



ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДОРОДА КАК НОСИТЕЛЯ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ¹

Д.О'М. Бокрис^{1}, Т.Н. Везироглу²*

¹Хейл Плантейшн 10515 S. В. 55 плейс, Гейнсвилл, Флорида 32608, США
тел.: +1(352)335-38-43; факс: +1(352)335-69-25; e-mail: jbockris@cox.net

²Исследовательский институт чистой энергии, Университет Майями

²Институт чистой энергии, Университет Майями
1251 Мемориал Драйв, 219 корпус МакАртура, п/я 2048290,
Корал Гейблс, Флорида 33124, США
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.034-042

Заключение совета рецензентов: 15.08.17 Заключение совета экспертов: 21.09.17 Принято к публикации: 12.10.17

Отказ от водорода как носителя ветровой и солнечной энергии в качестве решения проблемы глобального потепления был сделан тогда, когда бензин еще стоил 1 доллар за галлон.

Стоимость водорода, полученного за счёт энергии ветра (путем электролиза воды и пара) и дающего энергию, эквивалентную энергии галлона бензина («эквивалент»), сейчас составляла бы менее 3 долларов США. А стоимость водорода, полученного за счёт солнечной энергии, снизилась бы с \$8 до \$5 за эквивалент, поскольку эффективность солнечной батареи сейчас увеличилась до 20 %². В настоящее время цены на солнечную тепловую энергию в два раза ниже цен на фотоэлектрическую солнечную энергию (солнечные батареи).

Используется прогноз максимального объема добычи нефти в мире [Прогноз добычи нефти Лахерра, 1950–2150 гг. Перепечатано с разрешения при переписке с Уильямом Хорватом, Министерство энергетики США, 29 марта 2001] на 2010 г.

В перспективе источники энергии будут вырабатывать неисчерпаемую энергию из ветра, солнечного излучения, геотермальных вод, приливов и волн. Распространёнными носителями энергии будут водород и электричество, стоимость которых примерно в два раза ниже атомной энергии.

Выращивание зерновых культур для производства алкоголя предполагает энергозатратные процессы и, в том числе, тепловые процессы ректификации. Это³ может увеличить парниковый эффект.

Ключевые слова: водород; ветер; нефть; солнечная энергия; ядерный; зерно.

¹Бокрис Д.О'М., Везироглу Т.Н. Оценка стоимости водорода как носителя ветровой и солнечной энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):34-42.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy (IJHE), 2007;32:1605–1610. ©2007 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.ijhydene.2007.04.037

² Оценки расчетной стоимости, указанные здесь, включают 25 % прибыли и стоимость транспортировки H₂ на 1 000 миль. Если не указано иное, то цены указаны по курсу доллара 2006 г.

³ Выращивание растений для производства спирта происходит за счёт солнечного света и углекислого газа и включает стадию нагревания, для чего многие производители используют ископаемое топливо, что приводит к выбросам CO₂. Однако в этой статье указывается, что для получения тепла можно использовать избыток биотоплива первой стадии, и процесс выращивания будет осуществляться на CO₂ и свете, т.е. без образования CO₂ при сжигании.

ESTIMATES OF THE PRICE OF HYDROGEN AS A MEDIUM FOR WIND AND SOLAR SOURCES

John O'M. Bockris^{1*}, T. Nejat Veziroglu²

¹Haile Plantation, 10515 S. W. 55th Place, Gainesville, FL 32608, USA

*tel.: +1 352 335 3843; fax: +1 352 335 6925; e-mail: jbockris@cox.net

²Clean Energy Research Institute, University of Miami, 1251 Memorial Drive,
219 MacArthur Engineering Building, P.O. Box 2048290, Coral Gables, FL 33124, USA
e-mail: veziroglu@miami.edu

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.034-042

Referred 15 August 2017 Received in revised form 21 September 2017 Accepted 12 October 2017

The rejection of hydrogen as a solution to global warming by becoming the medium of wind and solar was made when gasoline was priced at \$1/gallon. From wind, H₂ would now cost (by electrolysis of water and steam) less than \$3 for an amount equivalent in energy to that in a gallon of gasoline ("equivalent"). From solar photovoltaics (pv), H₂ would be sinking in price between \$8 toward \$5 equivalent as the efficiency of solar pv increases toward 20%. Solar thermal's present prices offer about one-half the solar pv prices. Prediction of the maximum of the delivery rate of world oil is [Laherre's Oil Production Forecast, 1950–2150. Reprinted with permission from correspondence with William Horvath, U.S. Department of Energy, March 29, 2001] 2010. Future energy sources will develop inexhaustible energies from wind, solar, geothermal, tidal, and wave sources. The common media will be hydrogen and electricity. These sources yield energy at around one-half the cost of nuclear fission. Growing corn to make alcohol involves a net loss of energy and need for a heating mechanism. It may increase the Greenhouse.

Keywords: hydrogen; wind; oil; solar; nuclear; corn.



Турхан Н. Везироглу
T.N. Veziroglu

Сведения об авторе: д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

Образование: Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

Награды: лауреат нескольких международных наград.

Опыт работы: профессор, заведующий кафедрой технического факультета в университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергии (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.). почетный профессор университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время). Почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).

Область научных интересов: неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

Публикации: более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохранит Землю».

