

температуры на более чем 10 С (для светодиодов повышенной мощности). И, при условии дальнейшего использования для процессов культивирования микроорганизмов подобного типа светодиодов следует учитывать возможное повышение температуры, а также требуется предусматривать мероприятия по отводу тепла. Так, например, можно использовать мало-мощные системы охлаждения, типа небольших вентиляторов, кулеров. Но в данном случае необходимо оставлять некоторый зазор между источником света и культиватором, что будет приводить к снижению фактической светоотдачи осветительных приборов. Наиболее энерго-эффективным методом снижения тепловыделения является применение импульсного освещения, при котором можно располагать культиваторы непосредственно у источников света.

#### Литература

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга 3-е изд. Перераб. и доп. М.: Знак, 2006. - 972 с.
2. Беликов П.С., Дмитриева Г.А. Физиология растений: Учеб. Пособие. - М.: Изд-во РУДН, 1992. - 248 с.
3. Белякова Г.А. и др. Ботаника: в 4 т. Т.2. Водоросли и грибы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.: Издательский центр "Академия", 2006. - 320 с.
4. Бирюков В.В. Основы промышленной биотехнологии. М.: КолосС, 2004. - 296 с.
5. Мальцевская Н.В. Бирюков В.В. Применение импульсных светодиодных источников света для снижения энергозатрат при культивировании фотосинтезирующих микроорганизмов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 11. – с. 9.
6. Ничипорович А.А., Семененко В.Е., Владимирова. Интенсификация фотосинтетической продуктивности культуры одноклеточных водорослей // Известия академии наук СССР, серия биологическая, 163-172, 1962.
7. Шуберт Ф. Светодиоды. Пер. с англ. Под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.
8. Graham, Linda E. Algae/ Linda E. Graham, Lee Warren Wilcox //Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, 2000.
9. Morais M. G., Vieira Costa J. A.. Carbon dioxide fixation by *Chorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. Cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnol Lett* (2007) 29: 1349-1352.
10. LED-Belichting wordt beter, maar we weten (nog) niet alles. URL: <http://digimagazine.ouderglas.nl/2009/9/magazine.html>
11. Yoshimura S. et al. Effective utilization of transmitted light for astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis* // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. Vol. 2, № 2, 97-101. 2006.

#### **О направлениях развития фотоэлектрических технологий с учетом ресурсных ограничений**

к.т.н. доц. Тюхов И.И.

Университет машиностроения  
8 499 267 1017, [ityukhov@mail.ru](mailto:ityukhov@mail.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрены ресурсные ограничения, возникающие при интенсивном развитии возобновляемой энергетики и, в частности, на основе солнечной фотоэлектрической генерации. Показана перспективность фотоэлектрических установок на основе кремниевых солнечных элементов с вертикальными р-п переходами.

*Ключевые слова:* ресурсные ограничения, возобновляемая энергетика, фотоэлектричество, солнечные элементы, кремниевые технологии.

## Введение

В последние годы все острее встает вопрос о ресурсных и экологических ограничениях развития традиционной мировой энергетики. Первичные энергетические ресурсы становятся все более труднодоступными и высоко затратными. Увеличение скорости потребления энергетических ресурсов, неизбежное при повышении численности населения Земли, ведет к возрастающему темпу сокращения потенциальных запасов доступных энергетических ресурсов. Именно поэтому в современной энергетике возобновляемые источники вносят все больший вклад в энергетический баланс. Однако в последние два года в мировой литературе появились статьи, посвященные материальным ресурсам возобновляемой энергетики и, в частности, их ограничениям при интенсивном развитии солнечной энергетики.

С этой точки зрения необходим анализ возможных ограничений и возможных путей их преодоления. Хорошо известно, что солнечная энергия является самым глобальным источником энергии для человечества [1, 2]. Публикации по проблемам ресурсных ограничений рассматривают широкий спектр технологий. Так, в [3-5] рассматриваются вопросы влияния масштабного производства биотоплива на производство сельскохозяйственного производства продуктов питания. В [6] приводится анализ ресурсных ограничений возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с точки зрения использования водородных технологий. Подробный экономический анализ возможных ограничений с учетом тенденций в традиционной и нетрадиционной энергетике для развития электрического транспорта приводится в [7]. Ограничения по использованию различных материалов при широкомасштабном росте солнечных концентраторных технологий с термодинамическим циклом приводится в [8].

