



**СТРЕБКОВ Дмитрий Семенович** - академик РАСХН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского НИИ электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ)  
Адрес: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2  
e-mail: strebkovds@inbox.ru

## Солнечная энергетика в будущем мире – взгляд из России

### Введение

Менее чем через 25 лет после Чернобыльской катастрофы мир стал свидетелем аварии на АЭС «Фукусима» в Японии с зоной отчуждения и последствиями, близкими к Чернобыльской катастрофе. Если из четырех блоков Чернобыльской АЭС был разрушен один, а остальные три проработали еще десять лет, то на «Фукусиме-1» четыре блока полностью разрушены и уже никогда не будут работать. Сто тысяч человек были вынуждены покинуть свои дома. Фабрика по производству чая, расположенная в 300 км от АЭС «Фукусима», остановлена из-за заражения чайных плантаций радиоактивным цезием. Авария на «Фукусиме» снова показала, что ядерная энергетика неконтролируема и опасна [1]. В результате Германия решила до 2022 года закрыть все свои атомные станции. Китай, Италия, Венесуэла и ряд других стран решили остановить новое строительство АЭС на своей территории.

Президент Барак Обама заявил 26 мая 2010 г. во время посещения фабрики по производству фотоэлектрических систем в Калифорнии: «Нация, которая лидирует в экономике чистой энергетики, возможно, будет лидером в глобальной экономике» [2]. Правительство США выделило из бюджета 2,36 млрд долл. на повышение эффективности использования возобновляемых энергоресурсов, в том числе 500 млн долл. на гарантии по кредитам на развитие ВИЭ в объеме до 3-5 млрд долл. Будет продолжено финансирование трех инновационных энергетических центров по солнечной энергетике, проектам домов с нулевым потреблением и по проблемам аккумуляции электроэнергии.

А что же Россия? Президент Д.А. Медведев заявил, что «у атомной энергетики нет альтернативы», и, по-видимому, это заявление подготовлено Росатомом.

На самом деле альтернатива у атомной энергетики есть. Различие между Чернобылем и Фукусимой состоит в том, что сегодня мы имеем развитые альтернативные энергетические технологии бестопливной возобновляемой энергетики.

Установленная мощность электростанций, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ) (ветровая, солнечная, геотермальная и морская энергетика, биоэнергетика и малая гидроэнергетика) превысила в 2010 г. установленную мощность АЭС в мире и составила 388 ГВт (рост на 60 ГВт по сравнению с 2009 г.). Объем инвестиций в мировую возобновляемую энергетику составил в 2010 г. 243 млрд долл., рост инвестиций - 630% с 2004 г. [3]. КНР занимает первое место в мире с 25% долей инвестиций (54,4 млрд долл.), Германия на втором месте (41,2 млрд долл.) и США на третьем месте (34 млрд долл.). Ветровая энергетика лидирует среди других видов ВИЭ по объемам инвестиций - 95 млрд долл. США.

По темпам роста первое место занимает солнечная энергетика. В 2010 г. в мире построено 27,2 ГВт солнечных электростанций (СЭС), в том числе Германия - 7 ГВт, Италия - 5,6 ГВт, Чехия - 1,2 ГВт, Япония - 1 ГВт. Темпы роста производства СЭС составили 118% по сравнению с 2009 г. В конце 2011 г. установленная мощность СЭС в мире достигла 60 ГВт [4]. Ни одна отрасль промышленности в мире, включая телекоммуникации и производство компьютеров, не имела таких темпов роста. Для сравнения, в 2010 г. в мире завершено строительство трех АЭС общей мощностью 3 ГВт, которое продолжалось более 5 лет.

Для первого технологического уклада базовым энергоносителем являлась энергия воды, ветра и биомассы, для второго и третьего - уголь, для четвертого - нефть и газ, для пятого технологического уклада - возобновляемые источники энергии, то есть энергоносители, соответ-

ствующие первому технологическому укладу, но на другом витке спирали, с использованием современных инновационных технологий.

