнечных коллекторов и ФЭМ

В России солнечные водонагревательные установки широкого распространения не получили. По разным оценкам, суммарная площадь действующих солнечных коллекторов в стране составляет порядка $30 \div 60$ тыс. м² [33]. Промышленное производство солнечных коллекторов и водонагревательных установок на их основе в России сосредоточено главным образом на двух предприятиях [36, 37], выпускающих приблизительно по 2 000 м² солнечных коллекторов в год. Производственные мощности производителей позволяют увеличить эту цифру в 2–3 раза, однако отсутствие платежеспособного спроса огра-

ничивает объем производства. Зарубежные образцы коллекторов относительно дороги, тем не менее, благодаря возможности поставки большого количества солнечных коллекторов в короткий срок, именно они применяются в крупных водонагревательных установках. Большинство российских солнечных водонагревателей – установки коллективного пользования: по данным на 2014 г. [38] доля солнечно-топливных котельных, установок солнечного горячего водоснабжения гостиниц и санаториев, социальных объектов и промышленных предприятий составляла 89 %. Наиболее крупная установка – солнечно-топливная котельная в г. Нариманове Астраханской области (4 200 м² солнечных коллекторов [33]). Централизованная регулярная государственная поддержка развития рынка солнечного теплоснабжения в России отсутствует, некоторые объекты создаются при поддержке местных органов власти.

В отличие от солнечного теплоснабжения фотоэлектрическая генерация в России государством поддерживается. В 2013 г. вышло Постановление Правительства РФ № 449 [39], направленное на обеспечение субсидирования строительства крупных сетевых фотоэлектрических станций мощностью от 5 МВт с высокой степенью локализации производства компонентов в России. Мощность вводов оценивалась приблизительно в 270 МВт ежегодно.

В настоящее время в России имеется четыре производителя фотоэлектрических модулей:

– ООО «Хевел» (170 МВт/год, локализация начинающая с ФЭП). Запущенный в 2014 г. завод в Новочебоксарске с 2017 г. в состоянии производить модули с КПД $18 \div 19\%$, а отдельные ФЭП – с КПД более 22 % [40] по технологии НТ – гетеропереходных модулей на основе монокристаллического и аморфного кремния (с привлечением зарубежных разработок и результатов деятельности собственного НТЦ в Санкт-Петербурге);

– ОАО «Рязанский завод металлокерамических приборов» (около 30 МВт/год, локализован только модуль, но возможно использование пластин ООО «Гелиос-Ресурс»);

– ООО «Гелиос-Ресурс» (производство слитков и пластин в объеме около 90 МВт/год, производство ФЭП и модулей в Швейцарии или Китае);

– ЗАО «Телеком-СТВ» (5 МВт/год, локализована только сборка модулей, специализируется на поставке нестандартных модулей, в том числе с зарубежными высокоэффективными ФЭП, преимущественно для специальных заказчиков).

Общий объем производства, таким образом, составляет около 300 МВт/год, что, в отличие от солнечных коллекторов, заметно на мировом уровне. В России средняя цена фотоэлектрических модулей как производимых в стране, так и импортных, по данным



производителей и поставщиков, начинается примерно с 1 долл. за пиковый ватт, что соответствует оценке уровня конкурентоспособности [9].

6. Сопоставительный анализ аналогов ФЭВН и контроллеров. Основные тенденции развития ФЭВН

6.1. Мировой рынок ФЭВН и контроллеров

В состав фотоэлектрического водонагревателя входят солнечные батареи, контроллер и бак-аккумулятор с электронагревателями. Бак часто является частью уже имеющейся в доме системы горячего водоснабжения, а фотоэлектрические модули не отличаются от применяемых в электрогенерирующих установках. Уникальным для ФЭВН является только контроллер. За прошедшее с момента разработки контроллера [9, 16] время в электронных компонентах произошли существенные изменения, и в наибольшей степени на стоимость контроллера стала влиять силовая, а не «логическая» электроника. Поэтому аналогичные [9] схемы с несколькими электронагревателями сегодня не применяются – как правило, контроллер обеспечивает работу солнечных батарей в точке максимальной мощности при постоянной (или регулируемой для получения необходимого количества тепла) нагрузке. Такие МРРТ-контроллеры в настоящее время выпускаются рядом компаний [41], которые можно разделить на две группы.

В первую группу входят автономные контроллеры ФЭВН – наиболее простые в водонагревателях, в которых используется электронагреватель постоянного тока, поскольку в этом случае не требуется инвертор. Производителями и поставщиками таких решений являются Advanced Energy Industries (США) [42], Krannich Solar (Германия, поставляет контроллеры Advanced Energy Industries) [43], Thermo Dynamics Ltd. (США) [44] и *mu*-PV (Австрия) [45]. Продукция последней доступна в России [46].

По данным изготовителей и поставщиков контроллеров ФЭВН [41] в мире насчитывается 13 разновидностей (моделей больше), однако среди них имеется только 3 модели контроллеров для водонагревателей с электронагревателями постоянного тока. Все они выполнены с интегрированным электронагревателем и устанавливаются непосредственно на бак-аккумулятор (рис. 2). Солнечные батареи подключаются к контроллеру напрямую. Малые объемы выпуска и поставки подтверждаются высокой ценой контроллеров, которая составляет 1–3 тыс. евро при мощности электронагревателя 2 ÷ 3 кВт.

Контроллер VOV автономного водонагревателя HotPV, выпускаемого в Австралии и Новой Зеландии [31, 47, 48], выдает на выходе переменный ток, но напряжение изменяется в зависимости от генерируемой мощности.

Как правило, нагрузку по горячему водоснабжению ФЭВН полностью не покрывает (двухкиловаттный водонагреватель ELWA от *mu*-PV рассчитан на снабжение горячей водой семьи из 4 человек примерно на 50 % [41]). При отсутствии дополнительного газового или твердотопливного нагревателя дополнительную энергию необходимо подводить из электросети. Этим процессом удобно управлять с помощью того же контроллера, поэтому у некоторых из них предусмотрено подключение дополнительного питания от сети.