Остановимся подробнее на солнечных фотоэлектрических технологиях, ежегодный прирост которых за последние 10 лет составил 30 – 40%.

Прежде всего, необходимо отметить колоссальный прогресс в задаче повышения КПД солнечных элементов (СЭ) различных типов, изготовленных по различным технологиям из самых разных материалов (рисунок 1, NationalRenewableEnergyLaboratory, USA, 2010).

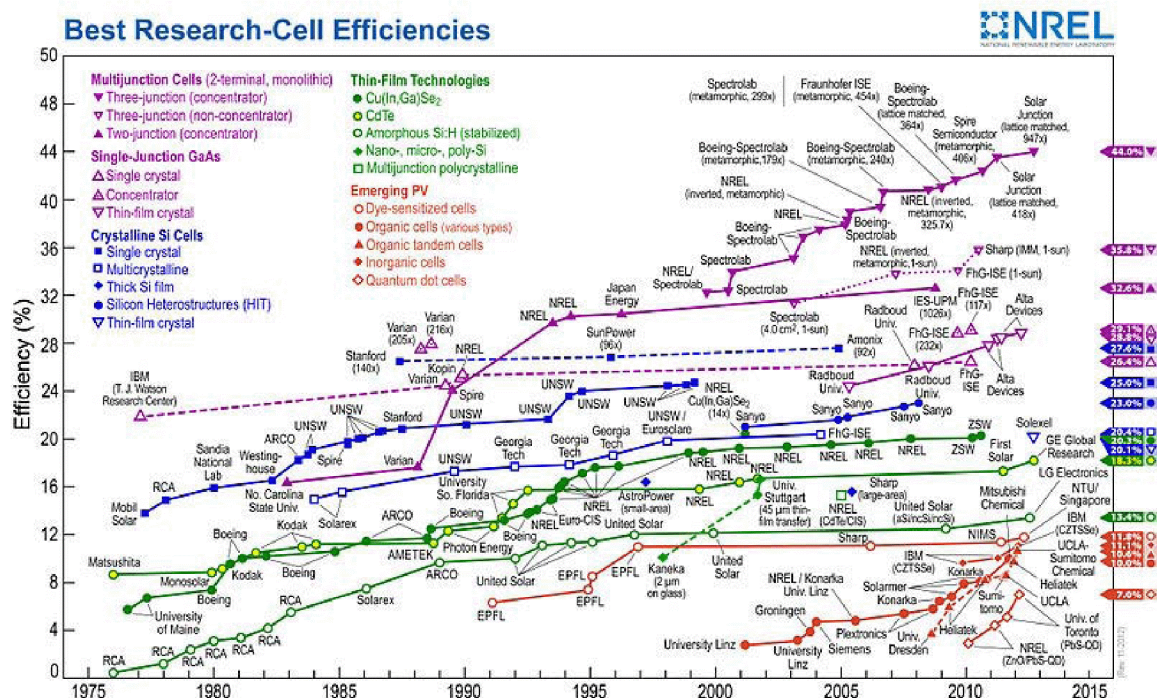


Рисунок 1 – Прогресс в росте КПД солнечных элементов различных типов

Кажется очевидным, что основные усилия и финансовые средства должны вкладываться в СЭ с наивысшим КПД. Действительно, огромные финансовые вливания в концентра-

торные технологии, в частности в США, принесли ощутимые результаты: рекордные значения КПД достигли 42%. Однако анализ ресурсных ограничений фотоэлектрической промышленности [9], проведенный с учетом существующих прогнозов, приводит к другим выводам. Заметим, что прогнозы спроса на энергию составляют 28 ТВт к 2050 году и 46 ТВт к 2100 году.