Современная традиционная энергетика практически достигла предельного уровня развития. Россия предлагает энергетическую модель будущего мира, основанную на солнечной энергетике и новых российских энергетических технологиях.

Наличие уникальных запасов углеводородного сырья не является препятствием для развития использования ВИЭ. Большие ресурсы энергоносителей позволяют России не делать стратегических ошибок в выборе оптимальных технологий и направлений развития ВИЭ и создать с учетом опыта западных стран, Китая и Японии собственные инновационные технологии и крупномасштабные проекты использования ВИЭ. Масштабное развитие использования ВИЭ в России должно базироваться на оригинальных инновационных российских технологиях.

## **1. Российские инновационные технологии солнечной фотоэлектрической энергетики**

### **1.1. Солнечный кремний**

95% всех СЭС в мире изготавливаются из кремния. Содержание кремния в земной коре - 29,5% массы, второе место после кислорода, содержание урана - 0,0003%. Несмотря на то, что кремния в земной коре больше, чем урана в 98300 раз, стоимость монокристаллического кремния лишь немного уступает стоимости урана, что связано с устаревшей грязной хлорной технологией производства (Сименс-процесс). В ГНУ ВИЭСХ разработаны уникальные бесхлорные технологии получения кремния с низкими энергетическими затратами, на которые получено 8 патентов РФ и США.

Другой подход заключается в снижении расхода кремния на один мегаватт мощности с 6-8 т в настоящее время в 100-1000 раз за счет использования новых типов концентраторов и матричных кремниевых солнечных элементов (МСЭ), разработанных в России.

### **1.2. Солнечные концентраторы**

В ГНУ ВИЭСХ разработаны и запатентованы солнечные концентраторы со слежением за Солнцем с концентрацией 100-1000 и без слежения за Солнцем - стационарные неследящие концентраторы с концентрацией 3-5 [5, 6]. Оба типа концентраторов обеспечивают равномерное освещение солнечных фотоэлектрических модулей, что исключительно важно при эксплуатации СЭС с концентраторами. Неследящие концентраторы концентрируют не только прямую, но и большую часть диффузной (рассеянной) радиации в пределах апертурного угла, что увеличивает установленную мощность СЭС и производство электроэнергии.

### **1.3. Солнечные элементы**

Созданные в ГНУ ВИЭСХ матричные солнечные элементы из кремния имеют КПД 20% при 50-1000-кратной концентрации солнечного излучения [5]. Запатентованные в России двухсторонние планарные СЭ и МСЭ прозрачны для неактивной инфракрасной области спектра, что снижает нагрев фотоприемника и затраты на его охлаждение. Преимуществом МСЭ является генерация высокого напряжения 15-20 В на один погонный сантиметр рабочей поверхности.

В испанской солнечной электростанции проекта «Эвклид» с концентратором пиковой мощностью 480 кВт для получения рабочего напряжения 750 В, необходимого для присоединения к бестрансформаторному инвертору, использовались последовательно соединенные планарные солнечные кремниевые модули общей длиной 84 м [7]. МСЭ напряжением 750 В имеют длину в 191 раз меньше - 0,44 м, при этом МСЭ имеет рабочий ток в сотни

раз меньше, чем планарные СЭ одинаковой мощности и, как следствие, низкие коммутационные потери. Приемник на основе МСЭ длиной 84 м будет иметь напряжение 150 кВ, и в этом случае СЭС может быть подключена к высоковольтной ЛЭП постоянного тока без промежуточных трансформаторов, выпрямителей и других преобразующих устройств.

МСЭ из кремния в сотни раз дешевле солнечных элементов на основе каскадных гетероструктур на единицу площади, технология МСЭ не требует применения серебра, многостадийной диффузии, фотолитографии, сеткографии, эпитаксии, текстурирования и других трудоемких операций, используемых на зарубежных заводах.

