

## НАНОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ

**В. М. Андреев**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

The sun is practically inexhaustible ecologically pure energy source. However, the cost of electricity generated by solar arrays is much higher than that obtained by traditional methods. A promising way to solve this problem is the photovoltaic conversion of the concentrated sunlight by heterostructure solar cells, which were firstly developed at the Ioffe Institute. Recently developed tandem solar cells ensure increase in the sunlight conversion efficiency up to the values higher than 35% “suns” in terrestrial conditions. It gives a possibility to reduce solar electricity cost compared to that of silicon solar arrays. This is achieved due to decrease in the heterostructure solar cell area proportionally to the sunlight concentration ratio obtained by means of cheap Fresnel lens panels.

### Перспективы развития фотоэнергетики

В настоящее время в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться на крупномасштабном использовании солнечной энергии. Солнце — это огромный, неиссякаемый, абсолютно безопасный источник энергии, в равной степени всем принадлежащий и всем доступный. Ставка на солнечную фотоэнергетику должна рассматриваться как беспроигрышный и безальтернативный выбор для человечества.

Современный мировой рынок фотоэнергетики — это вполне сложившийся, быстроразвивающийся сегмент мировой экономики с возрастающим темпом роста. Это обусловлено, во-первых, практической направленностью национальных программ высокоразвитых стран: 100 тысяч солнечных крыш в Германии, более 200 тысяч сол-

нечных крыш в Японии, 1 млн. солнечных крыш в США, выделение 3 млрд. евро в ЕС на развитие фотоэнергетики до 2010 г.

Объем производства солнечных фотоэлектрических систем с 2000 г. растет в среднем на 30 % в год. Согласно прогнозам, объем фотоэнергосистем в 2020 г. превысит 50 ГВт (пик.), т. е. за 20 лет объем рынка увеличится в 140 раз (в 2000 г. было произведено 280 МВт).

В 2006 г. суммарное производство солнечных батарей превысило 2 ГВт.

Рынок солнечной фотоэнергетики — коммерчески очень перспективный рынок, характеризующийся следующими факторами:

- к середине века запасы нефти и газа будут близки к истощению, и солнечное электричество должно компенсировать их уменьшающуюся добычу;

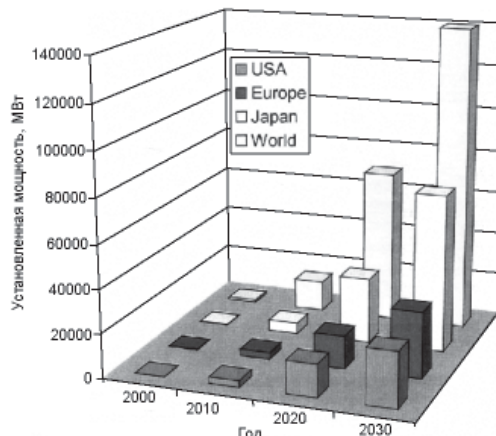
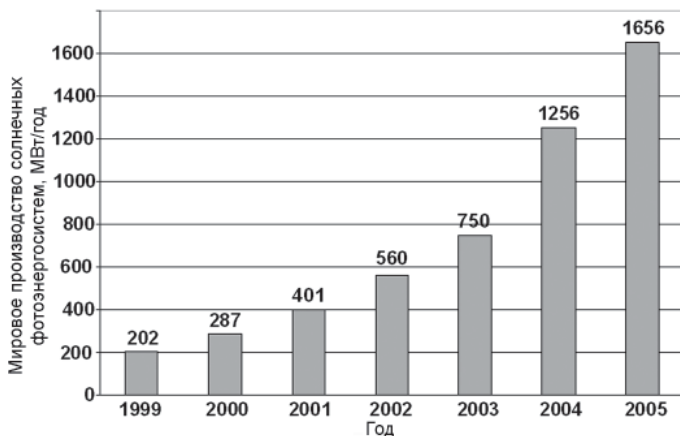


Рис. 1. Мировое производство фотоэнергосистем до 2005 г. и прогноз развития фотоэнергетики до 140 ГВт в 2030 г.