Развертывание технологий солнечного фотоэлектричества в качестве источника электроэнергии будет расширяться в масштабе до десятков тераватт пик установленной мощности для того, чтобы стать заметным источником энергии в будущем. Из нынешних коммерческих и развиваемых технологий СЭ, большинство имеют естественные ограничения ресурсов, которые не позволяют им достичь тераваттных масштабов. Эти ограничения включают высокие затраты энергии для производства кристаллического кремния, ограниченное производство материалов для солнечных элементов на GaAs и нехватку материалов для CdTe, CIGS, сенсibilизированных красителем солнечных элементов, на основе кристаллического кремния и тонкопленочных Si солнечных элементов.

В [9] рассмотрены ограничения по лучшим сценариям развития для тонкопленочных солнечных элементов на основе CdTe, GaAs, CIGS (медь, индий, галлий и селенид), сенсibilизированных красителем солнечных элементов и солнечных элементов на монокристаллическом кремнии. Показано, что без существенных технологических прорывов, эти технологии в сочетании смогут удовлетворить лишь несколько процентов (~2%) нашего спроса на энергию в 2100 году. Так, табл.1 суммирует оценки максимальной пиковой мощности по оптимистичным сценариям для различных технологий использования СЭ, основанных на известных ресурсных базах лимитирующего материала в каждой из технологий. При использовании всех четырех технологий (CdTe, CIGS, сенсibilизированных красителем, и кристаллических на Si), они будут обеспечивать не более 4% от спроса на энергию в 2100 году, однако это оценки по лучшему сценарию; реально эти технологии, вероятно, обеспечат в лучшем случае 1-2% от 2100 спроса на энергоносители.

Таблица 1

**Оценка пиковой мощности по лучшему сценарию для различных технологий солнечных элементов на основе ресурсной базы лимитирующего материала.**

Технология солнечных элементов	КПД(%)	Ограничивающий материал	Материальная база элемента (метрические тонны)	Максимальные пиковые мощности	Усредненный выход(ГВт)	% от потребностей в энергии к 2100
CdTe	10,6	Теллур	48000	816ГВтпик	120–160	0,4
CIGS	11,5	Индий	16000	650ГВтпик	100–130	0,3
Сенсibilизированные красителем	7	Рутений	5000	890ГВтпик	135–180	0,4
Кристаллический-Si	15	Серебро	400000	5,7ТВтпик	860–1150	2,5

Значительные технологические прорывы должны быть достигнуты, чтобы преодолеть некоторые из этих ресурсных ограничений, таких альтернативных технологий, как, например, без использования металлического серебра в качестве передних контактов солнечных элементов на кристаллическом кремнии.

В таблице 2 суммированы оценки по оптимистичным сценариям текущего производства для различных технологий использования солнечных элементов, основанных на известных ресурсных базах лимитирующего материала в каждой из технологий. Если считать, что солнечные батареи имеют 30-летний срок службы, они должны устанавливаться в масштабах



около 500 ГВт/год для того, чтобы достичь 15 ТВт через 30 лет, а затем поддерживать установленные 15 ТВт пик мощности. При нынешних темпах производства многих материалов, большинство из текущих технологий солнечных элементов может производиться только в масштабах несколько гигаваттпик в год. СЭ на основе кристаллического кремния - единственная технология, которая ближе всего к этому показателю ~300 ГВт пик по лучшему сценарию и ~100 ГВт пик по реалистическому. Однако использование кристаллического кремния в солнечных элементах планарного приведет к истощению запаса серебра через 19 лет. Такие же материалы, как GaAs для солнечных батарей необходимо добывать гораздо более высокими темпами для того, чтобы производить эти солнечные элементы с более высокой скоростью.