Information about the author: Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, a member of 18 scientific organizations.

Education: the City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, advanced studies in engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

Awards: recipient of several international awards.

Experience: University of Miami, Engineering faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, FL, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).

Research interests: two-phase flow instabilities; interstitial heat transfer; solar energy; global warming; environmental problems; renewable energy sources and hydrogen energy system.

Publications: more than 350, editor of 160 books and proceedings, co-author of the book "Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth".



1. Введение

Наносимый окружающей среде ущерб от использования ископаемых видов топлива был оценен Т.Н. Везироглу и др. в работе [2], а в 2006 г. удельный ущерб составлял около половины розничной цены на бензин в США. При электрохимическом получении водорода планете не наносится вреда, так как генерация электричества происходит без выделения углекислого газа.

Сейчас запасы нефти истощаются. В частности, скважины Саудовской Аравии практически пусты [3]. По данным Министерства энергетики США, пик темпов добычи нефти в мире будет достигнут через 15 лет (2021 г.) [4]. Однако эта оценка не учитывает влияния растущего спроса на энергию со стороны Китая и Индии: при этом ОПЕК прогнозирует, что добыча экспортёров нефти начнет падать в 2010 г. [1]⁴. В связи с этим актуален вопрос о замене нефти новыми источниками энергии. Так, водород теперь можно производить из ветра и других возобновляемых источников энергии по цене \$3 за галлон бензинового эквивалента. Тем не менее необходимо не только исключить выбросы CO₂ системой и значительно снизить её стоимость, но и завершить строительство новой энергетической системы по всей территории США до того, как дефицит нефти начнет ослаблять нашу экономику.

2. Временные затраты на строительство новых заводов и будущие цены на топливо

Как указано в [5], для строительства ядерных реакторов в качестве основного источника энергии на всей территории Соединенных Штатов потребуется примерно пятьдесят лет (1 800 новых реакторов)⁵, а для других возобновляемых источников энергии потребуется по крайней мере половина этого времени – 25 лет. Вероятно, мы могли бы преодолеть это энергетическое отставание (начиная с 2010 г.), используя битуминозные пески. Однако это увеличило бы температуру и повысило уровень моря, и в конечном счете привело бы к затоплению прибрежных городов раньше прогнозируемого срока.

Когда темпы добычи нефти, от которой мы так зависим, достигнут максимального уровня и начнут снижаться на 6 ÷ 10 % в год [6], розничная цена на бензин будет расти.

И наоборот, стоимость чистой энергии из возобновляемых источников (ветровой, приливной, гравитационной, геотермальной и солнечной) не будет, по крайней мере, не должна увеличиваться, так как на эти источники не влияет исчерпание запасов нефти, и их стоимость уже приемлема даже без Федеральной

⁴ Это утверждение, которое согласуется с оценками геологов о запасах нефти, относится к геологическому обзору Хабберта 1970 г.

⁵ Помимо того, что на создание экономики, основанной на ядерной энергии, потребуется очень много времени, запаса урана хватит всего на несколько десятилетий.

поддержки исследований. Таким образом, более ранние прогнозы стоимости фотоэлектрической энергии, вероятно, к 2020 г. должны быть пересмотрены, так как 30-процентная эффективность лабораторных фотопреобразователей из монокристаллического кремния в натуральных условиях на солнечных фермах снижается до 20 %. Одним из вариантов использования солнечной энергии является разработка ПТЭО с минимальными затратами солнечной энергии⁶.

3. Эффективность преобразования энергии по сравнению с ценой конечного продукта

Хорошим примером является ПТЭО – преобразование тепловой энергии океана – процесс получения солнечной энергии, который использует разницу между температурой на поверхности тропических морей и температурой на глубине [7]. Этот пример показывает, что производство солнечной энергии посредством ПТЭО в 2006 г., по-видимому, стоит в 2 ÷ 3 раза меньше, чем посредством фотоэлементов.

У ПТЭО общая эффективность преобразования тепла в работу низкая – около 2 ÷ 3 %, что не так важно, поскольку доступной тепловой энергии очень много и стоит она дешево. Но необходимо ответить на вопросы, когда и какова будет стоимость такой энергии (в пригодной для использования форме) в близлежащих городах.

Ввиду приближающегося переломного момента для нефтяной промышленности (2010 г.), большое значение приобретает скорость, с которой должны быть построены новые электростанции⁷ (на самом деле, мнение, высказанное в 2007 г., предполагает, что, возможно, потребуется построить несколько энергетических систем одновременно, чтобы компенсировать дефицит нефти).

4. Цена на электролитический водород, получаемый из ветра, воды и пара

Связь между потенциалом электрохимической ячейки, стоимостью электричества и стоимостью полученного водорода была впервые показана Дерриком Грегори [8] в 1972 г. и подтверждена Бокрисом [9]. Стоимость состоит из двух слагаемых:

$$\text{Стоимость} = A + B. \quad (1)$$

⁶ ПТЭО – преобразование тепловой энергии океана. Данный метод выработки электричества из солнечной энергии использует разность температур в 20 °C между поверхностью тропического моря и на глубине 1 000 м. Несмотря на то что эффективность преобразования энергии низка, очень большая масса теплой воды позволяет установкам ПТЭО осуществлять экономически приемлемое снабжение электричеством, полученным из водорода и т.д.