– увеличивающийся выброс двуокси углерода в атмосферу должен привести к ускоренному развитию экологически чистой солнечной фотоэнергетики для снижения загрязнения среды и глобального потепления;

– солнечное электричество будет доминирующим источником энергии с долей приблизительно 60 % к концу века благодаря практически неисчерпаемому ресурсу энергии — Солнцу.

Кроме этих факторов, касающихся энергетики, имеются и социальные факторы, стимулирующие развитие солнечной фотоэнергетики.

1). Более двух миллиардов людей в мире не имеют доступа к централизованному снабжению электричеством, и большинство из них живет в солнечном поясе Земли. Централизованная система снабжения электроэнергией не выгодна в ряде этих районов и потребовала бы огромных капитальных вложений. Электрическая энергия является ключом для повышения уровня жизни в районах, не имеющих снабжения электричеством, и солнечная энергия могла бы стать доминирующим децентрализованным источником энергии в этих районах благодаря ее практически неограниченному ресурсу.

2). Скрытые социальные затраты на компенсацию вредного воздействия электростанций (болезни, уменьшение продолжительности жизни и др.) распределены на все общество и составляют 50–80 % цен на энергию. Если включить эти затраты прямо в тарифы на топливо и энергию, то фотоэнергетика станет конкурентоспособной уже на данном этапе ее развития.

На саммите в Брюсселе 9 марта 2007 г. лидеры стран ЕС договорились о значительном увеличении объемов использования альтернативных источников энергии (таких как солнце и ветер) в рамках борьбы с глобальным потеплением. К 2020 г. в Евросоюзе эти альтернативные источники должны будут производить 20 % всего объема электроэнергии. Решение обязательно для каждой из 27 стран ЕС. Лидеры ЕС договорились и о мерах по сокращению выбросов газов, создающих так называемый «парниковый эффект». К 2020 г. выброс газов планируется сократить на 20 % по сравнению с 1990 г.

Для России широкое использование фотоэнергетики имеет не меньшее значение.

В настоящее время более 10 млн. граждан России живут без централизованного электрообеспечения. Создание для этих граждан необходимых цивилизованных условий является важнейшей государственной задачей. Одно из оптимальных решений — использование фотоэнергетики. Даже если для 1 млн. граждан будет использована фотоэнергетика (2 кВт·ч/сутки на каждого гражданина), необходимо будет установить более 500 МВт пиковой мощности фотоэнергосистем.

Вторым огромным российским потенциальным потребителем фотоэнергетики является сельскохозяйственный сектор, который самостоя-

тельно способен потреблять сотни мегаватт пиковой энергии фотоэнергосистем в год. Если к этому добавить уже естественно нарождающийся рынок автономных фотоэнергосистем для навигационного обеспечения, систем телекоммуникаций, систем для курортно-оздоровительного и туристического бизнеса, коттеджей, уличных солнечных фонарей и т. д., то суммарно потребности в России в солнечных батареях могут составить более 1 ГВт/год.

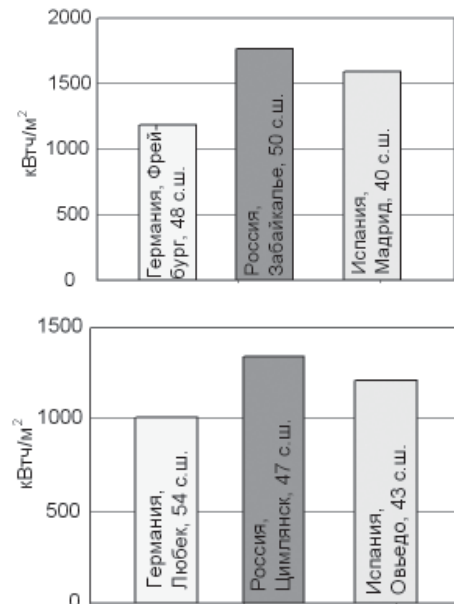


Рис. 2. Годовое поступление солнечной энергии в России, Германии, Испании

При этом необходимо учитывать, что среднегодовые поступления солнечного излучения во многих южных районах России больше, чем в Германии, Италии и Испании.

