
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 662.997

СОЛНЕЧНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

С. Е. Фрид¹, Ю. Г. Коломиец¹, А. В. Мордынский¹,
А. В. Арсатов², М. Ю. Ощепков²

¹Объединенный институт высоких температур РАН
²ООО «Политермо»

Представлен краткий обзор используемых в мире солнечных водонагревательных установок (СВУ). Выполнено сравнение работы в климатических условиях России традиционных индивидуальных солнечных водонагревательных установок с солнечным коллектором и отдельно размещенным над ним баком-аккумулятором и СВУ, в которых аккумулярование нагретой воды осуществляется непосредственно в солнечном коллекторе. Показано, что при сезонном использовании СВУ в неотапливаемый период года интегрированные СВУ могут оказаться более эффективными.

Solar water heaters (SWH) of different types have been shortly reviewed. An individual SWH with a separate solar collector and hot water storage and that with an integrated collector-storage have been comparatively investigated in Russian climatic conditions. It has been shown that the integrated SWH are supposed to be more effective in the warm period of the year.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; солнечная водонагревательная установка.

Keywords: renewable energy; solar water heating.

Технологии использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в последние годы становятся все более конкурентоспособными, и стоимость получаемой с помощью них энергии непрерывно снижается. Наиболее широко освоено использование солнечной энергии для производства низкопотенциального тепла, прежде всего, для получения горячей воды в солнечных водонагревательных установках (СВУ) [1]. В 2011 г. суммарная тепловая мощность действующих в мире солнечных водонагревательных установок (без учета систем нагрева воды в плавательных бассейнах) превысила 200 ГВт (более 350 млн м² солнечных коллекторов). В России рынок солнечных водонагревателей находится на начальном этапе своего развития, что определяет актуальность задачи освоения промышленного производства отечественных солнечных установок. Несмотря на укоренившееся мнение, что климатические условия РФ для развития солнечной энергетики неблагоприятны, по поступлению солнечной энергии многие регионы России не только не уступают, но имеют и более благоприятные условия, чем европейские страны [2, 3], в том числе Германия и Австрия, где солнечные установки уже нашли широкое применение. В этой связи представляется важным обоснование типов и конструкций СВУ, имеющих благоприятные показатели для практического применения в климатических условиях различных регионов России.

Классификация СВУ. Солнечные водонагревательные установки весьма разнообразны, различаются конструкцией, применяемыми материалами, схемами течения рабочих жидкостей и количеством контуров циркуляции, организацией хранения накопленной тепловой энергии и т.д. По принципу взаимного размещения поглощающей панели и бака-аккумулятора СВУ могут быть разделены на группы, как показано на рис. 1.

К первой группе относятся так называемые **раздельные** солнечные водонагревательные установки, в которых функции сбора солнечного тепла и его хранения разделены между отдельными устройствами – солнечным коллектором и баком-аккумулятором. Родоначальницей этой группы является установка, запатентованная в 1909 г. Вильямом Бейли [4]. В крупных СВУ тепловой

мощностью от нескольких десятков кВт до нескольких МВт с помощью циркуляционных насосов осуществляется принудительная циркуляция теплоносителя в контуре солнечные коллекторы – бак-аккумулятор. Установки этой группы проектируются и создаются в индивидуальном порядке под конкретного потребителя.

Гораздо большее распространение получили отдельные **индивидуальные** СВУ тепловой мощностью до нескольких кВт, выполняемые по более простой схеме, чем крупные установки. Как правило, за счет расположения бака-аккумулятора выше солнечного коллектора в солнечном контуре таких СВУ (их обычно называют термосифонными) обеспечивается естественная циркуляция воды. Площадь солнечного коллектора такой установки обычно составляет 2–4 м², объем бака-аккумулятора – 100–200 л, чего обычно достаточно для снабжения семьи из 2–3 человек горячей водой в условиях теплого климата или при сезонной эксплуатации установки в теплый период года. В последние годы наметилась тенденция к некоторому увеличению размеров установок до 4–8 м² площади коллектора и 400–600 л объема бака [5], а также появлению так называемых комплектных установок заводской готовности (pre-packaged) [6] примерно таких же размеров, представляющих собой комплекты оборудования (солнечные коллекторы с опорными элементами, бак-аккумулятор, трубопроводы, циркуляционные насосы, арматура, система автоматики) для монтажа в индивидуальных жилых домах.