⁷ Было бы ошибкой полагать, что, согласно первому закону термодинамики, общая энергия топлива, такого как уголь, доступна в качестве основы для работы тепловых двигателей. Энергия от сжигания ископаемого топлива является производной второго закона. Долговечность, например, угля в качестве источника энергии должна, согласно первому закону, включать одну треть на нагрев.

Слагаемое A представляет собой стоимость электроэнергии, используемой для производства определенной единицы (1 ГДж) H_2 . Численное выражение для A (см. ниже) зависит только от применимости законов электролиза Фарадея, которые являются одними из самых надежных законов природы. Значение A действительно и при высокой температуре, так как электролиз водяного пара осуществляется без термической диссоциации в связи с применением ионопроводящей мембраны на цирконий-иттриевой основе $ZrO_2-Y_2O_3$.

Слагаемое B представляет собой совокупность амортизационных расходов на строительство станции вместе со страхованием, техническим обслуживанием и зарплатой технического персонала. Слагаемое B в долларах за МБТЕ (1 ГДж) должно пересматриваться каждый год, потому что оно зависит от процентных ставок, инфляции и т.д. Значение B , рассчитанное на 2006 г., составляет \$2,84 за МБТЕ (1 ГДж). Эта цифра в следующих расчетах округлена до \$3.

Значения выражений в формуле (1) вычисляются следующим образом (на 2006 г.):

$$\text{Стоимость 1 МБТЕ в US\$ } H_2 = 2,29Ec + 3, \quad (2)$$

где E – потенциал ячейки в вольтах [В], используемый в электролизере при плотности тока ячейки $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; a – стоимость электроэнергии, доступной крупному производителю электроэнергии в центах за кВт·ч.

Обычно значение E на современном промышленном производстве функционирующем при комнатной температуре и плотности тока 100 mA cm^{-2} , равна 1,6 В. Такое значение предполагает использование подходящих с точки зрения электрокатализа электродных покрытий и связанную с этим эффективность конверсии.

Для высокотемпературного электролиза (с твердыми электролитами при $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$, $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$) $E = 1,0 \text{ В}$ при 100 mA cm^{-2} .

Для ещё более высоких температур электролиза ($1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_3O_8-Y_2O_3$)⁸ потенциал ячейки составляет: $E = 0,63 \text{ В}$ [11, 12]⁹.

Стоимость водорода, полученного за счёт энергии ветра, во многом зависит от средней скорости ветра в год в ветровых районах. В США средняя скорость ветра составляет около 15 миль/ч, но есть районы, в которых она выше [13].

Для расчета стоимости энергии ветра была взята стандартная средняя скорость ветра в год – 15 миль/ч. Стоимость энергии ветра в диапазоне изменения его

скорости до 20 миль/час¹⁰ обратно пропорциональна скорости ветра в кубе.

Средняя скорость ветра выше над поверхностью моря (ввиду отсутствия препятствий). Скорость ветра, превышающая 20 миль/ч, наблюдается в Антарктике, где есть места, в которых средняя скорость ветра составляет 44 миль/ч в течение девяти месяцев в году [14] (табл. 1 и 2).

Таблица 1
Цена водорода, полученного за счёт энергии ветра со средней скоростью 15 миль/ч, в зависимости от температуры электролиза

Table 1
Price of hydrogen from wind of 15 mph average as a function of the temperature of electrolysis

Температура и соответствующее напряжение на ячейке	Цена 1 МБТЕ из H_2 + стоимость передачи по трубопроводу на 1 000 миль + 25 % прибыль (\$)	Стоимость H_2 согласно первому закону в бензиновом эквиваленте США
25 °C (1,6 В) ^a	26,43	\$3,10
1 000 °C (1,00 В)	23,63	\$2,78
1 500 °C (0,63 В)	17,59	\$2,07

^a Стоимость энергии ветра в этой таблице составляет 4,5 цента за кВт·ч⁻¹, что является самой низкой стоимостью, которая указана Департаментом энергетики (ДЭ) для энергии ветра в 2006 г., соответствующей скорости 15 миль/ч.

Таблица 2
Цена водорода, полученного за счёт энергии ветра и электролиза при 25 °C, в зависимости от двух значений скорости ветра (15 миль/ч и 20 миль/ч)

Table 2
Price of hydrogen from wind and with electrolysis at 25 °C depending on two wind speeds

Доступная скорость ветра (миль в час)	Цена 1 МБТЕ H_2	Цена эквивалента H_2 на 1 галлон бензина
15 (4,5 центов/кВт·ч)	\$26,43	\$3,10
20 (1,89 центов/кВт·ч)	\$15,73	\$1,85

Скорость ветра 20 миль/ч дала бы дополнительно \$1 на амортизацию ветряных турбин^a.

^a Значения стоимости H_2 у Департамента Энергетики в сентябре 2006 г. составляют примерно \$30 за ГДж. Некоторые из наших значений уже ниже этой стоимости, потому что мы включили результаты, основанные на высокотемпературном электролизе (табл. 1) и скорости ветра 20 миль/ч, предполагая, что отношение v^3 все еще сохраняется.

5. Оценка стоимости электроэнергии, получаемой с помощью ветра, в 2006 г.