### **1.4. Солнечные фотоэлектрические модули**

Все существующие в мире конструкции, материалы и технологии изготовления солнечных модулей обеспечивают срок службы модулей 20 лет в тропическом климате и 25 лет в умеренном климате с потерей до 20% мощности к концу срока службы. Причина - ультрафиолетовая и температурная деградация оптических полимерных герметизирующих материалов - этиленвинилацетата и других пластиков. Используемая технология ламинирования модулей включает вакуумирование, нагрев до 150° и прессование с затратами электроэнергии 80 000 кВт·ч на изготовление 1 МВт солнечных модулей.

В новой технологии, разработанной в ГНУ ВИЭСХ, этиленвинилацетат и технология ламинирования заменены на заливку силиконовой композиции с последующим отверждением жидкой компоненты в полисилоксановые гели. При этом срок эксплуатации солнечных модулей увеличивается в два раза - до 40-50 лет, возрастает электрическая мощность модулей благодаря более высокой прозрачности геля и снижению рабочей температуры СЭ, снижаются энергозатраты на изготовление модулей на 70 000 кВт·ч/МВт. Кроме того, удвоение срока службы увеличивает производство электроэнергии на 20 млн кВт·ч на 1 МВт пиковой мощности.

### **1.5. Стоимость солнечного электричества**

Минимальная стоимость солнечных модулей из кремния на оптовом европейском рынке составляет 1250 евро/кВт, на американском рынке 1700 долл./кВт. Стоимость изготовления СЭС «под ключ» составляет для сетевых компаний 3400 долл./кВт, для владельцев домов 6500 долл./кВт [4]. Министерство энергетики США в августе 2010 г. объявило о программе снижения к 2012 г. стоимости производства сетевых СЭС до 1000 долл./кВт, а солнечных модулей до 500 долл./кВт. Стоимость изготовления солнечных модулей составляет 50% от стоимости СЭС, еще 50% стоимости включает закупку сетевого инвертора, металлоконструкций, кабелей и строительно-монтажные работы.

На региональном уровне в Италии, других странах мира и в ряде регионов России достигнут паритет цен между тарифами на электроэнергию от сети и ценой электрической энергии от СЭС. Например, в Калмыкии, Курской области, в ряде районов Якутии, Чукотки стоимость электроэнергии для юридических лиц составляет 7-9 руб./кВт·ч (0,25-0,32 долл./кВт·ч), что сопоставимо с существующей ценой электроэнергии от СЭС. Везде, где используются дизельные электростанции, тарифы на электроэнергию выше, чем стоимость электроэнергии от СЭС.

В ближайшие годы КПД МСЭ из кремния будет увеличен до 25-30% при работе с концентратором. Однако уже сейчас использование новых технологий кремния, концентраторов и МСЭ позволяет создавать солнечные электростанции, конкурентоспособные с электростанциями, работающими на угле.

**1.6. Круглосуточное производство солнечной электроэнергии**

Проблема непрерывного круглосуточного и круглогодичного производства электроэнергии солнечными электростанциями является основной в развитии глобальной бестопливной энергетики и обеспечении ее конкурентоспособности с топливной энергетикой. В ГНУ ВИЭСХ разработаны и запатентованы региональные и глобальные солнечные энергетические системы, позволяющие вырабатывать и доставлять электроэнергию потребителям независимо от времени суток и времен года [5, 8].

**1.6.1. Российская солнечная энергосистема**

Проведено компьютерное моделирование российской солнечной энергосистемы из двух СЭС, установленных на Чукотке и в Калининграде (РФ) или г. Пинске (Республика Беларусь) и соединенных с объединенной энергосистемой России. Фотоактивная площадь СЭС с КПД 20% составляет квадрат со стороной 25 км. Пиковая мощность каждой СЭС 125 млн кВт. В качестве исходных данных для расчета использованы средние многолетние значения инсоляции в местах расположения СЭС. Солнечная энергосистема позволяет круглосуточно в течение 5 месяцев с 1 апреля по 1 сентября поставлять электроэнергию в энергосистему России в объеме 500 ТВт·ч и удовлетворять все потребности России в электроэнергии за этот период. Еще в течение двух месяцев в марте и в сентябре продолжительность электроснабжения составляет 22 часа в сутки. При этом все топливные электростанции в течение 5 месяцев будут переведены в разряд резервных, а сэкономленные газ, нефть и уголь могут быть поставлены на экспорт.