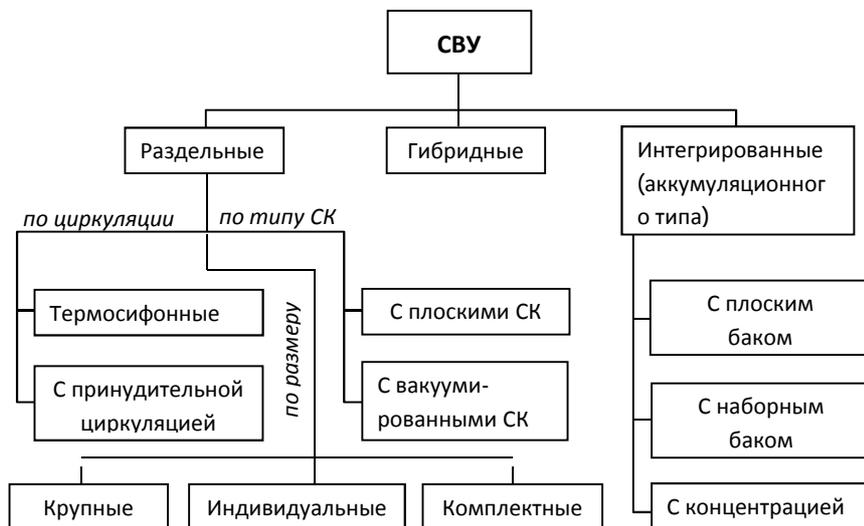


Рис. 1. Классификация СВУ

Вторую группу составляют **интегрированные** СВУ, или СВУ **аккумуляционного типа**, в которых бак-аккумулятор совмещен с поглощающей панелью, и функцию поглощающей панели выполняет одна из граней бака-аккумулятора. Именно с таких установок начиналась история гелиотехники [7–8]. Различаются СВУ аккумуляционного типа, прежде всего, по форме и, соответственно, конструкции бака-аккумулятора: баки бывают плоские, цилиндрические и наборные. Отметим, что есть установки без концентраторов солнечного излучения (тогда бак-аккумулятор у них должен быть плоским и иметь достаточно большую площадь), а также с концентраторами, которые могут располагаться как внутри корпуса СВУ, так и вне его.

Из-за совмещенной конструкции интегрированные СВУ должны быть менее материалоемкими по сравнению с термосифонными, однако при применении традиционных материалов – металла и стекла – оказываются более сложными в изготовлении и менее технологичными. В настоящее время серийно они практически не выпускаются: на определенном этапе развития их вытеснили термосифонные установки с отдельными солнечными коллекторами и баками-аккумуляторами. К тому же считается, что СВУ аккумуляционного типа менее эффективны с точки зрения преобразования энергии солнечного излучения в

низкопотенциальное тепло, чем термосифонные СВУ. Данное утверждение основано, прежде всего, на том, что в установках аккумуляционного типа имеют место более высокие тепловые потери от нагретой воды (постоянно заполняющей панель солнечного коллектора) через прозрачное ограждение в ночное время, в то время как в термосифонных СВУ горячая вода хранится в хорошо теплоизолированном баке. Вместе с тем есть основания полагать, что при использовании современных полимерных и композиционных материалов интегрированные СВУ могут стать более дешевыми в производстве, чем термосифонные.

В данной работе выполнено имитационное моделирование работы обоих типов СВУ на всей территории Российской Федерации и проведено сравнение их теплотехнических характеристик.

Помимо отдельных и интегрированных существует также небольшая группа гибридных СВУ. Представляя собой промежуточную группу, они могут различаться по количеству контуров и по степени интегрированности поглощающей панели и бака-аккумулятора. У них в единой конструкции можно выделить зоны солнечного коллектора и бака-аккумулятора. Следует отметить, что преимущества гибридных установок перед интегрированными неочевидны, а конструкция сложнее.