5.1. Стоимость энергии ветра при 15 милях в час, скорость ветра, определяющая разные температуры электролиза (в частности, с использованием твердых электролитов)

При расчете цены водорода авторы столкнулись с рядом трудностей. Во-первых, американская валюта подвержена инфляции. Несмотря на то что прави-

⁸ Упомянутый здесь высокотемпературный электролиз не имеет ничего общего с термической диссоциацией воды. Это мог бы быть способ для использования водорода, но быстрая рекомбинация затруднительна по сей день [10].

⁹ Оценки стоимости высокотемпературных методов должны быть учтены в приложениях уравнения (2) стоимости тепла. Это примерно треть стоимости экономленной электроэнергии, которая была учтена в стоимости.



тельством заявлены небольшие значения инфляции, в 2006 г. в США наблюдается повсеместный рост цен на товары широкого потребления и т.д.

В связи с этим любой специалист, опираясь на рассчитанные здесь значения, в ближайшие два года должен будет учитывать повышение цен в долларах США. Встречной тенденцией является снижение реальных затрат на энергию ветра, измеряемых в долларах с постоянной покупательной способностью («постоянный доллар»), которые составляли несколько сотен процентов в последние двадцать лет. В постоянных долларах снижение цен, по-видимому, продолжается на 5 ÷ 10 % в год благодаря техническим инновациям.

Таким образом, любая цена на энергию ветра должна также указывать на предполагаемую среднюю скорость ветра (за год) в конкретной местности, предпочтительно на несколько лет. В литературе часто встречаются утверждения о стоимости энергии ветра без каких-либо ссылок на предполагаемую энергию ветра. Энергия ветра равна ωv^3 , где v – средняя скорость ветра за год. Если принять 15 миль/ч в качестве стандарта, то при 12 миль/ч доступная энергия уменьшится на 48 %, а при 18 миль/ч цена снизится на 78 %. Как видно, будут отмечены значительные эргономические различия¹⁰.

В настоящее время (сентябрь 2006 г.) стоимость должна быть принята для стандартной скорости ветра – 15 миль/час. При этом известно, что точное местоположение может изменить это значение на 50 %. Для проведения следующих расчетов¹¹ учитывалась оценка стоимости в сентябре 2006 г. экспертами из НЛВЭ в Голдене, штат Колорадо – 4,5 ÷ 6 центов/кВт·ч [15].

Как уже отмечалось, ввиду непрерывного снижения стоимости энергии ветра при постоянном курсе доллара, в альтернативных ценовых предложениях было принято более низкое значение (которое, ко-

¹⁰ Изменение конечной цены водорода не пропорционально v^3 . Это цена на электроэнергию, которая таким образом регулируется и влияет на цену водорода, некоторые элементы которой, однако, не зависят от температуры или скорости ветра. Одним из способов снижения цены на водород, которым часто пренебрегают, является использование тепла, вырабатываемого при электролизе (комбинированное тепло и мощность). Хотя эффективность электролиза не может быть более 65 %, ее можно повысить до 90 %, если использовать выработанное тепло, например, для подогрева воды в домашнем хозяйстве.

¹¹ Если вернуться к первоначальной формуле, при мощности ветровой турбины на единицу площади, эта мощность = $\frac{16}{27} \frac{1}{2} C_p v^3$.

Здесь v^3 – среднегодовое значение куба скорости ветра; ρ – плотность воздуха; C_p – коэффициент эффективности.

Для уравнения требуется среднее значение кубов скорости ветра за обычный год в определенном месте. В основном берут среднегодовое (т.е. среднее) значение скорости ветра в кубе, что дает значение в 2–3 раза меньше. Однако это почти компенсируется тем фактом, что многие расчеты принимают КПД равным 1, хотя он составляет $\sim \frac{1}{3} - \frac{1}{2}$. Таким образом, если взять КПД равным примерно 1 и куб среднего значения скорости ветра, который дает значение около 1/2 от правильного, то при таких грубых подсчетах происходит компенсация за счет использования куба среднего значения скорости ветра, а не среднего значения кубов скоростей ветра.

нечно, будет увеличиваться с падением курса доллара США).

Конечная цена H_2 , получаемого на ветродородной установке с электролизером, зависит от потенциала и плотности тока, то есть удельной скорости процесса электролиза, в ходе которого получают водород. Следует отметить, что с 1980-х гг. методы электролиза совершенствовались, о чём специалисты в области ветровой электроэнергетики мало осведомлены. Существует несколько способов снижения стоимости электролиза и, следовательно, цены на водород. Например, именно перенапряжение при выделении кислорода приводит к тому, что в водородно-кислородной ячейке потенциал становится очень высоким.

Если бы при этих процессах на аноде вырабатывали бром, а не кислород, потенциал ячеек, а следовательно, и стоимость электричества, упала бы примерно на 25 %¹².

Однако лишь процесс электролиза при температуре 1 000 °С и с мембранами $ZrO_2Y_2O_3$ может считаться «рабочим». Электролиз при 1 500 °С известен из описаний в двух статьях, в которых зафиксирован опыт с ионопроводящим твердым электролитом $U_3O_8-Y_2O_3$ под тщательным наблюдением научных сотрудников. На оксидно-урановых мембранах не было явных признаков ухудшения состояния, хотя срок их использования составлял лишь 12 недель, и мембрана нагревалась до высокой температуры за меньшее время. Следует отметить, что в США могут существовать юридические препятствия для использования урановых соединений.