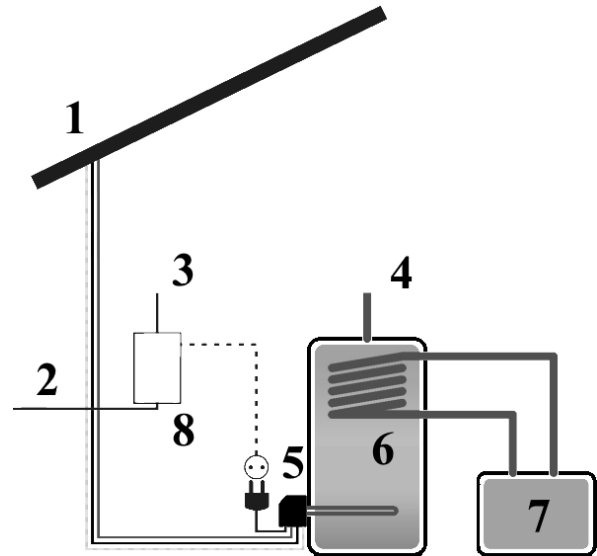


Рис. 2 – Упрощенная схема подключения контроллера ФЭВН: 1 – солнечные батареи; 2 – ввод от электросети; 3 – к потребителю электроэнергии; 4 – к потребителю тепла; 5 – контроллер со встроенным электронагревателем; 6 – бак-аккумулятор; 7 – дополнительный нагреватель; 8 – электросчетчик

Fig. 2 – Simplified scheme of PV water heater controller connection: 1 – PV array; 2 – stationary grid; 3 – electricity consumer; 4 – heat consumer; 5 – controller with built-in heating element; 6 – storage tank; 7 – auxiliary heater; 8 – electric energy meter

Вторую группу контроллеров составляют компоненты систем управления энергопотреблением (energy management systems). Основная цель таких регуляторов – не допустить отдачу избытка энергии в сеть, а использовать его для нагрева воды (см. [49]). Данные регуляторы представляют собой отдельные устройства, работающие вместе с контроллерами солнечных батарей и, при наличии в системе электрохимических аккумуляторов, батарейными инверторами на шине переменного тока. Среди представленных в работе [41] таких контроллеров большинство, часть из них, например AC ELWA-F от *mu*-PV, к сети не подключены, но также не содержат в себе контроллер солнечных батарей.

Характерные примеры контроллеров второй группы – AC ELWA и AC ELWA-E от *mu*-PV, являющиеся сетевыми аналогами ELWA и AC ELWA-F. Наиболее универсальным является AC ELWA-E, позволяющий

работать как при наличии в схеме электрохимического аккумулятора, так и без него. Упрощенная схема подключения AC ELWA-E приведена на рис. 3. Аналогично подключается, например, контроллер Solar iBoost, выпускаемый британской Sussex solar [50]. Отличия заключаются в том, что у Solar iBoost есть специальный датчик потребления, устанавливаемый рядом с электросчетчиком и связанный с контроллером, а AC ELWA-E способен работать без такого датчика.

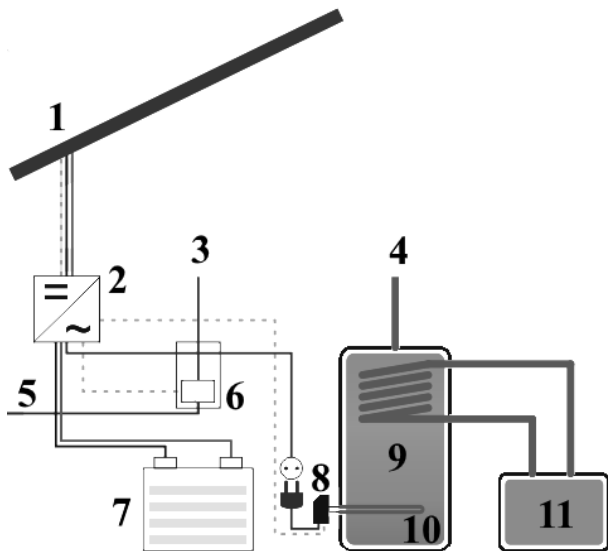


Рис. 3 – Упрощенная схема подключения контроллера – компонента системы управления энергопотреблением: 1 – солнечные батареи; 2 – контроллер солнечных батарей с инвертором; 3 – к потребителю электроэнергии; 4 – к потребителю тепла; 5 – ввод от электросети; 6 – электросчетчик; 7 – электрохимический аккумулятор; 8 – контроллер ФЭВН; 9 – бак-аккумулятор; 10 – электронагреватель; 11 – дополнительный нагреватель

Fig. 3 – Simplified scheme of PV water heater controller connection (as a part of load management strategy for PV system): 1 – PV array; 2 – solar charge controller with inverter; 3 – electricity consumer; 4 – heat consumer; 5 – stationary grid; 6 – electric energy meter; 7 – electrochemical battery; 8 – heating controller; 9 – storage tank; 10 – heating element; 11 – auxiliary heater

Цены на подобные устройства изменяются в широком диапазоне: от 375 евро до 14 тыс. евро в зависимости от мощности (достигающей 50 кВт [51]), исполнения и производителя. В работе [41] выделено 11 производителей и поставщиков систем управления энергопотреблением, кроме того, большинство из контроллеров ФЭВН от 13 производителей и поставщиков также должны относиться к этой группе. К этой же группе относится, например, и поставляемое в Россию семейство контроллеров WATTrouter [52], изначально позиционируемое изготовителем – чешской фирмой Solar Controls s.r.o. – как контроллер излишков генерируемой солнечными батареями электроэнергии (эти излишки могут использоваться, в частности, для нагрева воды).

В статье [53] проведен сравнительный технико-экономический анализ водонагревательных систем и электрохимических аккумуляторных батарей как средства запаса избыточной выработки солнечной батареи. Стоимость владения определялась для фотоэлектрической системы пиковой мощностью 3 кВт, оснащенной литий-ионными, свинцово-кислотными аккумуляторами или электрическими водонагревателями с баком-аккумулятором. Система была присоединена к сети, но задача состояла в минимизации обмена энергией. Наилучшие результаты с точки зрения нормы доходности проекта (7 %) показала система с водонагревателями, наихудшие (–6,4 %) – система со свинцово-кислотными аккумуляторами.

Промежуточное положение между двумя вышеописанными группами занимают контроллеры Solar Kerberos, выпускаемые чешской компанией UNITES Systems a.s. [54] и поставляемые в Россию. Наряду с контроллерами первой группы компания выпускает линейку контроллеров, позволяющих подогревать воду в двух баках или подключать через отдельный контроллер заряда электрохимический аккумулятор и нагрузку постоянного тока, а через дополнительный инвертор – ещё и нагрузку переменного тока. Приоритетным является нагрев воды в первом баке, питание к электронагревателю второго бака или к контроллеру заряда подается только после достижения в первом баке требуемой температуры. При этом, как и все контроллеры первой группы, устройства Solar Kerberos содержат встроенный MPPT-контроллер и выдают на выходе постоянный ток, но не включают в себя электронагреватель.