Отечественные исследования и разработки в области кремниевых солнечных батарей проводятся с момента создания в 1958 г. солнечной батареи для КА «Спутник-3». За прошедшие 50 лет накоплен большой опыт в области создания как космических (ФГУП НПП «Квант», ОАО «Сатурн»), так и наземных батарей. На базе российских предприятий: НПФ «Кварк», «Солнечный ветер» (г. Краснодар), ФГУП НПП «Квант» и «Телеком-СТВ» в РФ создан и развивается мощный производитель высокоэффективных наземных солнечных батарей, не уступающих по качеству ведущим мировым фирмам, с запланированным на 2007 г. объемом производства более 15 МВт.

Несмотря на положительные тенденции развития фотоэнергетики, имеется существенный сдерживающий фактор — высокая стоимость фотоэнергосистем, обусловленная как дороговизной основного материала — кремния, так и дороговизной технологического процесса. Увеличивающаяся потребность в исходном кремнии приводит сегодня к большим трудностям в наращивании объемов выпуска кремниевых сол-

нечных батарей и снижении их стоимости. При этом эффективность кремниевых солнечных батарей составляет около 14 % при незначительном потенциале роста.

Основными направлениями работ, которые должны обеспечить снижение стоимости батарей, являются:

- снижение стоимости исходного кремния;
- совершенствование технологического процесса изготовления фотопреобразователей;
- создание нового технологического оборудования и новых технических решений;
- увеличение объема производства фотоэнергосистем, что обеспечивает снижение издержек производства.

Другой перспективный путь снижения стоимости «солнечной» электроэнергии: использование нанотехнологий для создания фотоэнергосистем с концентраторами солнечного излучения.

### Перспективы нанотехнологий в фотоэнергетике

Высокоэффективные гетероструктурные элементы, широко используемые в космических солнечных батареях, перспективны и для наземных энергосистем, если они используются в системах с концентрированием солнечной энергии, которое может осуществляться, например, с помощью дешевых линз Френеля с коэффициентом концентрации до 1000 крат. Солнечное излучение, падающее, например, на поверхность 40×40 мм, концентрируется на площади менее 3 мм<sup>2</sup>. Элементы при этом не нагреваются из-за малой единичной мощности (~1 Вт) солнечного излучения, собираемого такими мини-линзами.

В таких концентраторных фотоэлектрических системах стоимость электроэнергии может быть уменьшена более чем в 2 раза благодаря снижению в 1000 раз площади солнечных элементов. При этом удельный энергосъем в концентраторных фотоэнергосистемах может быть увеличен в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения постоянной точной ориентации на Солнце.

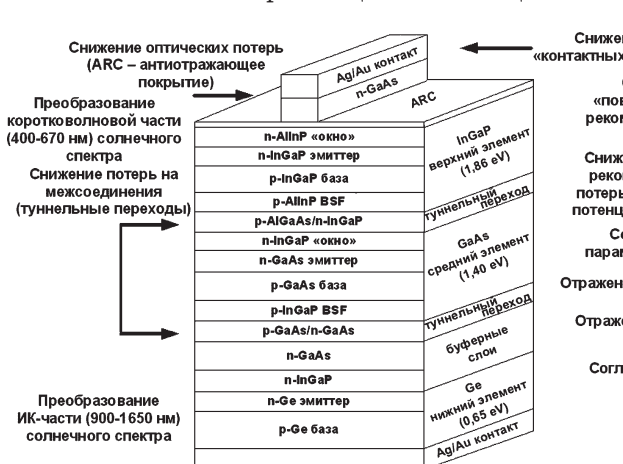


Рис. 3. Гетероструктурный каскадный солнечный фотопреобразователь, обеспечивающий КПД > 35 % при концентрации 1000 «солнц»