Таблица 2

**Оценка по лучшему сценарию ежегодного производства для различных технологий СЭ на основе одового производства лимитирующего материала.**

Технология солнечных элементов	КПД(%)	Ограничивающий материал	Годовое производство (метрические тонны)	Годовая пиковая мощность (ГВтпик)	Число лет до истощения
CdTe	10,6	Теллур	135(6)	2,3	355
CIGS	11,5	Галлий	167(6)	26	25
GaAs	28,8	Галлий	167(6)	11	не доступно
Сенсибилизированные красителем	7	Рутений	12(11)	2,2	405
Кристаллический Si	15	Серебро	21400(6)	305	19



**Рисунок 2 – Концентраторные установки на основе СЭ с вертикальными р-п переходами (слева Россия, В. Симакин, И. Тюхов и др., работы на стадии НИР, 2007-2009,слева США, В. Sateri др. работы на стадии ОКР, 2011)**

Несмотря на многочисленные попытки создания СЭ из новых материалов или с использованием принципиально новых физических принципов, на фотоэлектрическом рынке все еще доминируют СЭ на основе монокристаллических кремниевых пластин (СЭ первого поколения) [10]. Концепция СЭ с вертикальными р-п переходами, впервые разработанная в России (Стребков Д.С. и др.) и параллельно разрабатываемая в США (В. Sater), в частности, с использованием алюминия в качестве материала, соединяющего полупроводниковые структуры в единое целое [11], позволяет обойти ресурсное ограничение, связанное с приме-

нением серебряных контактов [9]. Использование таких СЭ в концентраторных установках снижает потребности в относительно дорогих кремниевых СЭ, а дополнительное тепло, получаемое при охлаждении СЭ, позволяет получить больший суммарный КПД [12-15] (рисунок 1) по сравнению с лучшими, концентраторными СЭ. К тому же, использование кремниевых технологий не требует существенной переделки существующего технологического оборудования – дополнительно требуются лишь установки для спекания (сращивания) кремниевых пластин. Выполненные по этому направлению НИР (ФГУП ВЭИ) [13] (рисунок 2, справа), а в США НИР и ОКР (GreenFieldSolar) [16] (рисунок 2, слева), подтвердили правильность описанного подхода. Установка, разработанная во ФГУП ВЭИ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», передана в Университет машиностроения на кафедру ЮНЕСКО «Техника экологически чистых производств» для организации дальнейшего использования в учебно-исследовательских проектах. С точки зрения дальнейшего развития этого направления важно подчеркнуть, что технология базируется на кремнии, в течение длительного времени занимающем лидирующее положение и являющимся базовым сырьевым материалом электронной и электротехнической промышленности для производства широкого спектра полупроводниковых приборов, и, что особенно важно, не попадает под ресурсные ограничения в рассматриваемый период (до 2100 г.).

#### Выводы

Ресурсные ограничения, возникающие с ростом традиционных и интенсивно разрабатываемых ВИЭ, требуют дальнейших подробных исследований. Например, существуют опасения, что из-за производства биотоплива цены на продукты будут расти и при этом еды на всех жителей Земли все равно может не хватить. Все это требует подробного экономического анализа; при этом выбор перспективных технологий должен осуществляться с учетом оценки существующих материальных ресурсов. Технологии, которые не попадают под ресурсные ограничения и перспективны с точки зрения массового производства, должны поддерживаться не только в рамках НИР, но и ОКР.

Результаты разработок, проведенных в России и США, показывают высокий потенциал использования комбинированных концентраторных систем на основе кремниевых СЭ с вертикальными р-п переходами, обладающими высокой суммарной эффективностью (по генерации электричества и тепла) и в минимальной степени подверженными ресурсным ограничениям.

#### Литература

1. Denholm P. et al. Solar Energy: The Largest Energy Resource, in the book: *Generating Electricity in a Carbon-Constrained World*, 2010, Chapter 10, p. 271-302.
2. Myers D.R. Solar Radiation Resource Assessment for Renewable Energy Conversion *Comprehensive Renewable Energy*, Volume 1, 2012, p. 213-237.
3. Huang J. et al. Biofuels and the poor: Global impact pathways of biofuels on agricultural markets *Food Policy*, Volume 37, Issue 4, August 2012, p. 439-451.
4. Lihong Lu McPhail, Bruce A. Babcock Impact of US biofuel policy on US corn and gasoline price variability *Energy*, Volume 37, Issue 1, January 2012, p. 505-513.
5. Kristoufek L., Janda K., Zilberman D. Correlations between biofuels and related commodities before and during the food crisis: A taxonomy perspective *Energy Economics*, Volume 34, Issue 5, September 2012, p. 1380-1391.
6. Kleijn R., Voet E. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 9, 2010, p. 2784-2795.
7. Mediavilla M., Capellán C.I., Miguel L. J., Arto I., Frechoso F. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions, *Energy Policy*, In Press, Corrected Proof, Available online 10 November 2012.
8. Pihl E., Kushnir D., Sandén B., Johnsson F. Material constraints for concentrating solar thermal