6.2. Основные тенденции развития ФЭВН

Сегодня на рынке представлено только несколько моделей специализированных контроллеров, обеспечивающих подогрев воды за счет солнечной энергии и непосредственно соединяемых с фотобатареями. Большинство на рынке составляют дополнительные устройства, гарантирующие разделение генерируемой управляемыми обычным MPPT-контроллером фотобатареями на электроэнергию и тепло для минимизации излишков энергии, отдаваемой в сеть. Такие устройства являются компонентами систем управления энергопотреблением и развиваются и будут развиваться как часть когенерационной установки в рамках концепции «умного дома».

7. Сравнительный анализ технико-экономических показателей ФЭВН и традиционной СВУ в российском климате

Оценки [31, 34, 35] показывают, что на зарубежных рынках ФЭВН вполне конкурентоспособны в сравнении с традиционными СВУ. Экономическую перспективность фотоэлектрических водонагревателей в России можно оценить по прайс-листам розничных поставщиков гелиотехнического оборудования и результатам моделирования работы водонагре-

вателя. Сравнение проводили с аналогичными ФЭВН по режиму работы предназначенными для круглогодичной работы двухконтурными СБУ с принудительной циркуляцией теплоносителя.

В качестве примера рассматривался вариант комплектной водонагревательной установки, оборудованной двумя трубчатыми вакуумированными солнечными коллекторами SCM20-58/1800-02 (20 трубок, апертурная площадь $2,09 \text{ м}^2$) и баком-аккумулятором емкостью 300 л, предлагаемый одним из ведущих российских предприятий – розничных поставщиков гелиотехнического оборудования – ООО «Ваш Солнечный Дом» [55]. По данным продавца средний суточный КПД установки составляет летом 55 %, зимой – 42 % (средний КПД – 49 %). Оценка среднегодового КПД действующих в мире СБУ по данным [15] дает 43 %.

В сравниваемом варианте ФЭВН использовали фотоэлектрические модули YL255P-29В производства компании Yingli Solar (пиковая мощность 255 Вт, площадь $1,62 \text{ м}^2$, паспортный КПД 15,7 % [56]). Поскольку паспортный КПД модулей приблизительно в 3 раза ниже, чем средний КПД СБУ (данные [57] подтверждают такое соотношение), модулей должно потребоваться примерно втрое больше по площади, чем солнечных коллекторов, то есть 8 шт. В качестве контроллера ФЭВН рассматривали Solar Kerberos, доступный в Москве в торговом доме «Солнечная корона» [54].

7.1. Математические модели фотоэлектрического водонагревателя и СБУ с трубчатыми вакуумированными солнечными коллекторами (со средствами и модулями системы TRNSYS)

Математические модели ключевых компонентов систем солнечного теплоснабжения – солнечных коллекторов и аккумуляторов тепла – хорошо изучены и многократно верифицированы [8]. В расчетах использовался типовой суточный график нагрузки из работы [8], бак-аккумулятор водонагревательной установки считался полностью перемешанным и идеально теплоизолированным. Моделирование традиционной СБУ и ФЭВН, в частности, численное решение уравнений теплового баланса бака-аккумулятора, выполнялось с помощью системы динамического моделирования установок возобновляемой энергетики TRNSYS [8, 58].

Температура воды в баке-аккумуляторе солнечного водонагревателя может существенно превысить необходимую потребителю, достигая $70 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому в расчётные схемы установок был добавлен смеситель. Если температура подогретой воды превышала необходимую потребителю (принималось значение $40 \text{ }^\circ\text{C}$), то расход воды через установку уменьшался таким образом, чтобы после смешения с поступающей на смеситель в обход установки холодной водой её температура была равна требуемой. Таким образом, графиком нагрузки задавался суммарный расход воды через водонагреватель и трубопро-

вод холодной воды, а расход воды через сам нагреватель определялся температурой на выходе из него.

Как уже отмечалось, схема фотоэлектрического водонагревателя проще схемы традиционной СБУ – в нем нет солнечного контура, вместо которого в схему была включена солнечная батарея с контроллером и электронагреватель. Поскольку для ФЭВН не имеет значения, при какой температуре хранить тепло, в расчетах рассматривался бак емкостью не 300 л, а 150 л.

Наиболее сложной в составе ФЭВН является модель фотоэлектрического модуля, в которой реализована четырёхпараметрическая модель ФЭМ [8]. Параметры модели позволяют смоделировать вольт-амперную характеристику фотоэлектрического модуля, которая производителем, как правило, не предоставляется в отличие от напряжения и токов в точках холостого хода, короткого замыкания и максимальной мощности характеристики ФЭМ в стандартных условиях испытаний ($\text{STC}: 1000 \text{ Вт/м}^2, 25 \text{ }^\circ\text{C}$). Для определения по данным характеристикам параметров модели необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений [8], что выполняется в модуле TRNSYS, описывающем ФЭМ, до начала моделирования. Расчет температуры модуля в зависимости от температуры окружающего воздуха и учет ее влияния на параметры модуля выполняется с помощью результатов испытаний NOCT (nominal operating cell temperature: $800 \text{ Вт/м}^2, 20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра 1 м/с , без нагрузки), в частности, температурных коэффициентов тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. В результате модуль позволяет рассчитать ток и напряжение в точке максимальной мощности, а также ток при заданном напряжении на нагрузке при заданных плотности потока солнечного излучения и температуре окружающего воздуха.

7.2. Условия моделирования

Разработанные авторами данной статьи с помощью средств и модулей системы TRNSYS модели фотоэлектрического водонагревателя и СБУ с трубчатыми вакуумированными солнечными коллекторами использовались для проведения сравнительного анализа показателей фотоэлектрической системы теплоснабжения и системы с солнечными коллекторами.

Работа водонагревателей моделировалась в климатических условиях Владивостока ($43^\circ 07' \text{ с.ш.}$), Астрахани ($46^\circ 17' \text{ с.ш.}$), Москвы ($55^\circ 50' \text{ с.ш.}$), Якутска ($62^\circ 05' \text{ с.ш.}$) и Оймякона ($63^\circ 16' \text{ с.ш.}$). При этом были задействованы годовые последовательности часовых климатических данных в формате типичного метеогода TMY2 [59] из базы данных Meteonorm [60], входящие в комплект поставки системы TRNSYS. Рассматривались различные углы наклона плоскости приемной поверхности солнечных коллекторов и фотоэлектрических модулей к горизонту (от оптимального в летнее время до вертикали) и различные нагрузки потребителя (расход горячей воды $100 \div 400 \text{ л/день}$). Поскольку данные испытаний сол-



нечного коллектора SCM20-58/1800-02 отсутствуют, в расчетах учитывались параметры аналогичного трубчатого вакуумированного коллектора «Атмосфера СВК-А-58-30» [61].