Моделирование СВУ. Термосифонная СВУ рассматривается в простейшей конфигурации, которая включает в себя в качестве основных компонентов солнечный коллектор, водяной бак-аккумулятор и теплоизолированные трубопроводы, обеспечивающие их гидравлическую связь. При поступлении на коллектор солнечного излучения вода в нем нагревается на несколько градусов и за счет естественной или принудительной циркуляции (для простоты при моделировании рассматривалась система с принудительной циркуляцией) поступает в бак-аккумулятор, откуда вновь направляется в солнечный коллектор для дальнейшего нагрева. В периоды недостаточной для нагрева воды интенсивности солнечного излучения циркуляция воды прекращается средствами автоматики и возобновляется, если интенсивность солнечного излучения для нагрева воды возрастает до необходимого уровня. Вода в баке считается полностью перемешанной, поскольку габариты и расположение баков в индивидуальных СВУ, как правило, не позволяют принять меры для поддержания в баке температурной стратификации [9].

В СВУ аккумуляционного типа температурная стратификация в тепловоспринимающей емкостной панели в выполненных расчетах учитывается, для чего панель разбивается на ряд зон аналогично модели стратифицированного бака-аккумулятора, описанной в [9].

Отбор нагретой воды к потребителю в термосифонной СВУ осуществляется из бака-аккумулятора, и, если это необходимо, вода догревается до нужной потребителю температуры резервным нагревателем. В СВУ аккумуляционного типа отбор нагретой воды осуществляется из верхней наиболее нагретой зоны панели, вода также, если это необходимо, догревается резервным нагревателем.

Параметры солнечного коллектора при моделировании соответствовали типичным [3, 10]: $F'(\alpha) = 0.72$ и $F'U_L = 3.6$ Вт/м²К. Для СВУ аккумуляционного типа $F'(\alpha)$ и $F'U_L$ считались идентичными параметрам плоского солнечного коллектора в СВУ термосифонного типа.

Оба типа СВУ моделировались в предположении, что бак-аккумулятор и соединительные трубопроводы идеально теплоизолированы. Объемы бака-аккумулятора и емкостной панели принимались равными 100 л, величина нагрузки составляла 100 л горячей воды в день. Габаритная площадь коллектора – 2 м² (это соотношение площади коллектора и объема бака-аккумулятора считается близким к оптимальному и наиболее часто реализуется на практике [3]).

В качестве показателя энергетической эффективности СВУ использовалась широко известная «доля покрытия нагрузки горячего водоснабжения потребителя за счет солнечной энергии», или solar fraction – в зарубежной литературе, в отечественной – коэффициентом замещения) f [9].

Суточная нагрузка рассматриваемых СВУ, как уже отмечено выше, составляла 100 л горячей воды, нагретой до 37 или 45°С (в первом случае вода ощущается как теплая, второе значение присутствует в нормативных документах по горячему водоснабжению). Важным фактором при моделировании СВУ является суточный

график потребления нагретой воды. В данном случае моделировалась система горячего водоснабжения, работающая на нагрузку, суточный график разбора горячей воды принят по данным [9]. Предполагалось, что СВУ оборудована смесителем, и, если температура в баке-аккумуляторе превышает необходимую потребителю, то к горячей воде подмешивается соответствующее количество холодной (10°C) воды из водопровода. В случае, если температура в баке-аккумуляторе ниже требуемой, догрев воды осуществляется резервным нагревателем, расположенным вне бака-аккумулятора.

Анализ показателей эффективности СВУ базируется на имитационном моделировании отдельных и интегрированных установок в конкретных климатических условиях с учетом сделанных допущений. В процессе моделирования рассчитываются ежесуточные показатели установки, фиксируются достигнутые температуры нагрева воды и затем полученные результаты статистически обрабатываются для различных периодов года. Источником исходной климатической информации служат данные NASA SSE [11], содержащиеся в локальной базе климатологических данных [12]. Расчет выполнялся для всей территории Российской Федерации (4004 точки).

Результаты расчета доли покрытия нагрузки горячего водоснабжения рассматриваемыми типами СВУ в летний период для температуры горячей воды 45°C приведены на рис. 2-3.

