

## РЕАЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ ЭНЕРГИИ – ОТ РЕСУРСОВ ДО ПОТРЕБИТЕЛЯ

А.В. Юрченко, Ф.В. Саврасов, В.И. Юрченко\*

Томский политехнический университет

\*ОАО Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, г. Томск

E-mail: niipp@inbox.ru

*Рассматривается проблема удовлетворения энергетических потребностей человечества без ущерба для планеты Земля, проблема удовлетворения комфортных энергетических потребностей за счет преобразования солнечной энергии в наиболее удобную для потребителя электрическую энергию. Рассмотрены мировые и региональные тенденции экономики использования солнечных энергетических комплексов.*

### **Ключевые слова:**

*Солнечные энергетические установки, себестоимость солнечной энергии.*

### **1. Энергия для планеты Земля**

Изменение рыночных цен на энергию с учетом возмещения скрытых издержек, связанных с ее производством и использованием, станет одной из крупнейших проблем ближайших десятилетий. Рано или поздно общество должно будет платить за потребленную энергию ее истинную цену, это означает повышение цены на бензин, электричество и отопление, что для потребителей невыгодно и воспринимается болезненно. Однако попытка отложить эту проблему на будущее приведет к еще большим издержкам для потребителей и потребует более решительных мер. В ближайшем будущем следует ожидать эскалации международных конфликтов из-за притязания на обладание энергоресурсами и противостояния загрязнению окружающей среды. Поэтому, чем раньше политики и сами граждане предпримут меры, направленные на разумное производство и использование энергии, тем лучше. Когда цены отражают все затраты, рынок работает на укрепление экономики и уже не остается в стороне от решения таких важных проблем, как сохранение чистоты воздуха, предотвращение глобальных изменений климата и обеспечение безопасности энергетических объектов.

Общая мощность солнечной радиации, поступающая на нашу планету, составляет  $1,7 \cdot 10^{14}$  кВт [1]. Это колоссальная мощность примерно в 500 раз превышает предельные и вряд ли достижимые потребности человеческой цивилизации, которые по оценке Римского клуба могут достигать  $3 \cdot 10^{11}$  кВт. Если оценить всю солнечную энергию, которую наша планета получает за один год, то она составит  $10^{18}$  кВт·ч, что примерно в 10 раз больше энергии всех разведанных и неразведанных ископаемых топлив, включая и расщепляющиеся вещества. Из общего количества поступающей на Землю солнечной радиации около 30 % отражается в космос в виде коротковолнового излучения, 47 % поглощается атмосферой, поверхностью планеты (сушей и океаном) и превращается в тепло, которое большей частью рассеивается в космос в виде инфракрасного излучения, другие 23 % вовлекаются в процессы испарения, конвекцию, осадки и кругоо-

борот воды в природе. Небольшая часть, около 0,2 %, идет на образование потоков в океане и атмосфере, включая океанские волны. И только 0,02 % захватывается хлорофиллом зеленых растений и поддерживает жизнь на нашей планете. Малая доля от этих 0,02 % обеспечила миллионы лет назад накопление на Земле запасов ископаемого топлива. Таким образом, большая часть энергии используемой человеком – это различные формы накопленной и преобразованной энергии Солнца. Экономические законы и опыт развития мировой экономики показывают, что рациональная структура использования природных ресурсов в долгосрочной перспективе стремится к структуре имеющихся их запасов в Земле. Если учесть, что кремний в земной коре по массе занимает второе место, то в будущем место глобального источника энергии должны занять наземные кремниевые солнечные электростанции [2].

Известно, что здания являются основными потребителями от 40 до 60 % вырабатываемых энергоресурсов. В общем случае экономия, обеспечиваемая за счет применения энергосберегающих технологий у конечного потребителя значительна, и по оценкам в США она составляет до половины суточного объема добычи нефти странами ОПЕК. Реализация мер по энергосбережению не терпит отлагательства, ибо пока будут существовать здания, построенные в 80 гг. XX в., стране (вернее потребителям) придется расплачиваться за принимаемые сегодня решения в области строительства. За рубежом доказано практическими мерами, что производство 1 кВт·ч энергии на новой электростанции обходится в 7 раз дороже по сравнению с затратами на экономию 1 кВт·ч по программе энергосбережения. Расчеты, проведенные в США, показывают, что для обогрева неэкономичных зданий постройки 70-х гг. прошлого века требуется около  $2 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>2</sup> тепловой энергии; более экономичные здания постройки 80-х гг. требуют примерно  $8,2 \cdot 10^5$  кДж/м<sup>2</sup>. Потребность в тепле современных зданий, которые будут построены по проектам, предусматривающим энергоэкономия, снизится почти до  $10^5$  кДж/м<sup>2</sup>.