- power. Energy, Volume 44, Issue 1, 2012, p. 944-954.
9. Tao C. S., Jiang J., Tao M. Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells v. 95, № 12, 2011, p. 3176-3180.
  10. Тюхов И. И. Преобразование солнечной энергии в наноструктурированных интерфейсах. - Вкн.: Нанонаука и нанотехнологии. Энциклопедия систем жизнеобеспечения. (Ред. В.Н. Харькин, Чуныли Бай, Осама О. Аваделькарим, С. П. Капица). - М.: Издательский Дом МАГИСТР-ПРЕСС, 2009. стр. 521-540.
  11. Тюхов И.И. Солнечные элементы с различной топологией. Возобновляемые источники энергии. Лекции ведущих специалистов, прочитанные на V Всероссийской научной молодежной школе «Возобновляемые источники энергии», вып.4, под общей редакцией А. А. Соловьева. - М., Книжный дом университет, 2006, с. 97-120.
  12. Simakin V., Tyukhov I., Murashev V., Poulek V. Concept of combined PV/T system based on concentrator with vertical p-n junctions solar cells. In Proceedings 3rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain, 795-798.
  13. Симакин В.В., Смирнов А. В. Тюхов И. И. Солнечная энергетическая установка для одновременного получения электричества и тепла Электротехника №3, 2010, с. 38-42.
  14. Tyukhov I., Simakin V. "Some Russia CPV Projects and New Tendencies" 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-7), Poster presentation, Las-Vegas, 3-6 Apr. 2011.
  15. Tyukhov I., Simakin V., Berengarten M., Miitna I. From Autonomous Combined Energy Systems to Smart Grids, From Research to Education, ISES Solar World Congress, August 28 - September 2, 2011, Kassel, Germany, Proceedings, p. 194-200.
  16. <http://greenfieldsolar.com/> Сайт компании GreenField Solar (14 ноября 2012).

**Исследование равновесной скорости звука парожидкостной среды с зернистым слоем с учетом теплофизических свойств засыпки**

чл.-корр. РАН Покусаев Б.Г., д.т.н. Таиров Э.А., к.ф.-м.н. Таирова Е.В., к.т.н. Некрасов Д.А.,  
Васильев С.А.

*Университет машиностроения, ИСЭ им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
8(499) 267-07-59, nekrasov55@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе на основе выполненных экспериментальных исследований учет влияния теплообмена с зернистой насадкой и скольжения фаз в парожидкостной смеси позволил установить особенности равновесной скорости звука в трехфазной системе «пар-жидкость-твердые частицы». Построенная теоретическая модель равновесной скорости при неадиабатных условиях нашла экспериментальное подтверждение. Приведены результаты аналитического решения задачи периодического теплового воздействия на элементы зернистого слоя.

*Ключевые слова:* парожидкостной поток, гидродинамика и теплообмен, зернистые и пористые среды.

Проблема скорости звука в многофазных средах (газ-жидкость) хорошо известна [1-5]. В отличие от газожидкостных смесей, в частности воздушно-водяной, где прохождение звуковой волны совершается при постоянстве массового паросодержания  $\chi$ , в пароводяной смеси при наличии тепломассообмена между фазами величина  $\chi$  может изменяться, увеличивая тем самым сжимаемость смеси. Вместе с тем, результаты экспериментальных работ [3-6] показывают ничтожное влияние теплообмена на скорость звука в парожидкостных средах. Соответствующая условиям «замораживания» фазовых переходов в смеси скорость звука получила название термодинамически «замороженной»  $a_0$ .

Новые результаты получены в экспериментах [7, 8], посвященных исследованию рас-