Сравнение вариантов водонагревателей проводилось по годовой доле покрытия нагрузки за счет солнечного излучения, представляющей собой отношение годовой теплопроизводительности установки к тепловой нагрузке потребителя за тот же период. Последняя определялась как количество тепла, необходимое для нагрева воды от температуры водопровода до требуемых потребителю 40 °С. Информация о температуре водопроводной воды име-

ется в файлах TMY2, в расчетах она была ограничена снизу 4 °С.

8. Обсуждение результатов

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 4 для угла наклона солнечных коллекторов и фотобатарей, равного широте. Неожиданной оказалась потенциальная круглогодичная работоспособность СВУ с трубчатыми вакуумированными коллекторами в условиях Якутска и Оймякона с характерными для этих мест экстремально низкими зимними температурами.

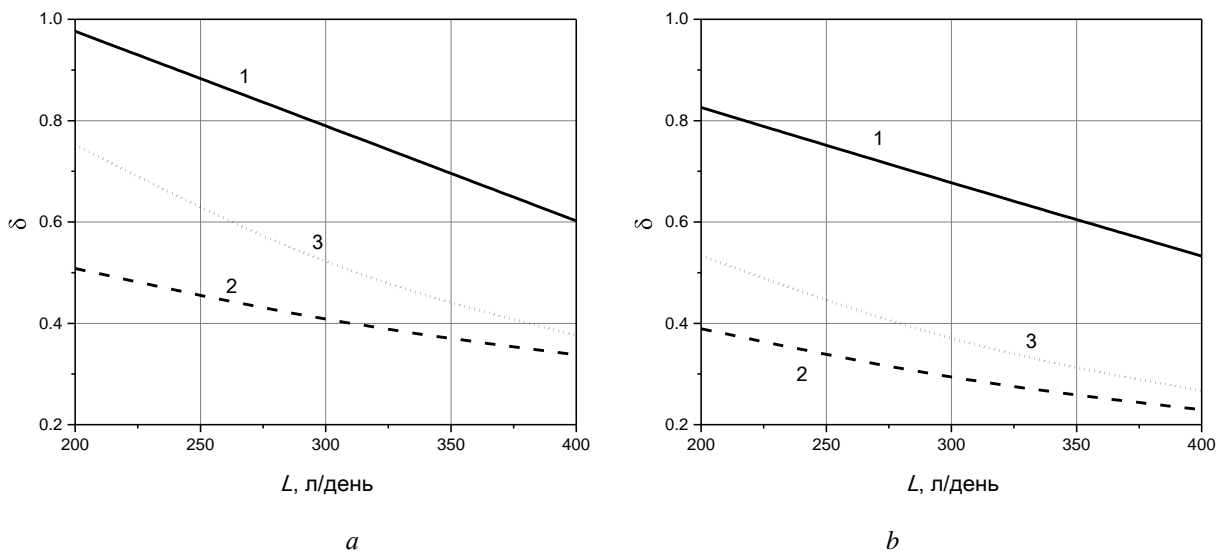


Рис. 4 – Доля покрытия нагрузки за счет солнечной энергии (δ) ФЭВН и традиционной СВУ в зависимости от нагрузки потребителя (L, л/день): а – Владивосток, б – Оймякон; 1 – ФЭВН, 2 – традиционная СВУ, 3 – ФЭВН с уменьшенным количеством фотомодулей (6 для Владивостока и 4 для Оймякона). Угол наклона солнечных коллекторов и фотомодулей к горизонту равен широте, температура горячей воды у потребителя – 40 °С

Fig. 4 – Solar fraction (δ) for PV and traditional solar water heaters subjected to hot water consumption (L, l/day): a – for Vladivostok, b – for Oymyakon; 1 – PV water heater, 2 – traditional solar water heater, 3 – PV water heater equipped with reduced PV panels number (6 for Vladivostok, 4 for Oymyakon). The tilt angle of solar collectors and PV panels is equal to latitude, the temperature of consuming hot water is 40°C

В отличие от традиционной СВУ, выработка тепла которой с ростом нагрузки (и, соответственно, падением температуры теплоносителя в контуре солнечных коллекторов) растёт, годовая выработка ФЭВН благодаря независимости КПД солнечных батарей от температуры воды выходит на насыщение уже при нагрузке 250 ÷ 300 л/день. При таких нагрузках доля покрытия для фотоэлектрического водонагревателя остается довольно высокой (0,5 ÷ 0,8).

Подобранное по предварительным оценкам КПД соотношение площадей солнечных батарей в ФЭВН и солнечных коллекторов в СВУ оказалось завышенным: в южных регионах (Владивосток, Астрахань) годовая выработка тепла ФЭВН превышает таковую для СВУ в 1,4 ÷ 2,2 раза, а в северных (Якутск, Оймякон) – в 2,1 ÷ 2,7 раз. При уменьшении количества ФЭМ до 4 ÷ 6 – для южных и 3 ÷ 4 – для северных регионов годовая выработка тепла и доля покрытия на-

грузки ФЭВН остаются выше, чем для СВУ. Последнее утверждение справедливо, в частности, и для июля, что позволяет сравнивать работающие в летнее время ФЭВН и СВУ, несмотря на то что для фотоэлектрических установок сезонная работа менее интересна. Таким образом, соотношение площадей фотоэлектрических батарей и солнечных коллекторов для получения сравнимой производительности водонагревателей составляет для южных регионов России 1,6 ÷ 2,3, для северных – 1,2 ÷ 1,6.

При малых нагрузках доля покрытия для ФЭВН может ограничиваться тем, что вода в баке достигает температуры кипения. Для увеличения доли покрытия в этом случае требуется увеличить ёмкость бака.

Ранее уже отмечалось, что все современные фотоэлектрические водонагреватели оборудованы МРРТ-контроллерами, схемы с несколькими электронагревателями в них не применяются. Альтерна-

тивной может быть полный отказ от контроллера и работа фотоэлектрических батарей на электронагреватель постоянного сопротивления. Для оценки эффективности работа такой системы также была промоделирована. Сопротивление электронагревателя принималось равным сопротивлению нагрузки в точке максимальной мощности в условиях STC-испытаний ФЭМ YL255P-29B (3,5 Ом). Расчет показал, что годовая выработка тепла таким водонагревателем составляет от половины до трёх четвертей выработки ФЭВН с МРРТ-контроллером. При использовании электронагревателя, сопротивление которого в два раза больше, годовая выработка возрастает до 75 ÷ 90 % выработки ФЭВН с МРРТ-контроллером и в большинстве случаев превышает годовую выработку соответствующей традиционной СВУ.