## 2. Экономика солнечных источников энергии

Начало XXI в. стало переломным в плане широкомасштабного привлечения крупнейших энергетических компаний для автоматизированного крупносерийного производства солнечных модулей наземного применения. В Европе объем промышленного производства фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в 2000 г. достиг 100 МВт, из которого 80 % – кристаллические кремниевые модули, 10 % – солнечные модули на основе теллурида кадмия и 5 % – солнечные модули на основе пленок aSi:H. Наиболее активными европейскими странами в этом процессе являются Германия, Испания, Франция. В 2000 г. в Европе начали работать 4 крупнейших автоматизированных завода по производству ФЭП. Один из самых мощных заводов – завод фирмы «Shell» в Gelsenkirchen (Германия), который производит солнечные модули на основе поликристаллического кремния общей мощностью 25 МВт в год. В настоящее время производство на этом заводе расширено до 50 МВт в год. Солнечные модули с размерами 60×120 см и КПД 8 % на основе тонкопленочных ФЭП с базовым слоем теллурида кадмия выпускает завод ANTEC Solar GmbH at Rudisleben (Erfurt, Германия). Объем производства составляет 10 МВт в год. Первый в Европе завод фирмы Wurth Solar в Marbach (Германия) по производству модулей с размерами 60×120 см и КПД (10...12 %) на основе пленок Cu(InGa)Se<sub>2</sub> запущен летом 2000 г. и имеет производительность 1 МВт в год [1]. Установленные мощности солнечной энергетики выросли на 1460 МВт, что на 34 % больше, чем в 2004 г. Установленные мощности Германии выросли на 837 МВт. В Японии установленные мощности выросли на 292 МВт, что на 14 % больше 2004 г. Ввод в строй новых мощностей в 2005 г. составляет 1460 МВт, из них:

- Германия – 57 %;
- остальная Европа – 6 %;
- Япония – 20 %;
- США – 7 %;
- остальной мир – 10 %.

Производство фотоэлектрических элементов в мире выросло с 1146 МВт в 2004 г. до 1656 МВт в 2005 г. Япония продолжает удерживать мировое лидерство в производстве – 46 % мирового рынка. Япония увеличила производство на 38 %. В Европе производится 28 %. Три крупнейшие компании в Европе – германские: Q-Cells, Schott Solar и Sunway. В США было произведено 156 МВт ФЭП, что составляет 10,6 % мирового производства. В 2005 г. установленные мощности выросли на 39 %, и достигли 5 ГВт. Инвестиции в 2005 г. в строительство новых заводов по производству ФЭП составили 1 млрд USD. Несмотря на 12 % рост мощностей по производству кремния, стоимость кремния выросла на 25 %. Из-за дефицита кремния «солнечного качества» производство ФЭП в 2006 г. выросло всего на 10 %. К 2010 г. производство ФЭП достиг-

нет 3,2...3,9 ГВт в год. Выручка производителей составит 18,6...23,1 млрд USD в год. Когда установленные мощности ФЭП во всём мире удваиваются, цена электричества, производимого солнечной энергетикой, падает на 20...30 % [2].

Минимальные цены на ФЭП (март 2006 г.) за ватт установленной мощности в USD: монокристаллические кремниевые – 4,05; поликристаллические кремниевые – 3,92; тонкопленочные – 3,76.

Стоимость кристаллических ФЭП на 40...50 % состоит из стоимости кремния. В системах преобразования энергии в принципе могут быть использованы любые созданные и разрабатываемые типы ФЭП различной структуры на базе разнообразных полупроводниковых материалов, однако не все они удовлетворяют комплексу требований к этим системам:

- высокая надёжность при длительном ресурсе работы;
- доступность исходных материалов в достаточном количестве для изготовления элементов системы преобразования и возможность организации их массового производства;
- приемлемые с точки зрения сроков окупаемости энергозатраты на создание системы преобразования;
- удобство технического обслуживания.