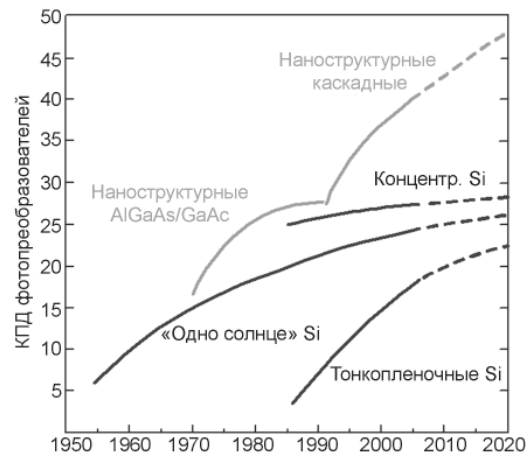


Рис. 4. Динамика увеличения КПД фотопреобразователей на основе кремния и наноструктур

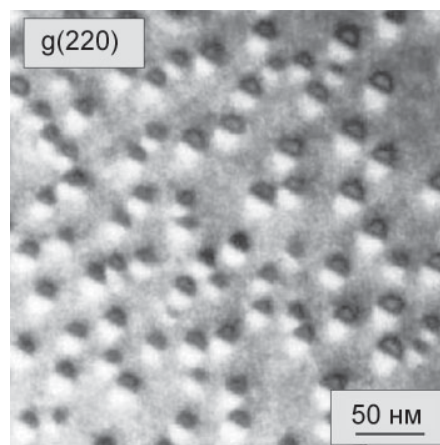


Рис. 5. Система квантовых точек InAs, выращенных на GaAs (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) для фотопреобразователей с «промежуточными зонами» с теоретическим значением КПД до 60 %

В представленной на рисунке наноструктуре трехкаскадного фотопреобразователя (ФЭП) осуществляется «расщепление» солнечного излучения на три спектральных участка, для каждого из которых подобран оптимальный полупроводник (Ge, GaAs, GaInP) для эффективного преобразования излучения.

Гетероструктурные фотопреобразователи имеют большие перспективы как для наземной, так и для космической энергетики. Повышение требований к бортовым системам космических аппаратов (КА) приводит к необходимости создания солнечных батарей (СБ), обладающих более высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками с увеличенным ресурсом работы. Наиболее перспективным путем решения этих задач является разработка гетероструктурных ФЭП из арсенида галлия и родственных ему соединений, впервые созданных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в 1969 г. За последние три десятилетия



тилетия накоплен большой отечественный и зарубежный опыт эксплуатации космических солнечных батарей на основе AlGaAs/GaAs, AlGaInP/GaAs и других наногетероструктур. Показано, что эти СБ обеспечивают увеличение КПД, удельного энергосъема и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями.

Несмотря на большую стоимость гетероструктурных космических батарей по сравнению с кремниевыми, использование данных СБ обеспечивает приблизительно 2-кратное снижение суммарных затрат, благодаря увеличению в 2 раза удельного энергосъема, уменьшению размеров СБ, увеличению ресурса и снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту, ориентацию и стабилизацию КА.

Гетероструктурным солнечным фотопреобразователям уделяется все большее внимание в наземных и космических программах США, Японии и стран Западной Европы. Так, на фирмах «Spectrolab» и EMCORE, являющихся в США основными производителями СБ, основная часть батарей оснащается каскадными элементами на основе наноструктуры Ge/GaAs/GaInP/AlInP, что обеспечивает производство солнечных батарей с удельным энергосъемом более 270 Вт/м<sup>2</sup>. Крупномасштабное производство наноструктурных космических СБ в России чрезвычайно важно для обеспечения программ космических исследований и обороноспособности страны, для развития систем космической связи, информационных и информационно-управляющих систем.

Значительное внимание в мире уделяется также и разработкам наземных концентраторных солнечных энергосистем на основе гетероструктурных ФЭП. Ряд фирм, «Isofoton» (Испания), «Amonix» (США), «Concentrix» (Германия), объявили об организации промышленного выпуска таких систем, которые должны обеспечить существенное снижение стоимости «солнечного» электричества.