Если включить в эту энергосистему СЭС в пустыне Каракум в Туркменистане, то объемы круглосуточного производства электроэнергии будут достаточны для электроснабжения всех стран СНГ в течение 6 месяцев.

**1.6.2. Евро-Азиатская солнечная энергосистема**

Евро-Азиатская солнечная энергосистема Чукотка-Лиссабон позволит обеспечить все страны Европы и СНГ электроэнергией круглосуточно в течение 7 месяцев с 1 марта по 1 октября.

Евро-Азиатская энергосистема состоит из двух СЭС пиковой мощностью 1,5 ТВт. Если включить в эту энергосистему СЭС в Тибете (Монголия, Китай) и СЭС в Мавритании (Африка), то круглосуточное производство электроэнергии в объеме 6000 ТВт·ч в год будет достаточно для электроснабжения Европы, СНГ, северных стран Азиатского и Африканского континентов в течение 7 месяцев.

**1.6.3. Глобальная солнечная энергосистема**

Глобальная солнечная энергосистема соединена с национальными энергосистемами и состоит из трех СЭС, установленных в Австралии, Северной Африке и Латинской Америке. КПД СЭС равен 25%, пиковая электрическая мощность каждой СЭС 2,5 ТВт, размеры 190x190 км<sup>2</sup>. Глобальная солнечная энергосистема генерирует электрическую энергию круглосуточно и равномерно в течение года в объеме 17 300 ТВт·ч/год на уровне, соответствующем мировому потреблению. Это позволит перевести все угольные, газовые и атомные станции в мире в разряд резервных электростанций, уменьшить перегрев атмосферы и остановить изменение климата.

В качестве источника электрической энергии в резонансной глобальной солнечной энергосистеме могут быть использованы не только СЭС, но и другие возобновляемые источники энергии (ГЭС, ВЭС, ГЕоТЭС и др.).

Россия отстает от западных стран в технологии ветровых лопастных турбин мегаваттного уровня. Однако в области малой ветроэнергетики инженер ГНУ ВИЭСХ С.А. Болотов разработал и организовал первое в мире производство бесшумных ВЭС без лопастей мощ-

ностью 1-5 кВт, которые удовлетворяют всем требованиям экологической безопасности и в отличие от лопастных турбин могут работать в диапазоне скоростей ветра от 3 до 50 м/с.

Для создания глобальной и региональных солнечных энергетических систем в России разработаны новые технологии, обеспечивающие конкурентоспособность солнечной энергетики по следующим критериям:

- КПД солнечных электростанций должен быть не менее 25%.
- Срок службы солнечной электростанции должен составлять 50 лет.
- Стоимость установленного киловатта пиковой мощности солнечной электростанции не должна превышать 2000 долл.
- Объем производства солнечных электростанций должен быть 100 ГВт в год.
- Производство полупроводникового материала для СЭС должно превышать 1 млн т в год при цене не более 25 долл./кг.
- Круглосуточное производство электрической энергии солнечной энергосистемой.
- Материалы и технологии производства солнечных элементов и модулей должны быть экологически чистыми и безопасными.

Создание глобальной и региональных солнечных энергосистем уже началось. Консорциум компаний и Дойче Банк в Германии планируют создать СЭС 100 ГВт в пустыне Сахара стоимостью 400 млрд евро для электроснабжения Европы. Создаются СЭС мощностью сотни мегаватт в Испании, Германии, Италии, Китае, США и Австралии.