6. Способ проведения расчетов

Стоимость электроэнергии для 1 МБТЕ (1 ГДж) в $US\$ = 2,29Ec$, где E – потенциал ячейки, В; c – стоимость кВт·ч электричества в центах [17]. Значение E включает КПД электролитического процесса вместе с малыми потерями в IR^{13} в мембране.

К этому добавляется (при высокотемпературном электролизе) \$4,49 для покрытия (за 2006 г.) амортизационных, страховых и эксплуатационных расходов, пропорционально выработке 1 ГДж. Эта цифра зависит от процентных ставок и должна пересчитываться ежегодно (пропорционально количе-

¹² Одним из способов снижения затрат на производство водорода (помимо использования тепла) является предотвращение выделения O_2 . Cl_2 более легко выделяется в воде, чем O_2 . В больших масштабах его можно сбросить в морскую воду. Несколько недорогих добавок к раствору (например, SO_2) позволяют сэкономить 30–40 % стоимости при образовании на аноде SO_4^- при электролизе воды по сравнению с электролизом для получения кислорода. Суперэлектролизер, разработанный Мерфи и Гутманом [16] в 1983 г. был рассчитан на 1,0 В для 10 А см² (или 0,8 В для 100 мА см²). При комнатной температуре использование разработки Мерфи и Гутмана позволило бы сохранить более 50 % стоимости электричества при электролизе водорода.

¹³ I – сила тока через ячейку; R – сопротивление между двумя сторонами мембраны.

ству произведенной энергии, 1 ГДж). Помимо этого, добавляются затраты на передачу газообразного H_2 более чем на 1 000 миль, что на 2006 г. оценивается в \$ 1,66 [18].

Наконец, полученная цифра умножается на 1,25, для того чтобы определить 25 % прибыль.

Теперь для работы при более высоких температурах необходимо рекуперировать нагрев для поддержания системы, например, до 1 000 °С и до 1 500 °С соответственно. Это было сделано простым способом. Вначале была отмечена разница между потенциалами ячейки при высокой и комнатной температуре. Затем задействовано эмпирическое правило: тепло примерно на треть дешевле электроэнергии. Таким образом, к напряжению ячейки добавляется одна треть разности потенциалов, используемой при 100 мА см⁻² и высоких и низких температурах. Как при высокой, так и низкой температуре один и тот же заряд передается таким образом, что добавление эквивалентного потенциала для одного и того же процесса (тот же заряд) эквивалентно увеличению энергии, представляющей используемое тепло.

7. Стоимость солнечной электроэнергии

Стоимость солнечной энергии снизилась за последние несколько десятилетий [21]. Однако, в то время как энергия ветра и получаемый из неё водород стали дешевле, чем традиционные загрязняющие окружающую среду виды энергии, солнечная энергия, получаемая с помощью фотоэлектрических устройств, стоит все еще слишком дорого для того, чтобы использовать ее в больших масштабах¹⁴. При этом стоимость солнечной энергии, получаемой с помощью фотоэлектрических устройств, напрямую зависит от эффективности преобразования солнечного света в электричество [19, 20].

Стоимость фотоэлементов складывается из нескольких компонентов: не только материала фотоэлементов (ФЭ), но и материала контейнеров, электрических сетей и инфраструктуры.

При написании этой части статьи по солнечному водороду [22] мы были вынуждены опираться на ценовые прогнозы на 15 лет вперед (2021 г.), сделанные экспертами из Департамента Энергетики США (DOE) и др. [19, 23, 24]. Вероятно, цена на фотоэлектрическую энергию в 10 центов/кВт·ч (валюта 2006 г.) может быть достигнута только в случае массового использования больших поликристаллических матриц (преобразование 20 %). Эффективность преобразования в 15 % должна привести к 13,3 цента за

кВт·ч⁻¹ [19] к 2021 г. (следует обратить внимание на то, что улучшение характеристик монокристаллического кремния > 20 % уравнивается ростом цены) (табл. 3).

Инфляция может увеличить стоимость, хотя стоимость солнечных батарей в долларах 2006 г., вероятно, значительно сократится¹⁵.

Прогнозировать уровень инфляции рискованно, поскольку по заявлениям правительства её уровень оказывается меньше наблюдаемого роста цен во всех отраслях экономики. Предположим, по самым скромным подсчётам, что средний уровень инфляции в течение следующих 15 лет составит 5 % в год, а стоимость электроэнергии, эквивалентная 10 центам/кВт·ч (в \$ 2006 г.), через 15 лет и без технических улучшений – $(1 + 5/100)^{15} = 2,07$, то есть вырастет примерно до 20 центов/кВт·ч.

Эти наблюдения подчеркивают необходимость разработки технологий солнечно-тепловой энергии и ПТЭО параллельно с работой по снижению затрат на фотоэлектрические элементы. Системный анализ показывает, что солнечная энергия от ПТЭО будет составлять от $1/2$ до $1/3$ стоимости использования ФЭ (оба значения определены для аналогичного времени и также в долларах США 2006 г.) [25]. В связи с актуальностью ПТЭО необходима ее апробация путем строительства большой установки и проверки предполагаемых показателей.