Выполненное моделирование позволяет оценить стоимость ФЭВН и сравнить его по этому показателю с традиционной СВУ. Комплектная СВУ в ООО «Ваш Солнечный Дом» стоит 171 тыс. руб., ФЭМ YL255P-29B – около 15 тыс. руб. Цена аналогичного используемому в СВУ бака емкостью 150 л – 44 тыс. руб., контроллера линейки Solar Cerberos – 60 тыс. руб. Стоимость «оригинального» комплекта из 8 ФЭМ, бака и контроллера (со скидками на комплектующие, идентичными скидкам на комплектующие СВУ) превышает стоимость комплектной СВУ на 11 %. Если уменьшить количество солнечных модулей до допустимых расчетом 6 штук, то стоимость такого комплекта снижается уже на 5 % по сравнению со СВУ, а с контроллером «разумной» стоимостью 30 тыс. руб. или при отказе от контроллера, но использовании 8 солнечных модулей – на 22 %. ФЭВН в двух последних вариантах стоит заметно меньше традиционной СВУ.

Поставкой комплектных солнечных водонагревателей, вакуумированных солнечных коллекторов (собственного производства) и фотоэлектрических модулей занимается и один из отечественных производителей солнечных коллекторов – ООО «Новый полюс» [37]. Цены оборудования и комплектующих у него существенно отличаются от цен ООО «Ваш Солнечный Дом», поэтому интересно провести сравнение ФЭВН и традиционной СВУ по прайс-листу «Нового полюса». Рассмотрим комплектную СВУ ЯSolar 300-Моно-3, заменив в комплекте 3 плоских солнечных коллектора на 2 трубчатых вакуумированных ЯSolar VU-20. Полученная аналогичная рассмотренной выше водонагревательная установка с учетом скидок за комплектность будет стоить примерно 105 тыс. руб. Из имеющихся в продаже ФЭМ по характеристикам наиболее похож Sanways ФСМ-250 стоимостью 10,5 тыс. руб. Цена бака емкостью 180 л, аналогичного используемому в СВУ, составляет около 20 тыс. руб. Следовательно, комплект из 8 ФЭМ, бака и контроллера дороже комплектной СВУ почти на 60 %, при уменьшении количества ФЭМ до 6 – дороже уже на 35 %. Существенную роль в формировании цены ФЭВН в этом случае (в отличие от оборудования, по-

ставляемого ООО «Ваш Солнечный Дом») играет высокая цена контроллера (прежде всего из-за относительно недорогих эмалированных, а не из нержавеющей стали баков). При использовании контроллера «разумной» стоимости ФЭВН получается всего на 7 % дороже СВУ, а при отказе от контроллера (8 ФЭМ и бак) – стоимости становятся равными.

Приведенное сравнение показывает, что фотоэлектрический водонагреватель способен конкурировать по стоимости с традиционной СВУ, однако существующие на рынке контроллеры неоправданно дороги, поэтому разработка недорогого контроллера ФЭВН была бы полезной.

Следует отметить, что приведенные оценки выполнены весьма грубо, без учета затрат на монтаж и эксплуатацию, которые у ФЭВН существенно меньше, чем у традиционной СВУ.

Впервые удалось рассмотреть всю номенклатуру современных фотоэлектрических водонагревателей, разделить выпускаемые для них контроллеры на группы по способу функционирования в системе и, соответственно, типовым схемным решениям ФЭВН. Построенные математические модели позволили сравнить фотоэлектрический водонагреватель с современной солнечной водонагревательной установкой, оборудованной трубчатыми вакуумированными коллекторами, в климатических условиях РФ. Моделирование показало, что площадь фотоэлектрических батарей в водонагревателях сравнимой производительности должна превышать площадь солнечных коллекторов в южных регионах России примерно вдвое, а в северных – всего в 1,5 раза. Технико-экономические оценки, выполненные на основе прайс-листов поставщиков с весьма сильно различающейся структурой цен, подтверждают конкурентоспособность ФЭВН по сравнению с традиционными СВУ, по крайней мере, в секторе наиболее распространенных в мире индивидуальных солнечных водонагревателей. Рассмотрение работы фотоэлектрического водонагревателя напрямую на электронагреватель постоянного сопротивления (без МРРТ-контроллера) показало, что при реализации такого решения экономия на контроллере позволяет компенсировать снижение эффективности фотобатарей посредством увеличения числа ФЭМ при снижении общей стоимости ФЭВН.

9. Заключение

На рынке солнечных коллекторов и фотоэлектрических модулей наблюдаются разнонаправленные тенденции.

Темпы роста мирового рынка солнечных коллекторов снижаются уже в течение нескольких лет. Солнечные коллекторы практически достигли технологического совершенства и стабилизировались по стоимости. Российский рынок солнечных коллекторов и СВУ находится в зачаточном состоянии, объём отечественного производства незначителен.



За последние 10 лет цена фотоэлектрических батарей снизилась на порядок, производство уверенно растёт, объём российского производства заметен на мировом уровне. Фотоэлектрические водонагреватели обладают рядом преимуществ перед традиционными солнечными водонагревателями.

Технология нагрева воды с помощью ФЭВН только начинает развиваться, оборудование производит небольшое количество фирм. Несколько производителей выпускают специализированные контроллеры солнечных батарей для таких систем, но, как правило, водонагреватель рассматривается как элемент «умного» дома, и контроллер представляет собой дополнительное устройство в системе энергообеспечения дома, обеспечивающее утилизацию излишков вырабатываемой электроэнергии.

Соотношение площадей фотоэлектрических батарей и солнечных коллекторов в водонагревателях сравнимой производительности составляет для южных регионов России 1,6 ÷ 2,3, для северных – 1,2 ÷ 1,6.

Современные фотоэлектрические водонагреватели оборудованы MPPT-контроллерами, стоимость которых неоправданно велика, что делает целесообразной разработку недорогого контроллера для ФЭВН. Возможным вариантом снижения стоимости ФЭВН является отказ от контроллера и работа фотоэлектрических батарей на электронагреватель постоянного сопротивления, при этом годовая выработка тепла превышает таковую для традиционной СВУ сравнимой стоимости.

Благодарность

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

Acknowledgment

The work was supported by the RFBR (grant 17-08-00670).

Список литературы

[1] Виллемс, П. Современное состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России / П. Виллемс // Энергетический вестник. – 2008. – № 2. – С. 30–39.

[2] Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель [и др.]. – М.: ОИВТ РАН, 2010. – 84 с.