Начало функционирования глобальной солнечной энергетической системы прогнозируется в 2050 г., выход на полную мощность в 2090 г. В результате реализации проекта доля солнечной энергетики в мировом потреблении электроэнергии составит 75-90%, а выбросы парниковых газов будут снижены в 10 раз.

**1.7. Обеспечение экологических характеристик производства энергии**

Человечеству не грозит энергетический кризис, связанный с истощением запасов нефти, газа, угля, если оно освоит технологии использования возобновляемой энергии. В этом случае будут также решены проблемы загрязнения среды обитания выбросами электростанций и транспорта, обеспечения качественными продуктами питания, получения образования, медицинской помощи, увеличения продолжительности и качества жизни. СЭС создают новые рабочие места, улучшают качество жизни и повышают энергетическую безопасность и независимость владельцев СЭС за счет бестопливного и распределенного производства энергии.

Разрабатываются технологические процессы производства компонентов СЭС, в которых экологически неприемлемые химические процессы травления и переработки заменяются на вакуумные, плазмохимические, электронно-лучевые и лазерные процессы. Серьезное внимание уделяется утилизации отходов производства, а также переработке компонентов СЭС после окончания срока службы.

При использовании СЭС органически сочетаются природные ландшафты и среда обитания с энергетическими установками. СЭС образуют пространственно-архитектурные композиции, которые являются солнечными фасадами или солнечными крышами зданий, ферм, торговых центров, складов, крытых автостоянок, теплиц. На территории СЭС можно размещать виноградники, розарии и выращивать экологически чистые сельскохозяйственные культуры.

## 1.8. Волноводные методы передачи электрической энергии

В связи с развитием объединенных энергосистем в Европе, Северной и Южной Америке и предложениями по созданию глобальной солнечной энергосистемы появились задачи по созданию технологии передачи тераваттных трансконтинентальных потоков электрической энергии. В конкуренции между системами передачи на переменном и постоянном токе может вступить третий метод: резонансный волноводный метод передачи электрической энергии на повышенной частоте, впервые предложенный Н. Тесла в 1897 г. и разработанный в ГНУ ВИЭСХ в 1995-2010 годах [8].

Крупные энергетические компании во многих странах мира вкладывают гигантские средства и научные ресурсы в создание технологии высокотемпературной сверхпроводимости для снижения джоулевых потерь в линии.

Существует другой, вероятно, более эффективный способ снижения потерь в магистральных и межконтинентальных линиях электропередач: разработать регулируемые резонансные волноводные системы передачи электрической энергии на повышенной частоте 1-100 кГц, которые не используют активный ток проводимости в замкнутой цепи. В волноводной однопроводниковой линии нет замкнутого контура, нет бегущих волн тока и напряжения, а есть стоячие (стационарные) волны реактивного емкостного тока и напряжения со сдвигом фаз 90°. За счет настройки резонансных режимов, выбора частоты тока в зависимости от длины линии можно создать в линии режим пучности напряжения и узла тока (например, для полуволновой линии). При этом из-за отсутствия активного тока, сдвига фаз между стоячими волнами реактивного тока и напряжения 90° и наличия узла тока в линии отпадает необходимость и потребность в создании в такой линии режима высокотемпературной проводимости, а джоулевы потери становятся незначительными в связи с отсутствием замкнутых активных токов проводимости в линии и незначительными величинами незамкнутого емкостного тока вблизи узлов стационарных волн тока в линии [9-10].

Новая физика электрических процессов, связанная с использованием не активного, а реактивного тока, позволяет решить три главных проблемы современной электроэнергетики:

- создание сверхдальних линий передач с низкими потерями без использования технологии сверхпроводимости;
- увеличение пропускной способности линий;
- замена воздушных линий на кабельные однопроводниковые волноводные линии и снижение сечения токонесущей жилы кабеля в 20-50 раз.