Государственная политика развития угольной и атомной энергетики сталкивается с хорошо известными трудностями использования угля¹⁶, которые в настоящее время значительно усугубляются угрозой выброса CH_4 из тундры (метан в 23 раза увеличивает парниковый эффект из-за CO_2). Атомная энергетика (если учитывать затраты на вывоз отходов и их захоронение) в два раза дороже ветряных, геотермальных и приливных источников (и, возможно, других возобновляемых источников энергии). Эти возобновляемые источники энергии не только дешевле тех, которые нынешнее правительство планирует развивать, – они неисчерпаемы и чисты. В то время как ядерные источники энергии по своей природе радиоактивны (отходы), и, что важно, урановая руда закончится, как и нефть!

Для синтеза необходимой энергии для США под действием солнечного света в сахарном тростнике нужно значительно больше пространства, чем все имеющиеся сельскохозяйственные земли США. А для перегонки и ректификации зерновых могут потребоваться ископаемые виды топлива [26–29].¹⁷

¹⁴ Наконец, эти утверждения обычно относятся к обсуждаемым солнечным фотоэлементам. Существуют и другие способы преобразования солнечной энергии в полезную энергию, и при системном анализе метод ПТЭО часто оказывается дешевле, чем энергия ФЭ (не подвержены суточным колебаниям). Тем не менее исследование моря в качестве источника энергии не получали от правительства финансовой поддержки в течение многих лет (но см. недавнюю работу Ван Рызина и др. [7], которая предлагает широкое использование ПТЭО).

¹⁵ Показатели окупаемости высокотемпературного электролиза отсутствуют, работа продолжается уже шесть лет. Электролизеры при комнатной температуре функционируют дольше (30–40 лет), если электроды не оснащены электрокатализаторами. Если современные ячейки используются с электрокатализаторами, то срок их службы может снизиться до трех лет. Однако катализаторы формируются посредством электроимпульсной обработки и очень тонких слоев, так что восстановление будет недорогим.

¹⁶ В дополнение к прогнозам об увеличении CO_2 (и даже CH_4) широкое использование угля потребует увеличения числа шахт.



Однако нельзя допустить, чтобы использование жидкого топлива увеличило опасность затопления

наших прибрежных городов и выброса метана в тундре.

Таблица 3

Прогнозируемая стоимость солнечного водорода в долларах (2006 г.) к 2021 г.^a

Table 3

Projected cost of solar hydrogen in 2006 \$ in 2021^a

С переменными затратами температуры электролиза				
Потенциал ячейки 100 мА см ⁻²	Стоимость МБТЕ H ₂ , ε = 15 % 13 центов/кВт·ч ⁻¹ (2006\$)	Стоимость МБТЕ H ₂ , ε = 20 % 10 центов/кВт·ч ⁻¹ (2006\$)	Стоимость H ₂ = 1 галлон в бензиновом эквиваленте ε = 15 %	Стоимость H ₂ = 1 галлон в бензиновом эквиваленте ε = 20 % ^b
1,6 V (25 °C)	\$66,73	\$51,62	\$8	\$6
1,0 V (1 000 °C)	\$53,37	\$42,03	\$6	\$5
0,63 V (1 500 °C)	\$44,23	\$35,16	\$5	\$4

ε = эффективность преобразования солнечного света в электричество.

^a Эти затраты хорошо обоснованы. Фактические значения в 2021 г. будут зависеть от инфляции, но уже сейчас можно сделать прогноз. Строительство солнечных ферм, создание преобразователей для производства водорода, в котором хранится солнечная энергия и др., займет не менее 15 лет. Они могут быть заменены менее дорогими установками ПТЭО.

^b К стоимости количества H₂ 1 МБТЕ: 229 \$c + 4 – была добавлена одна треть потенциальной разницы, вызванной изменением температуры, для того чтобы учесть стоимость тепла и \$ 1,66 для транспортировки 1 МБТЕ H₂ по трубам на 1 000 миль; вместе с 25 % от общих затрат на прибыль. Долларовая стоимость водорода, эквивалентная 1 гал. бензина, была округлена до 50 центов (больше расчетных значений).

Таким образом, следует быстрыми темпами развивать только возобновляемые источники энергии, что уменьшит опасность нехватки энергии для нашего населения.

8. Будущее

В будущем будут использоваться два носителя энергии: электричество на расстояние до 1 000 миль от источника и водород на гораздо большее расстояние, а также для хранения периодически доступной энергии (например, ветра, волн, приливов и солнца).

Существуют источники неиссякаемой энергии, которые нуждаются в разработке, и наиболее перспективным являются петротермальные источники, которые могут быть реализованы в большинстве равнинных районов любой страны. Всё зависит от повышения температуры 40-мильной подстилающей горной породы, на которой мы живем. На глубине около 5 миль температура этой породы превышает температуру кипения воды.