[3] Apparatus for Utilizing the Sun's rays for heating water: United States Patent No. 451384; F24J 2/05 / Kemp C.M. – 1891.

[4] Bainbridge, D.A. The integral Passive Solar Water Heater Book [Электронный ресурс] / D.A. Bainbridge. – Solar Usage Now, 1981, 104 p. – Режим доступа: <http://deltavolt.pe/documentos/Integral-Passive-Solar-Water-Heater-Book.pdf> – (Дата обращения: 20.03.2018).

[5] Combined Solar and Artificial Heat Water Heater: United States Patent No. 735321; F24J 2/05 / Walker F. – 1903.

[6] Solar Heater: United States Patent No. 842658; F24J 2/05 / Haskell C.L. – 1907.

[7] Solar Heater: United States Patent No. 966070; F24J 2/04, F24J 2/05 / Bailey W.J. – 1910.

[8] Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Дж. Даффи, У. Бекман. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. – 888 с.

[9] Fanney, A.H. A Photovoltaic Solar Water Heating System / A.H. Fanney, B.P. Dougherty // Trans. ASME. J. Solar Energy Eng. – 1997. – Vol. 119. – No. 5. – P. 126–133.

[10] Попель, О.С. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежных и отечественных производителей и новые технические решения / О.С. Попель [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 11–16.

[11] Solar collector: United States Patent No. 3227153; F24J 2/05 / Speyer E., Godel S. – 1966.

[12] Speyer, E. Solar Energy Collection With Evacuated Tubes / E. Speyer // Trans. ASME. J. Eng. Power. – 1965. – Vol. 86. – No. 7. – P. 270–276.

[13] Meyer, J.-P. Power from the Tube / J.-P. Meyer // Sun & Wind Energy. – 2003. – No. 1. – P. 40–46.

[14] Epp, B. World Map of the Solar Thermal Industry. The disparity is growing / B. Epp // Sun & Wind Energy. – 2010. – No. 12. – P. 42–61.

[15] Weiss, W. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015. 2017 edition [Электронный ресурс] / W. Weiss, M. Spörk-Dür, F. Mautner – Режим доступа: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[16] Photovoltaic solar water heating system: United States Patent No. 5293447; F24H 1/18, G05F 1/60 / Fanney A.H., Dougherty B.P. – 1994.

[17] Williams, P.M. Modeling PV powered solar water heating systems using TRNSYS / P.M. Williams [et al.] // American Solar Energy Society, SOLAR97. – 1997. – P. 341–346.

[18] Williams P.M. Development and Analysis Tool for Photovoltaic-Powered Solar Water Heating Systems: M.S. Thesis. University of Wisconsin. Madison. 1996.

[19] Dougherty, B.P. Field Test of a Photovoltaic Water Heater / B.P. Dougherty, A.H. Fanney, J.O. Richardson // ASHRAE Transactions. – 2002. – Vol. 108. – Pt. 2. – P. 780–791.

[20] Morrison, G.L. Packaged solar water heating technology twenty years of progress [Электронный ресурс] / G.L. Morrison, B.D. Wood // Proceedings of ISES solar world congress on CD-ROM. – Jerusalem. Israel. – 1999. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

[21] Raisul, Islam M. Solar water heating systems and their market trends / Islam M. Raisul, K. Sumathy,



Khan S. Ullah // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 17. – P. 1–25.

[22] China: Challenges and Opportunities of World's Largest Solar Thermal Market [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.solarthermalworld.org/content/china-challenges-and-opportunities-worlds-largest-solar-thermal-market>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[23] Flat plate collector sales in China reach a record 6 million m² in 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solarthermalworld.org/content/flat-plate-collector-sales-china-reach-record-6-million-m2-2017>. – (Дата обращения: 01.06.2018).

[24] Tyagi, V.V. Progress in solar PV technology: Research and achievement / V.V. Tyagi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 20. – P. 443–461.

[25] Płaczek-Popko, E. Top PV market solar cells 2016 / E. Płaczek-Popko // *Opto-Electronics Review*. – 2017. – Vol. 25. – No. 2. – P. 55–64.

[26] Skandalos, N. PV glazing technologies / N. Skandalos, D. Karamanis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 49. – P. 306–322.

[27] Тарасенко, А.Б. Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 2. Модификации технологий производства фотоэлектрических преобразователей, совершенствование контактных структур и выбор перспективных технологий для расширения производства ФЭП в России / А.Б. Тарасенко, О.С. Попель // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 12. – С. 29–39.

[28] Haegel, N.M. Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges / N.M. Haegel [et al.] // *Science*. – 2017. – Vol. 356. – No. 6334. – P. 141–143.

[29] Photovoltaics Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. – (Дата обращения: 01.06.2018).

[30] Тарасенко, А.Б. Промышленные технологии фотоэнергетики и возможные пути их развития в России (обзор). Ч. 1. Общие подходы к созданию ФЭП и базовые кремниевые технологии / А.Б. Тарасенко, О.С. Попель // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 11. – С. 61–69.

[31] Morris, G. Heating water, not as simple as it used to be / G. Morris // *Solar Progress*. – 2014. – No. 2. – P. 30–32.

[32] Директор, Л.Б. О применении электродкотлов в энергетических комплексах малой энергетики / Л.Б. Директор, О.А. Иванов // *Промышленная энергетика*. – 2014. – № 12. – С. 23–27.

[33] ГИС ВИЭ. GIS Renewable Energy Sources of Russia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisre.ru/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[34] Holladay, M. Solar Thermal is Dead [Электронный ресурс] / M. Holladay. – Режим доступа: <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musing/solar-thermal-dead>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[35] Holladay, M. Solar Thermal Is Really, Really Dead [Электронный ресурс] / M. Holladay. – Режим доступа: <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musings/solar-thermal-really-really-dead>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[36] АО Военно-промышленная корпорация «НПО Машиностроения». Солнечный коллектор «Сокол-эффект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.npomash.ru/service/ru/suncollector.htm>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[37] Новый полюс. Солнечные энергоустановки с 2005 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.newpolus.ru/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[38] Бутузов, В.А. Анализ российского рынка солнечного теплоснабжения / В.А. Бутузов // *Энергосовет*. – 2015. – № 1. – С. 53–56.

[39] О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102165645&rdk=&backlink=1>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[40] Группа компаний «Хевел» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hevelsolar.com/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[41] Meyer, J.-P. Heating with PV. Economics of Electric Heating. A question of priorities / J.-P. Meyer // *Sun & Wind Energy*. – 2015. – No. 2. – P. 48–53.