В экспериментальной резонансной однопроводниковой системе передачи электрической энергии, установленной в экспериментальном зале ВИЭСХ, мы передавали электрическую мощность 20 кВт при напряжении

6,8 кВ на расстояние 6 м по медному проводнику диаметром 80 мкм при комнатной температуре, при этом эффективная плотность тока в проводнике составила 600 А/мм<sup>2</sup>, а эффективная плотность мощности - 4 МВт/мм<sup>2</sup>.

Из других применений резонансной электроэнергетики, основанной на незамкнутых токах, следует выделить бесконтактный высокочастотный электротранспорт, создание местных энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии, соединение оффшорных морских ВЭС с береговыми подстанциями, электроснабжение потребителей на островах и в зонах вечной мерзлоты, пожаробезопасные однопроводниковые системы уличного освещения и освещения зданий и пожароопасных производств.

Для сомневающихся в существовании незамкнутых электрических токов приводим высказывания двух выдающихся ученых в области электротехники и электроэнергетики.

«Исключительная трудность согласования законов электромагнетизма с существованием незамкнутых электрических токов - одна из причин среди многих, почему мы должны допустить существование токов, создаваемых изменением смещения» (Д. Максвелл).

«В 1893 г. я показал, что нет необходимости использовать два проводника для передачи электрической энергии... Передача энергии через одиночный проводник без возврата была обоснована практически» (Н. Тесла, 1927 г.).

«Эффективность передачи может быть 96 или 97 процентов, и практически нет потерь... Когда нет приемника, нет нигде потребления энергии» (Н. Тесла, 1917 г.).

«Мои эксперименты показали, что на поддержание электрических колебаний по всей планете потребуются несколько лошадиных сил» (Н. Тесла, 1905 г.).

Н. Тесла ответил и на вопрос, который часто задают нам: почему электроэнергетика не восприняла его идеи? «Мой проект сдерживался законами природы. Мир не был готов к нему. Он слишком обогнал время. Но те же самые законы восторжествуют в конце и осуществят его с великим триумфом» (Н. Тесла, 1919 г.).

Для всех предложенных стратегических проектов необходима поддержка государства в следующих вопросах: патентование и трансфер новых технологий за рубежом; законодательное и нормативно-правовое обеспечение; недискриминационное присоединение к электрическим сетям; льготное налогообложение производителей и стимулирование потребителей чистой электроэнергии; финансирование создания пилотных и демонстрационных образцов; строительство новых заводов и организация производства для государственных нужд и экспорта.

Динамично развивающаяся солнечная энергетика, основанная на инновационных российских и мировых технологиях, является альтернативой топливной энергетике и в 2050 г. будет доминировать на рынке энергетически чистых технологий, а к концу XXI века обеспечит 75-90% всех потребностей Земли в электрической энергии.

### Литература:

- Photon International*, April 2011, p. 3.  
*Sun and Wind Energy*, 7/2010, p. 8.  
*Renewable Energy Focus*, March/April 2011, p. 1, 4, 52-54.  
*Photon International*, March 2011, p. 1, 186.  
 Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы. - М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2009. - Т. 1. - 118 с., Т. 2. - 227 с., Т. 3. - 310 с.  
 Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения. - М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2007. - 315 с.  
 G. Sala, J.C. Arboiro, A. Luque, I. Anton et al. 480 kW peak Concentrator Power Plant using EUCLIDESTM

*Paralolic Trough Technology*, 1998, 2nd WC PV SEC, Vienna.

Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. - М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2008. - 351 с.

Стребков Д.С. Об электроэнергетике, основанной на незамкнутых электрических токах / Проблемы использования альтернативных источников энергии в Туркменистане. Материалы Международной научной конференции 24-25 февраля 2010 г. - Ашхабад: Изд. Ылым, 2010. - С. 26-30.

Уроки Фукусимы: есть ли альтернатива атомной энергии // Энергетика и промышленность России. - 2011. - №12 (176). - С. 46-47.