#### Российский научно-технический потенциал по нанотехнологиям в фотоэнергетике

ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе является одним из ведущих научных центров по развитию нано-

технологий для создания сложных многослойных структур для различных приборов полупроводниковой электроники. В ФТИ впервые в мире была разработана технология гетероструктурных фотопреобразователей. За последние 15 лет в ФТИ накоплен значительный опыт по созданию наноструктурных каскадных солнечных элементов. В ФТИ имеется современное ротовое оборудование металлоорганической и молекулярно-пучковой эпитаксии для получения каскадных ФЭП. Разработаны и созданы фотопреобразователи на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур, сохраняющие высокую эффективность преобразования при сверхвысоких (до 5000 крат) концентрациях солнечного излучения. Разработаны и созданы каскадные солнечные элементы с КПД 30–35 % при концентрированном солнечном облучении.

Созданы прототипы солнечных энергоустановок с концентраторами излучения. Долговременные испытания позволяют прогнозировать более чем 20-летний срок службы таких установок.

ФГУП НПП «Квант» является одним из основных производителей космических солнечных батарей, в том числе на основе гетероструктур. Впервые в мире при участии ФТИ было организовано производство космических солнечных батарей на основе AlGaAs–GaAs гетероструктур, установленных на многих космических аппаратах. В 1986 г. гетероструктурная солнечная батарея площадью 70 м<sup>2</sup> была установлена на базовом модуле МКС «Мир» и отслужила весь срок эксплуатации МКС без существенного снижения параметров. В настоящее время подготавливается производство солнечных батарей на основе каскадных ФЭП.

ОАО «Сатурн» обеспечивает производство значительного объема космических солнечных батарей и в настоящее время завершил подготовку производственного комплекса, на котором планируется организация выпуска гетероструктурных каскадных солнечных батарей космического и наземного применения.

В ИФП СО РАН в направлении полупроводникового материаловедения и молекулярной

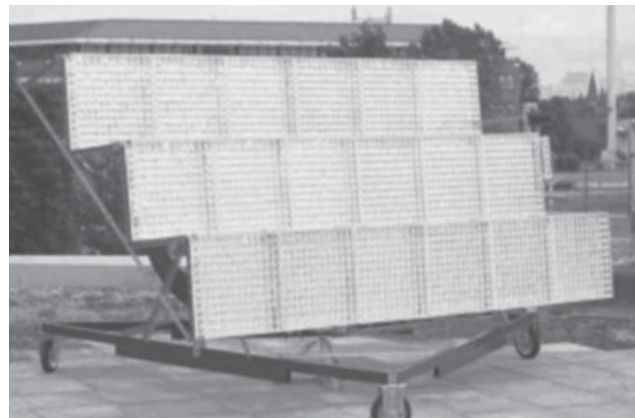
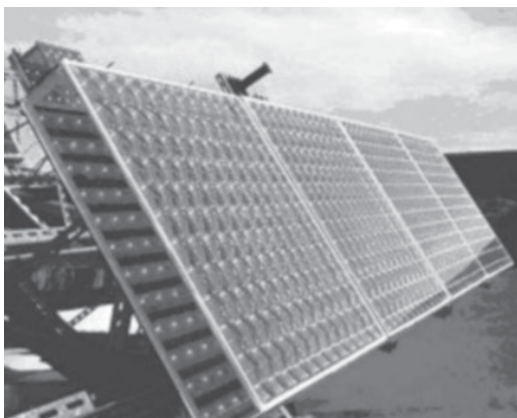


Рис. 6. Концентраторные фотоэлектрические установки на основе наногетероструктурных фотопреобразователей (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

эпитаксии работает более ста сотрудников. Институтом пройдены стадии исследования процессов роста и разработки технологии полупроводниковых наноструктур, эскизного проектирования основных элементов технологического оборудования, стадии ОКР и постановки производства установок для МЛЭ трех поколений («Селенга», «Ангара» и «Катунь»).