[42] Advanced Energy. AE PV Heater [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.advanced-energy.com/en/PV_Heater.html. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[43] Krannich. The Global PV Experts. PV Heater [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://de.krannich-solar.com/en/products/pv-heater.html>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[44] Thermo Dynamics Ltd. Solar Heating. PV Solar Boiler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thermo-dynamics.com/PV_SB_systems.html. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[45] My-PV. Hot-water from photovoltaics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.my-pv.com/en/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[46] Автономные решения. Солнечные ТЭНы my-PV ELWA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://autonomno.ru/teplo/bez_gaza_bez_soglasovaniy/elwa_hot_water_pv1/. – (Дата обращения: 20.03.2018).



[47] Ellison, B. Hot PVtm – solar PV hot water and much more / B. Ellison // Solar Progress. – 2014. – No. 1. – P. 26–27.

[48] Easy Warm. Power on your roof [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.easywarm.co.nz/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[49] Hirvonen, J. Zero energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions / J. Hirvonen [et al.] // Applied Energy. – 2016. – Vol. 167. – P. 255–269.

[50] Sussex solar. PV Water Heating. Get hot water from your PV array with Solar iBoost+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sussexsolar.com/pv-water-heating/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[51] Shrack technik. Energyguard Pro 3-phases PV-monitoring up to 50 kW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.schrack.be/shop/energyguard-pro-3-phases-pv-monitoring-up-to-50-kw-pvc00002.html>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[52] WATTrouter – контроллер излишков электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.watrouter.ru/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[53] Parra, D. Are batteries the optimum PV-coupled energy storage for dwellings? Techno-economic comparison with hot water tanks in the UK / D. Parra, G.S. Walker, M. Gillott // Energy and Buildings. – 2016. – Vol. 116. – P. 614–621.

[54] Солнечное отопление и ГВС. Solar Kerberos [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-i-gvs>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[55] Ваш Солнечный Дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[56] Yingli Solar. YGE 60 cell series 2. Proven performance and versatility [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60CELL%20SERIES%202-29b_35mm_EU_EN_20170720_V04.pdf. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[57] Marken, C. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback / C. Marken, J. Sanchez // Home power. – 2008. – No. 127. – P. 40–45.

[58] TRNSYS – Transient System Simulation Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trnsys.com/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[59] User's Manual for ТМУ2s [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[60] Meteororm. Irradiation data for every place on Earth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meteororm.com/>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

[61] SPF. C1633. Solar Collector Factsheet. Atmosfera CBK-A-58-30 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spf.ch/fileadmin/daten/reportInterface/kollektor/en/factsheets/scf1633en.pdf>. – (Дата обращения: 20.03.2018).

References

[1] Willems P. Renewable Energy Sources: Current Situation and Development Prospects. Energy Bulletin, 2008;(2):26–36.

[2] Popel' O.S., Frid S.E., Kolomiets Yu.G., Kiseleva S.V., Terekhova E.N. Atlas of Resources of Solar Energy on the Territory of Russia (Atlas resursov solnechnoi energii na territorii Rossii). Moscow: ИИТ RAS, 2010 (in Russ.).

[3] Kemp C.M. Apparatus for Utilizing the Sun's rays for heating water. United States Patent No. 451384, F24J 2/05. – 1891.

[4] Bainbridge D.A. The integral Passive Solar Water Heater Book. Solar Usage Now, 1981, 104 p. Available on: <http://deltavolt.pe/documentos/Integral-Passive-Solar-Water-Heater-Book.pdf> (03.20.2018).

[5] Walker F. Combined Solar and Artificial Heat Water Heater. United States Patent No. 735321; F24J 2/05, 1903.

[6] Haskell C.L. Solar Heater. United States Patent No. 842658; F24J 2/05, 1907.

[7] Bailey W.J. Solar Heater. United States Patent No. 966070; F24J 2/04, F24J 2/05, 1910.

[8] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes (3d ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, 2013, 936 p.

[9] Fanney A.H., Dougherty B.P. A Photovoltaic Solar Water Heating System. Trans. ASME. J. Solar Energy Eng., 1997;119(5):126–133.

[10] Popel' O.S., Frid S.E., Shcheglov V.N., Suleimanov M.Zh., Kolomiets Yu.G., Prokopchenko I.N. A comparative analysis of the design features of solar collectors made in Russia and abroad. New technical solutions. Thermal Engineering, 2006;53(3):175–180.

[11] Speyer E., Godel S. Solar collector. United States Patent No. 3227153; F24J 2/05, 1966.