Некоторые перспективные материалы трудно получить в необходимых количествах для создания солнечных энергетических установок (СЭУ) из-за ограниченности природных запасов исходного сырья и сложности его переработки. Отдельные методы улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик ФЭП, например, за счёт создания сложных структур, плохо совместимы с возможностями организации их массового производства при низкой стоимости и т. д. Высокая производительность может быть достигнута лишь при организации полностью автоматизированного производства ФЭП на основе ленточной технологии и создания развитой сети специализированных предприятий соответствующего профиля, т. е. фактически целой отрасли промышленности, соизмеримой по масштабам с современной радиоэлектронной промышленностью. Изготовление ФЭП и сборка солнечных батарей на автоматизированных линиях обеспечит снижение себестоимости модуля батареи в 2...2,5 раза. В качестве наиболее вероятных материалов для фотоэлектрических систем преобразования солнечной энергии в настоящее время рассматривается кремний и арсенид галлия (GaAs), причём в последнем случае речь идёт о гетерофотопреобразователях со структурой AlGaAs-GaAs. Сейчас Россия, к сожалению, не является крупным производителем этой техники. Крупнейший производитель солнечных батарей – British Petroleum.

Иногда подчеркивается, что эффективность СЭУ составляет менее половины эффективности

атомных или тепловых систем. Данное утверждение не корректно, поскольку 38 % КПД паровой турбины означает, что оставшиеся 62 % затраченной нефти являются не только бесполезно утраченными, но и вредными, так как загрязняют окружающую среду. Тогда как даже 10 % солнечного преобразования означает эффективное использование солнечной энергии, которая в противном случае теряется. Преобразование солнечной энергии не сопровождается побочными вредными эффектами. Это основное преимущество перед системами, использующими энергетические ископаемые. Кроме того, СЭУ обеспечивают прямое преобразование солнечной энергии в электрическую энергию, наиболее ценную для потребителя.

### 3. Региональные аспекты экономики использования солнечных энергетических установок

В настоящее время на рынке солнечных кремниевых батарей наблюдается устойчивый рост, в том числе для регионов, ранее считавшимися не перспективными, например, Сибирь и Дальний Восток. Сдерживающим фактором является дефицит кремния солнечного качества. Вместе с тем интенсивно развиваются инновационные процессы организации производства такого кремния, в том числе в Сибири [3]. Отмечается отсутствие успешной реализации, даже при наличии органического соединения крупных компаний и мелких инновационных предприятий, реализующих такой проект без поддержки местных и федеральных структур и эффективных государственных инновационных систем. Таким образом, несмотря на очевидную тенденцию, до сих пор не сложилось устойчивого заключения и неясен прогноз на будущее солнечной энергетики в Сибири.

Ранее сформировавшиеся мнения, о том, что активное использование солнечной энергии в России, возможно лишь в южных регионах и в основном летом, претерпели существенные изменения. Проведенные в г. Томске исследования показали, что Томская область за исключением двух наиболее северных районов обладает значительным ресурсом по использованию источников альтернативной энергии [4]. Мониторинг работы солнечной батареи в г. Томске в течение длительного времени показал возможность ее эффективного использования [5]. Для Сибирского региона особенно важен анализ путей повышения эффективности, оптимизации конструкций и режимов работы солнечных энергетических установок, питаемых от солнечного излучения. Важно найти описание физической модели, ее математического описания при различных изменениях интенсивности солнечной радиации.

В настоящее время подходы к созданию энергоэкономичных зданий меняются, в том числе и с использованием разнообразных конструкций СЭУ. Так эксперимент в г. Москве показал, что комплект из 4 секций солнечных батарей, аккумуляторов и дат-

чиков движения за 147 тыс. р обеспечивает экономию электроэнергии на один лишь подъезд до 74 тыс. р в год. Эксперименты показывают, что рентабельно как строительство, так и использование альтернативной энергетики в России.

От Австралии до Исландии СЭУ дают свет и помогают обеспечить энергией радио- и телекоммуникации. Вместе с тем треть населения мира живет без электроэнергии. Хотя для того, чтобы привезти солнечные модули и компоненты для энергообеспечения, можно обойтись мотоциклом или ослом (по образному выражению одного специалиста по солнечной энергетике). Как сообщает ЮНЕСКО, около 18 % первичной энергии в мире получают из возобновляемых источников (дров). Далее идет гидроэнергетика и лишь незначительную долю занимают солнечная, геотермальная энергии и энергия ветра и волн. К 2050 г. по расчетам ЮНЕСКО доля возобновляемых ресурсов в энергопотреблении может возрасти до 25...30 %. По терминологии ЮНЕСКО под солнечной понимается энергия, получаемая из всех возобновляемых источников, в том числе, таких как Солнце, реки, морские приливы и ветер. Осуществление 300 проектов, предлагаемых ЮНЕСКО, способствовало бы укреплению энергетической независимости, созданию рабочих мест, повышению уровня и улучшению социально-экономических условий жизни сельского населения в развивающихся странах. О важности предлагаемой программы говорят факты из Китая и России: 180 млн китайцев не имеют доступа к энергоресурсам, в отдельные регионы севера Сибири энергоресурсы доставляют самолетами, что приводит к существенному удорожанию полученной энергии. Вместе с тем эффективность использования СЭУ для одиночных домов и малых поселений (до 10–15 домов) очевидна, в особенности при сочетании с современной бытовой техникой и энергоэффективными светодиодными источниками освещения.