Видно, что в летнее время СВУ аккумуляционного типа демонстрирует лучшие результаты, чем термосифонная СВУ, практически на всей территории России. Объясняется это, по-видимому, значительной температурной стратификацией в тепловоспринимающей панели этой установки, что позволяет направлять потребителю в течение дня воду из СВУ с более высокой температурой. В результате наличие температурной стратификации компенсирует повышенные ночные тепловые потери.

В холодные периоды года ночные теплотери преобладают над эффектом стратификации, что подтверждают результаты расчета годовой доли покрытия нагрузки горячего водоснабжения: СВУ аккумуляционного типа демонстрирует более низкую годовую производительность, чем термосифонная установка.

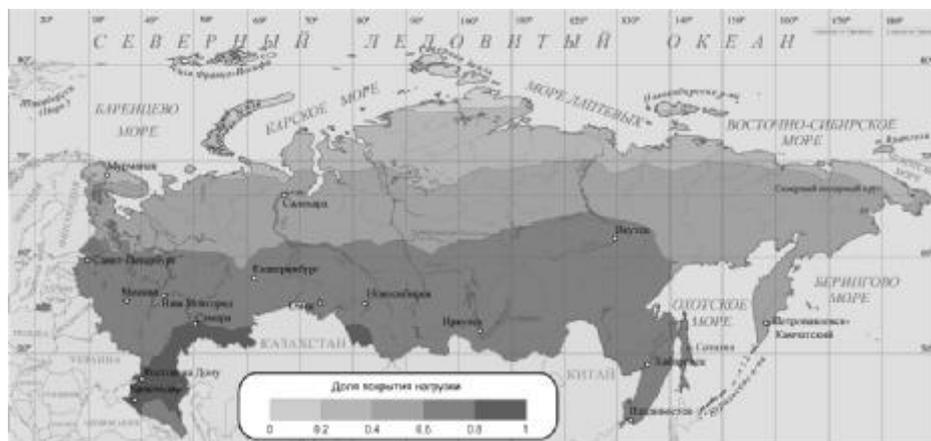


Рис. 2. Доля покрытия нагрузки в летний период для СВУ с плоским коллектором (температура поставляемой потребителю воды 45°C)

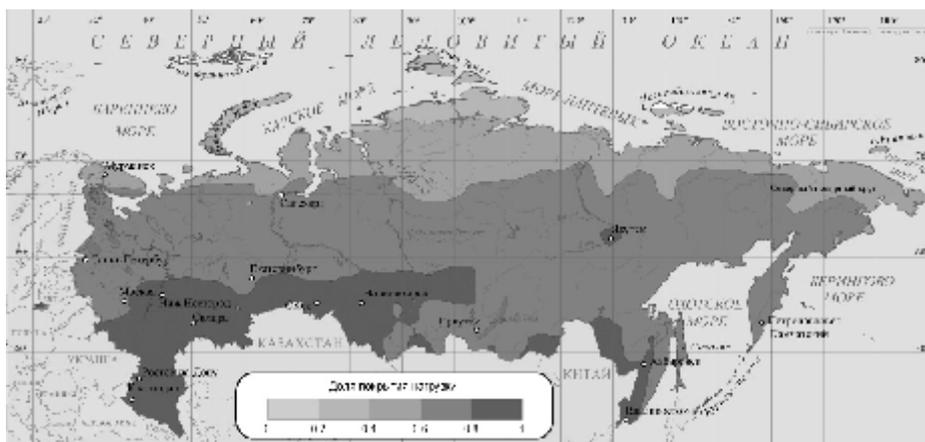


Рис. 3. Доля покрытия нагрузки в летний период для интегрированной СВУ (температура поставляемой потребителю воды 45°C)

Экспериментальная интегрированная СВУ из полимерных и композитных материалов. Как отмечалось выше, применение в конструкции интегрированной СВУ полимерных и композитных материалов может упростить конструкцию, сделать ее более технологичной и, в конечном итоге, более дешевой, чем традиционные аналоги. Для проверки этих соображений нами спроектированы и изготовлены полномасштабные экспериментальные образцы СВУ из полимерных и композиционных материалов (рис. 4). Габаритная площадь установки – около 1.5 м², что позволяет перевозить ее легковым автомобилем.