- [12] Speyer E. Solar Energy Collection With Evacuated Tubes. *Trans. ASME. J. Eng. Power*, 1965;86(7):270–276.
- [13] Meyer J.-P. Power from the Tube. *Sun & Wind Energy*, 2003;(1):40–46.
- [14] Epp B. World Map of the Solar Thermal Industry. The disparity is growing. *Sun & Wind Energy*, 2010;(12):42–61.
- [15] Weiss W., Spörk-Dür M., Mautner F. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2016. Detailed Market Figures 2015. 2017 edition [E-resource]. Available on: <http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2017.pdf> (03.20.2018).
- [16] Fanney A.H., Dougherty B.P. Photovoltaic solar water heating system. United States Patent No. 5293447; F24H 1/18, G05F 1/60, 1994.
- [17] Williams P.M., Klein S.A., Beckman W.A., Mitchell J.W. Modeling PV powered solar water heating systems using TRNSYS. *American Solar Energy Society, SOLAR97*, 1997;341–346.
- [18] Williams P.M. Development and Analysis Tool for Photovoltaic-Powered Solar Water Heating Systems: M.S. Thesis. University of Wisconsin. Madison. 1996.
- [19] Dougherty B.P., Fanney A.H., Richardson J.O. Field Test of a Photovoltaic Water Heater. *ASHRAE Transactions*, 2002;108(2):780–791.
- [20] Morrison G.L., Wood B.D. Packaged solar water heating technology twenty years of progress. *Proceedings of ISES solar world congress on CD-ROM*. Jerusalem. Israel, 1999.
- [21] Raisul, Islam M., Sumathy K., Ullah Khan S. Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013;17:1–25.
- [22] China: Challenges and Opportunities of World's Largest Solar Thermal Market [E-resource]. Available on: <http://www.solarthermalworld.org/content/china-challenges-and-opportunities-worlds-largest-solar-thermal-market> (03.20.2018).
- [23] Flat plate collector sales in China reach a record 6 million m² in 2017 [E-resource]. Available on: <http://www.solarthermalworld.org/content/flat-plate-collector-sales-china-reach-record-6-million-m2-2017> (06.01.2018).
- [24] Tyagi V.V. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013;20:443–461.
- [25] Płaczek-Popko E. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*, 2017;25(2):55–64.
- [26] Skandalos N., Karamanis D. PV glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;49:306–322.
- [27] Tarasenko A.B., Popel' O.S. Manufacturing technologies for photovoltaics and possible means of their development in Russia (review): Part 2. Modification of production technologies for photoelectric converters, development of contact structures, and choice of promising technologies for expansion of FEC production in Russia. *Thermal Engineering*, 2015;62(12):868–877.
- [28] 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;356(6334):141–143.
- [29] Photovoltaics Report [E-resource]. Available on: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (06.01.2018).
- [30] Tarasenko A.B., Popel' O.S. Manufacturing technologies for photovoltaics and possible means of their development in Russia (review). Part 1: General approach to the development of photoelectric converters and basic silicon technologies, *Thermal Engineering*, 2015;62(11):825–832.
- [31] Morris G. Heating water, not as simple as it used to be. *Solar Progress*, 2014;(2):30–32.
- [32] Direktor L.B., Ivanin O.A. On the application of electric boilers in the energy complexes of small-scale power generation. *Industrial power engineering*, 2014;(12):23–27 (in Russ.).
- [33] GIS Renewable Energy Sources of Russia [E-resource]. Available on: <http://gisre.ru/> (03.20.2018).
- [34] Holladay M. Solar Thermal is Dead [E-resource]. Available on: <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musing/solar-thermal-dead> (03.20.2018).
- [35] Holladay M. Solar Thermal Is Really, Really Dead [E-resource]. Available on: <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/musing/solar-thermal-really-really-dead> (03.20.2018).
- [36] JSC Military-industrial Corporation NPO Mashinostroyeniya. “Solol” Solar Collector [E-resource]. Available on: <http://www.npomash.ru/service/ru/suncollector.htm> (03.20.2018).
- [37] “Noviy Polus” company [E-resource]. Available on: <http://www.newpolus.ru/> (03.20.2018).
- [38] Butuzov V.A. An analysis of Russian solar heating market (Analiz rossiiskogo rynka solnechnogo teplosnabzheniya). *Energosovet*, 2015;(1):53–56. (in Russ.).



- [39] On the mechanism for stimulating the use of renewable energy sources in the wholesale electricity and capacity market. Decree of the Government of the Russian Federation of May 28, 2013 No. 449 (O mekhanizme stimulirovaniya ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii na optovom rynke elektricheskoi energii i moshchnosti. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28 maya 2013 g. № 449) [E-resource]. Available on: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102165645&rdk=&backlink=1> (03.20.2018).
- [40] Hevel Group [E-resource]. Available on: <http://www.hevelsolar.com/> (03.20.2018).
- [41] Meyer J.-P. Heating with PV. Economics of Electric Heating. A question of priorities. Sun & Wind Energy, 2015;(2):48–53.
- [42] Advanced Energy. AE PV Heater [E-resource]. Available on: https://www.advanced-energy.com/en/PV_Heater.html (03.20.2018).
- [43] Krannich. The Global PV Experts. PV Heater [E-resource]. Available on: <https://de.krannich-solar.com/en/products/pv-heater.html> (03.20.2018).
- [44] Thermo Dynamics Ltd. Solar Heating. PV Solar Boiler [E-resource]. Available on: http://www.thermo-dynamics.com/PV_SB_systems.html (03.20.2018).
- [45] My-PV. Hot-water from photovoltaics [E-resource]. Available on: <http://www.my-pv.com/en/> (03.20.2018).
- [46] Autonomous solutions. Solar heating elements my-PV ELWA (Avtonomnye resheniya. Solnechnye TENy my-PV ELWA) [E-resource]. Available on: https://autonomno.ru/teplo/bez_gaza_bez_soglasovaniy/elwa_hot_water_pv1/ (03.20.2018) (in Russ.).
- [47] Ellison B. Hot PVtm – solar PV hot water and much more. Solar Progress, 2014;(1):26–27.
- [48] Easy Warm. Power on your roof [E-resource]. Available on: <http://www.easywarm.co.nz/> (03.20.2018).
- [49] Hirvonen J., Kayo G., Hasan A., Sirén K. Zero energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions. Applied Energy, 2016;167:255–269.
- [50] Sussex solar. PV Water Heating. Get hot water from your PV array with Solar iBoost+ [E-resource]. Available on: <https://sussexsolar.com/pv-water-heating/> (03.20.2018).
- [51] Shrack technik. Energyguard Pro 3-phases PV-monitoring up to 50 kW [E-resource]. Available on: <https://www.schrack.be/shop/energyguard-pro-3-phases-pv-monitoring-up-to-50-kw-pvc00002.html> (03.20.2018).
- [52] WATTrouter – surplus power controller (WATTrouter – kontrollер излишков электроэнергии) [E-resource]. Available on: <http://www.watrouter.ru/> (03.20.2018) (in Russ.).
- [53] Parra D., Walker G.S., Gillott M. Are batteries the optimum PV-coupled energy storage for dwellings? Techno-economic comparison with hot water tanks in the UK. Energy and Buildings, 2016;116:614–621.
- [54] Solar heating and hot water. Solar Kerberos (Solnechnoe otoplenie i GVS. Solar Kerberos) [E-resource]. Available on: <http://solarcrown.ru/magazin2/folder/solnechnoye-otopleniye-i-gvs> (03.20.2018) (in Russ.).
- [55] Your solar home (Vash solnechnyi dom) [E-resource]. Available on: <http://www.solarhome.ru/> (03.20.2018) (in Russ.).
- [56] Yingli Solar. YGE 60 cell series 2. Proven performance and versatility [E-resource]. Available on: http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60CELL%20SERIES%202-29b_35mm_EU_EN_20170720_V04.pdf (03.20.2018).
- [57] Marken C., Sanchez J. PV vs. Solar Water Heating. Simple Solar Payback. Home power, 2008;(127):40–45.
- [58] TRNSYS – Transient System Simulation Tool [E-resource]. Available on: <http://trnsys.com/> (03.20.2018).
- [59] User's Manual for TMY2s [E-resource]. Available on: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/> (03.20.2018).
- [60] Meteororm. Irradiation data for every place on Earth [E-resource]. Available on: <http://www.meteororm.com/> (03.20.2018).
- [61] SPF. C1633. Solar Collector Factsheet. Atmosfera CBK-A-58-30 [E-resource]. Available on: <http://www.spf.ch/fileadmin/daten/reportInterface/kollektoren/factsheets/scf1633en.pdf> (03.20.2018).

Транслитерация по BSI