#### **Основные направления работ по нанотехнологиям в фотоэнергетике**

- Нанотехнологии, включая газофазную и молекулярно-пучковую эпитаксии, для фотоэлектрических преобразователей.
- Физические принципы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в наноструктурах, в том числе в структурах со сверхрешетками и квантовыми точками, включая фотоэлектрические явления при концентрированном солнечном излучении.
- Исследования путей повышения эффективности (КПД более 45 %) наземных и космических солнечных батарей.
- Улучшение радиационной стойкости фотопреобразователей на основе наногетероструктур для повышения срока активного существования космических фотоэнергосистем.
- Разработка принципов эпитаксиальных технологий наногетероструктур в вакуумных средах, имитирующих условия открытого космоса, для создания солнечных батарей непосредственно в условиях космоса.
- Разработка промышленной газофазной и молекулярно-пучковой технологии создания гетероструктурных фотопреобразователей с КПД > 35 % для космического солнечного излучения и более 40 % — на Земле.

▪ Организация крупномасштабного производства солнечных батарей на основе гетероструктур. Снижение стоимости «солнечной» электроэнергии на Земле до 1 \$/Вт.

Производство наземных концентраторных фотоэнергосистем позволит в сотни раз уменьшить потребность в полупроводниковых материалах. Один грамм полупроводника, работающего 25 лет в концентраторной фотоэнергосистеме, эквивалентен, по получаемой электроэнергии ~5 т нефти. Себестоимость 1 Вт установленной мощности концентраторных энергоустановок составит <\$2, т. е. будет снижена приблизительно в 2 раза по сравнению с существующим мировым уровнем.

С использованием разработанных технологий и разработанных прототипов солнечных фотоэнергоустановок возможна организация в РФ крупномасштабного производства наземных концентраторных фотоэнергосистем. При годовом объеме выпуска более 200 МВт стоимость продукции на мировом рынке составит до \$1 млрд. при себестоимости менее \$400 млн. При дальнейшем наращивании выпуска энергоустановок на их основе возможно создание мощных

экологически чистых фотоэлектрических станций, которые могут внести существенный вклад в энергетику страны. Использование таких энергоустановок в районах без централизованного электроснабжения (степи, пустыни и горы) позволит сделать эти места пригодными для цивилизованной жизни человека.

Не следует противопоставлять обычные и концентраторные фотоэнергосистемы при оценке перспектив развития фотоэнергетики. И те, и другие должны использоваться в будущих системах электроснабжения. По-видимому, обычные модули с фотоэлементами из кремния составят основу децентрализованной системы выработки электроэнергии. Принадлежащие широкому кругу лиц, устанавливаемые на крышах и стенах домов и сооружений, объединенные в сеть, они будут олицетворять собой «демократические принципы» новой энергетики в сравнении с «диктатурой» энергетических гигантов, имеющей место в настоящее время. Однако для покрытия энергетических потребностей энергоемких производств, муниципальных сообществ и т.д. будет необходимо создание достаточно крупных солнечных станций, обеспечивающих минимальную стоимость вырабатываемой электроэнергии. Применение концентраторных фотоэлектрических батарей при создании таких станций выглядит вполне естественным решением.

Солнечная фотоэнергетика рождается не на пустом месте. Во многом за счет развития электроники, лазерной техники и электроэнергетики для космических аппаратов создана научно-технологическая база, которая может послужить отправной точкой для развертывания наземной фотоэнергетики на основе полупроводников. Наступает время, когда следует переходить к более широкому инвестированию средств в эту область.

#### **Необходимость законодательной поддержки развития фотоэнергетики в России**

Следующие факты определяют необходимость законодательной поддержки фотоэнергетики в РФ:

– существенная часть стоимости электроэнергии от ТЭЦ не включена в тарифы, а распределена на затраты всего общества и будущих поколений, которые будут лишены ископаемых ресурсов. Вследствие этого необходимо признать прямое и косвенное государственное субсидирование традиционной энергетики, загрязняющей окружающую среду;

– дополнительный экологический налог должен быть включен в стоимость энергии для создания фонда развития новой экологически чистой энергетики;

– фотоэнергетика обеспечивает монополизацию и децентрализацию рынка энергетики, т. е. эффективную конкуренцию и поддержку независимых производителей энергии;

– фотоэнергетика экономически рентабельна уже сейчас для ряда применений:

1) для обеспечения электроэнергией автономных потребителей;

2) для низковольтного электрообеспечения (дежурное освещение, датчики, сенсоры и др.);  
– развитие фотоэнергетики соответствует большинству высших приоритетов в утвержденной в 2003 г. «Энергетической стратегии России до 2020 г.»:

1) снижение вредного влияния ТЭК на окружающую среду;

2) комплексное использование местных топливно-энергетических источников;

3) создание экологически чистой энергетики;

4) снижение эмиссии вредных веществ в атмосферу на 30–40 % к 2010 г.