Существует несколько аспектов гравитации (например, приливы), которые могут быть задействованы. Для того чтобы использовать прилив в качестве источника энергии, перепад высот приливов и отливов должен составлять 10 футов и более [24]. Кроме того, должна быть подходящая водосборная площадь с диффузором, куда вода поступает из моря во время прилива. Турбины в диффузоре преобразовывают энергию в электричество в обоих направлениях подачи. В настоящее время в рассматриваемых районах используются естественные географические образования, но, при условии наличия достаточной разницы между приливами и отливами, накопительный

бассейн может быть спроектирован в любых незаселенных районах. Транспортировка энергии на большие расстояния возможна путем преобразования приливного электричества в водород, который затем может храниться или передаваться по трубам на большие расстояния.

Все эти неисчерпаемые источники энергии могут быть превращены в чистую энергию и обеспечить огромное население, которое сейчас живет на планете. Необходимо только ответить на очень важный вопрос – можно ли своевременно развить эти источники до достаточного уровня, чтобы справиться с падением нефтедобычи, которое, по всей видимости, мы начнем ощущать менее чем через десять лет.

9. Заключение

В данной статье, в связи с естественно имеющимися сложностями в аргументации, были приняты завышенные значения стоимости обсуждаемых альтернативных энергетических систем. Тем не менее, для того чтобы помочь читателю составить свое мнение о статье, будут представлены два важных момента.

1. Затраты на амортизацию в условиях высокой температуры были приняты в два раза выше, чем при комнатной температуре, что полностью основано на шестилетних лабораторных исследованиях, в течение которых высокотемпературное оборудование с изменяющейся во времени температурой «горячих» мембран эксплуатировалось только половину рабочего дня.

2. Самые чувствительные зоны при работе с высокотемпературным паром – это, конечно, ионопро-



водящие мембраны. Не отмечалось никакого ухудшения, но при этом, как указывалось выше, работа оборудования в течение года не была непрерывной.

Авторы попытались представить данные и расчёты стоимости, которые могут оказаться полезными для тех, кто желает обеспечить население неисчерпаемой, полностью чистой энергией. Однако предполагается, что коммерциализация ветро-водородного производства приведет к затратам, которые не были учтены, например, страхование производственного оборудования и т.д. Тем не менее представленный вариант ветро-водородного производства имеет свои основания, поскольку предлагает лучшую экономику для неисчерпаемого чистого топлива.

Результаты применения солнечных батарей на фотоэлементах, даже при проектировании до 2021 г., предполагают гораздо большие затраты, чем схема с использованием энергии ветра. При этом не вполне очевидно, но солнечная тепловая энергия намного дешевле, чем солнечная ФЭ, а ПТЭО – несмотря на то что еще не было построено крупномасштабных установок – возможно, ещё выгоднее (в частности, благодаря круглосуточной работе по сравнению с 6 часами в других методах; кроме того, ПТЭО подразумевает масштабное опреснение морской воды).

Благодарности

Большую помощь нам оказали коллеги, которые предоставили информацию о затратах на синтез водорода при использовании как энергии ветра, так и солнечной энергии (ФЭ). Среди них: Гюстав Гроб, Международный энергетический консорциум, Моргарцен-Цуг, Швейцария, который держал нас в курсе по поводу альтернативы аккумуляторам, особенно по части электрохимических конденсаторов; г-жа Луиза Ги-ли, Министерство энергетики, Управление по энергетической информации, Вашингтон, округ Колумбия, стоимость энергии ветра; Х.Х. Хьюитт, Департамент энергетики, Управление по энергетической информации, Вашингтон, округ Колумбия, стоимость передачи и удаления отходов для ядерных реакторов; Дж. Джонсон, Отдел ветроэнергетики, Департамент энергетики, Вашингтон, округ Колумбия, прогнозируемая стоимость фотоэлектрической энергии в течение пятнадцати лет; Доктор Гуан Лин, Соларекс (в отставке), Филадельфия, Пенсильвания, стоимость фотоэлектрической энергии; профессор Питер Швертфегер, бывший профессор наук о Земле, Университет Флиндерс в Южной Австралии, о ветрах в Антарктике; Джон А. Тернер, Национальная Лаборатория возобновляемых источников энергии, Голден, Колорадо, о водороде при прямом разложении воды солнцем (электрохимическое).

Acknowledgments

We had much help from colleagues who yielded information concerning costs both of wind and solar (pv) synthesis of hydrogen. Among these were: Gustav Grob, International Clean Energy Consortium, Morgarten-Zug, Switzerland who has kept us aware of battery alternatives, particularly the electrochemical capacitors; Ms. Louise Guey-Lee, Department of

Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, cost of wind power; H.H. Hewett, Department of Energy, Energy Information Administration, Washington, DC, cost of devolution and waste removal for fission reactors; J. Johnson, Wind Section, Department of Energy, Washington, DC, projected cost of photovoltaic energy projected forward for fifteen years; Dr. Guang Lin, Solarex (retired), Philadelphia, PA, Cost of photovoltaics; Professor Peter Schwertfeger, formerly Professor of Earth Sciences, Flinders University of South Australia, on winds in Antarctica; John A. Turner, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, on hydrogen through solar direct decomposition of water: Electrochemical.