Стеклопластиковый корпус установки состоит из пяти объединенных между собой секций, объемом около 20 л каждая, т.е. емкость бака СВУ составляет 100 л (около 66 л/м²). Тонкостенная (1 мм) поглощающая панель соединена с корпусом клеевыми швами. Наличие клеевых перемычек уменьшает эффективную площадь поглощающей панели, в расчете на эту площадь объем бака составляет около 85 л/м².

Прозрачное покрытие изготовлено из полиметилметакрилата методом термовакуумформования. Толщина воздушного зазора – 25 мм. Соединение прозрачного покрытия с корпусом – клеевое, с применением термостойкого полиуретанового клея, обладающего эластичностью для предотвращения растрескивания отформованного полиметилметакрилата. Тыльная сторона СВУ теплоизолирована вспененным материалом с добавками стекловолокна, теплоизоляция составляет единое целое с корпусом установки.

Общая масса полимерных и композитных деталей составляет менее 20 кг, а полная масса конструкции, включая раму, теплоизоляцию и гидравлическую обвязку, не превышает 30 кг. Таким образом, применение полимерных материалов позволило снизить удельную массу СВУ до величины порядка 20 кг/м². Оценки показывают, что себестоимость установки при переходе на крупносерийное производство (более 5000 изделий в год) не превышает 7000 р., т.е. 120 евро/м², что в 3–5 раз ниже стоимости известных традиционных СВУ. Предварительные испытания подтвердили работоспособность установки при давлениях до 0.25 МПа, установка обладает достаточным запасом прочности для работы в безнапорных системах теплоснабжения. В настоящее время проводятся теплотехнические испытания экспериментальных образцов установки на специализированном теплогидравлическом стенде в ОИВТ РАН.

Закключение. Выполненные сравнительные расчетные исследования



Рис. 4. Экспериментальный образец СВУ из

позволяют утверждать, что в случае летнего сезонного использования, актуального в климатических условиях России, наиболее производительными, несмотря на бытующее мнение об их низкой эффективности, являются СВУ аккумуляционного типа, в которых ночное выхолаживание горячей воды компенсируется за счет значительного уровня температурной стратификации в теплоприемной емкостной панели. Установки же круглогодичного действия предпочтительнее выполнять по схеме с отдельным аккумулярованием.

Разработаны, изготовлены и прошли предварительные испытания экспериментальные образцы СВУ аккумуляционного типа из полимерных и композиционных материалов. Предварительные испытания подтверждают работоспособность таких установок, предварительная оценка стоимости позволяет надеяться на их конкурентоспособность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт № 16.516.11.6104).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фортгов В., Попель О. Возобновляемые источники энергии для энергоснабжения потребителей в России // Энергетический вестник. 2010. № 1 (8). С. 9–29.
2. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец, С.В. Киселева, Е.Н. Терехова. М.: ОИВТ РАН, 2010. 84 с.
3. Коломиец Ю.Г., Попель О.С., Фрид С.Е. Эффективность использования солнечного излучения для нагрева воды на территории Российской Федерации // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 6. С. 16–23.
4. Bailey W.J. Solar Heater // US patent No. 966070. 1910.
5. Meyer J.-P. Thermosiphonic systems: focus on installation // Sun & Wind Energy. 2012. N 4. P. 48–56.
6. Meyer J.-P. One supplier for all // Sun & Wind Energy. 2011. N 3. P. 84–101.
7. Kemp C.M. Apparatus for Utilizing the Sun's rays for heating water // US patent N 451384. 1891.
8. Vainbridge D.A. The integral Passive Solar Water Heater Book. Solar Usage Now. 1981. 104 p.
9. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes (3d ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 928 p.
10. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежных и отечественных производителей и новые технические решения / О.С. Попель, С.Е. Фрид, В.Н. Щеглов, М.Ж. Сулейманов, Ю.Г. Коломиец, И.В. Прокопченко // Теплоэнергетика. 2006. № 3. С. 11–16.
11. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. 2011. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения: 14.05.2012).
12. Климатические данные для возобновляемой энергетики (база климатических данных) / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. М.: ОИВТ РАН, 2010. 56 с.

Поступила в редакцию 12.06.2012 г.
Принята к печати 28.09.2012 г.