– Россия имеет достаточный научный и технический потенциал для развития фотоэнергетики на основе кремния и наногетероструктур;

– отсутствие законодательной поддержки навсегда закроет для России этот высокорентабельный сектор энергетики.

Закон РФ по фотоэнергетике должен включать:

– поддержку фундаментальных и прикладных исследований, направленных на снижение стоимости «солнечной» электроэнергии;

– льготы на создание сырьевой базы — крупномасштабного производства кремния «солнечного» качества и материалов для нанотехнологий;

– льготы на создание производственной базы и оборудования для крупномасштабного производства солнечных батарей;

– льготы «производителям» и потребителям солнечной электроэнергии, улучшающей экологию и обеспечивающей уже сейчас улучшение энергообеспечения и качества жизни автономных потребителей, а в будущем — энергетическую безопасность страны.

## ПЕТР ЩЕЛИЦ: МЫ ЖЕ БЫЛИ ПЕРВЫМИ В МИРЕ, КТО ИСПОЛЬЗОВАЛ В ОСВОЕНИИ КОСМОСА ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Президент Национальной ассоциации водородной энергетики, депутат Госдумы Петр Щелиц рассказал о том, в каких сферах и как будет осуществляться переход на использование водорода в качестве топлива.

Перспективы водородной энергетики в России обсудили ученые и предприниматели. Одно из их предложений — сделать водородную энергетику инновационным приоритетом страны до 2050 года.

Корреспондент СИТИ-ФМ Руслан Раджабов обратился к президенту национальной ассоциации водородной энергетики, депутату Госдумы Петру Щелицу.

— Что это будет за заправка и как на законодательном уровне планируется перевести водителей на водородные двигатели?

— Сейчас прорабатывается такой проект, но надо иметь в виду, что в мире уже сегодня более 100 водородных заправок, а у нас в стране пока ни одной. Если все пойдет удачно, то в Москве на базе Южной ТЭЦ, крупнейшей в Европе, появится первая такая заправка. Дело в том, что на этой ТЭЦ, как и на других, есть достаточно мощные электролизные производства, ибо ТЭЦ используют электролизный водород для охлаждения генераторов. Мы хотим модернизировать электролизное хозяйство ТЭЦ, производительность его станет существенно выше собственных потребностей, и мы рассчитываем, что сможем использовать избыток производимого водорода, как для заправки бензоводородных и водородных автомобилей, так и для обеспечения водородом электрохимических генераторов, которым принадлежит будущее в обеспечении электроэнергией и теплом локальных коммунальных объектов, коттеджей.

— Основная цель встречи — помочь идеям ученых обрести некое реальное финансирование? Как предприниматели отреагировали на такие перспективы? Готовы ли они вкладывать деньги в эти технологии?

— На этой пресс-конференции состоялась презентация книги Бориса Николаевича Кузика и Юрия Владимировича Яковца, посвященной стратегии перехода к водородной энергетике. Бизнес в этой встрече не участвовал, но был представлен одним из крупнейших участников этого рынка — дочерней компанией «Норильского никеля» — «Новые энергетические проекты». И сегодня, помимо «Норникеля», с большим интересом включаются в это направление крупнейшие военно-промышленные компании России, у которых есть определенный задел и опыт. Мы же были первыми в мире, кто использовал в освоении космоса водородные технологии. Задел большой, но он естественным образом теряет свое значение, поскольку другие страны работают очень активно, и нам нельзя здесь отставать.

Источник: <http://city-fm.ru/news>