Список литературы

- [1] Laherre's Oil Production Forecast, 1950–2150. Reprinted with permission from correspondence with William Horvath, U.S. Department of Energy, March 29, 2001.
- [2] Nejat Veziroglu T., Awad A.H. Int. J. Hydrogen Energy, 1984;9:355.
- [3] Simmons M.R. Twilight in the desert. New York: Wiley; 2005 p. 348.
- [4] Letter from H. Horvath, A Correspondent of the Department of Energy, July, 2006.
- [5] A quotation from Romm J.J. In: The hype about hydrogen. Island Press, 2004. p. 86.
- [6] E.J. Campbell Quoted by Legget B.J. In: The empty tank. New York: Random House; 2005.
- [7] The Hydrogen Economy of 2050: OTEC Driven, Joe Van Ryzin, Patrick Grandelli, David Lip, Richard Argall, 2005, 2006. <http://www.clubdesargonauts.org/energie/hydrogene.pdf>
- [8] Gregory D.D., Ng D.Y.C., Long G.M. On the electrochemistry of cleaner environments. New York: Plenum; 1972.
- [9] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halsted Press; 1980 p. 148–56.
- [10] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halsted Press; 1980 p. 311–14.
- [11] Bockris J.O'M, Bevan J., Badwall S. Electrode kinetics of evolution and dissolution of oxygen at Urania-Zirconia interfaces. Acta Electrochim 1980;25:115.
- [12] Pound B.G., Bevan D.J.M., Bockris J.O'M. Electrolysis of steam during uranium oxide electrodes. Int. J. Hydrogen 1980;6:473.
- [13] Feller G. Wind, waves & tides economically viable energy from the World's Oceans, August 9, 2003, Ecoworld; Economics of Wind Energy, February, 2005, American Wind Energy Association; <http://en.wikipedia.org/wiki/windenergyJuly/August2006>.
- [14] Professor Peter Schwertfeger, former member of Australian Group in the Antarctic, private communication August 8, 2006; http://globe-net.ca/market_reports/index.cfm?ID_Report=762July/August2006.
- [15] Wind Energy Manual—Wind and Wind Power, Iowa Energy Center, 2006, http://www.energy.iastate.edu/renewable/wind/wem/wem-08_power.html



- [16] Murphy O., Gutman F. Electrochemical splitting of water. In: White R, Bockris JO'M, Conway BE, editors. Modern aspects of electrochemistry, vol. 15. New York: Plenum Press; 1983. p. 1–82 [chapter 1].
- [17] Bockris J.O'M. Energy options. New York: Halstead Press; 1980, p. 295.
- [18] Reynolds R.A., Slager W.L. Theme, 1974; 521.
- [19] Private communications from Dr. G. Lin on cost/kwh. as a function of efficiency in pv, 2006.
- [20] Sano S.K., Metsada M., Kuelm K., Mishimoto J., Ogawa I., Kajitu K. Proceedings of the second world conference P.V. solar energy conversion, 6–10 July, 1998. p. 351.
- [21] Nejat Veziroglu T., Bockris J.O'M. A solar-hydrogen economy for the USA, vol. 8, 1983. p. 323.
- [22] Bockris J.O'M. Int. J. Hydrogen Energy, 2002;27:731.
- [23] Lin G., Carlson D.E. Int. J. Hydrogen Energy, 2000;25:807
http://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion.
- [24] Wave Energy As a Preferred Renewable Energy and The Economics of Wave Energy Energetech, August 2006.
<http://energetech.com.au:8080/index.htm?http://www.energetech.com.au/content/market.html>
- [25] Vega L. Survey of OTEC, encyclopedia of energy, technology, and the environment, 2005.
- [26] Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel production using soybean and sunflower. In: Pimentel D, Patzek H, editors. Natural Resources Research, vol. 14(1), March 2005.
- [27] Pimentel D., Patzek H., Cecil P., editors. Ethanol production: energy economic and environmental losses.
- [28] Pimentel D., Patzek H. Editorial: green plants, fossil fuels, and now biofuels. Bioscience, 2006;56(11):875.
- [29] Pimentel D. Rev Environ Contam Toxicol, 2007;189:25–41.



Welcome to ICEPP 2018

We welcome your participation and contribution to the 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention (ICEPP 2018) to be held in Brisbane, Australia during December 6–8, 2018.

In the coming decades, the world Environmental Systems will face huge challenges. The influence factors include on-going growth of the world population, the limited availability of natural resources and climate change. Due to this reason, 2018 6th International Conference on Environment Pollution and Prevention, as one of the premier forum for presenting developments in Environmental Systems Research, aimed to bring together leading scientists, researchers around the world to discuss the priority topics for Environment Pollution and Prevention in recent years

The conference programme will include prominent keynote speakers, plenary speakers, invited speakers and regular paper presentations in parallel tracks. The General Chairs, along with the entire team cordially invite you to submit your latest research results and to take part in the upcoming conference, to be held during December 6-8, 2018 in Brisbane, Australia.

General Chairs – ICEPP 2018

Paper Publication

All accepted papers fulfilling requirements on quality will be published in **International Conference Proceedings**. It is mandatory that at least one author registers and presents for every paper that is included in the conference proceedings. The Conference Proceedings which will be indexed by **EI Compendex** and submitted to be reviewed by SCOPUS.

For those who do not willing to publish papers can submit abstract. The accepted abstract can be presented in the conference as Presentation Only.

Prospective authors are kindly invited to submit full papers/abstracts(.pdf) via Electronic Submission System or send the submission to icepp@cbees.net.