### 4. Ценность энергии

Сейчас возобновляемые источники дороги, но это всегда бывает для новых технологий. По мере их развития и совершенствования будет неизбежно снижена себестоимость. Эффективная технологическая и производственная структура энергетики гармонизирует все стадии и технологии преобразования энергии от ее источников в природной среде через все стадии преобразования энергии до конечного использования у потребителя. С середины XX в. в большинстве индустриальных стран и в мире в целом доля энергии, дошедшей до потребителя, составляет лишь 37...39 % от выработанной на электростанциях, ТЭЦ, ГРЭС и т. д. (места производства энергии). Это даже меньше, чем доля полезного использования энергии первобытного костра в пещере. Этот парадокс есть результат разнонаправленных тенденций, главная из которых быстрый рост разнообразия конечного потребления и

перестройка структуры в пользу энергии все более высокой ценности. Ценность энергии можно измерить как произведение плотности потока энергии на управляемость, т. е. величину, обратную среднеквадратичному отклонению от фактического режима энергетического процесса до целевого. Ценность энергии в XX в. увеличилась на 15 порядков (от упряжки лошади до лазера, ядерной бомбы, транзистора) и составляет  $10^{24}$  Вт/м<sup>2</sup> в конце века. Концепция электрического мира на возобновляемых источниках и принципиально новых способах аккумуляции энергии изменит конфигурацию энергетики будущего. Для России, самой холодной и протяженной страны мира с очень низкой плотностью населения, это особенно актуально, хотя из-за худших климатических условий возобновляемые ресурсы здесь на 20...40 % дороже, чем на юге, поэтому распределенная децентрализованная энергетика при существенном замещении традиционных источников энергии на возобновляемые становится выгоднее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейвис Г.Р. Энергия для планеты Земля // В мире науки. – 1990. – № 11. – С. 7–14.
2. Юрченко В.И., Юрченко А.В., Козлов А.В. Солнечные батареи, как объект инновационного развития изделий двойного назначения // Военная техника, вооружение и технологии двойного применения: Матер. III Междунар. технологического конгресса. – Омск, 7–10 июня 2005 г. – Омск. – 2005. – Ч. 1. – С. 331–332.
3. Юрченко В.И. Анализ инновационных процессов организации производства кремния солнечного качества в Сибири // III Российское совещание по росту кристаллов и пленок кремния и исследование их физических свойств и структурного со-

#### Выводы

1. Экономика использования запасенной (газ, нефть, уголь) и преобразованной (гидроэнергетика, ветроэнергетика и т. п.) солнечной энергии в цепи ее доведения до ценной для потребителя энергии менее эффективны, чем прямое преобразование солнечной энергии в электрическую непосредственно в месте ее потребления.
2. Экономика солнечных кремниевых батарей наиболее перспективна как по запасам кремния в земной коре, так и по себестоимости ее производства и использования.
3. Концепция развития энергетического мира на базе солнечных энергосистем для развивающихся стран и удаленных регионов (в том числе Сибири) в настоящий момент наиболее выгодна по времени развертывания энергосистемы, по стоимости обслуживания, конечной себестоимости энергии и нагрузке на экосферу.

*Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ: МК-5765.2008.8.*

вершенства: Сб. тезисов докл. – Красноярск, 4–6 июля 2006. – Красноярск, 2006. – С. 131.

4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Яворский М.И. Перспективы малой энергетики в Томской области: Сб. статей, докладов и выступлений. – Томск: Изд-во ТГУ. – 2001. – 130 с.
5. Yurchenko A.V., Kozloff A.V. The results of the long-term environmental tests of silicon solar batteries in Siberia // Proc. of 21<sup>st</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition: Dresden 4–8 September. – 2006. – P. 2436–2439.

*Поступила 13.05.2009 г.*