



АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Преподаватель:

Бекбаев А.Б., д-р. техн. наук, профессор кафедры
«Энергетика»

bekbaev_a@mail.ru

14- Лекция

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

По завершению урока Вы будете знать:

О необходимости перехода к водородной энергетике.

О преимуществе водородной энергетики.

О базовых аргументах преимущества водородной энергетики.

О технологии получения энергии водорода.

О методах хранения и транспортировки водорода

Крупномасштабная концепция водородной энергетики как одного из направлений научно-технического прогресса сформировалась в середине 70-х годов прошлого столетия в разгар охватившего мир энергетического кризиса. Главная идея этого направления — замена ископаемых органических видов топлива во всех сферах их применения на новый энергоноситель — водород, при сжигании которого образуется только вода и практически отсутствуют какие-либо вредные выбросы. Работы по водородной энергетике во многих странах относятся к приоритетным направлениям социально-экономического развития и находят все большую поддержку как со стороны государства, так и частного бизнеса.

Первая энергетическая революция произошла 7–8 тысячелетий назад, когда к своей мускульной силе как первичному энергисточнику человек добавил силу прирученных им животных.

Вторая революция развернулась в конце I — начале II тысячелетий н. э., когда на службу человеку была поставлена энергия падающей воды и силы ветра. Это стало энергетической основой средневековой и раннеиндустриальной цивилизации.

Далее ритм энергетических переворотов учащается. Третью энергетическую революцию можно связать с освоением силы пара, созданием паровых двигателей.

Четвертая революция по времени относится к концу XIX — началу XX века, когда новые возможности удовлетворения энергопотребностей общества были обеспечены освоением электрической энергии, жидкого топлива, созданием двигателей внутреннего сгорания. Возможно, вторым этапом этой революции можно считать освоение энергии природного газа и атомной энергии.

В начале XXI века человечество стоит у нового энергетического порога, и он может быть преодолен путем очередного ряда инноваций, контуры которых еще не вполне определены. Сейчас уже вполне ясно, что инерционное развитие существующих технологий в энергетике является по существу тупиковым и нужно искать принципиально новые пути трансформации энергетического сектора.

В первые годы наступившего столетия становится все более очевидным, что ключевое место в развертывающейся глобальной энергетической революции займет водородная энергетика — производство водорода и его использование на основе топливных элементов в промышленности, энергетике, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве и т. д.

— во-первых, *демографическим* фактором — быстрым ростом потребности в энергии из-за увеличения численности населения и роста среднедушевого энергопотребления;

— во-вторых, *природно-экологическими* факторами: ресурсы ископаемого топлива не возобновляются, а богатые и доступные месторождения быстро исчерпываются. К тому же растущие выбросы парниковых газов в атмосферу оказывают необратимое воздействие на климат планеты;

— в-третьих, к скорейшему осуществлению этой глобальной стратегии подталкивают *экономические* факторы: добыча и переработка ископаемого топлива становится все дороже и отвлекает все больше ресурсов;

— в-четвертых, водородной энергетике благоприятствуют *научно-технологические* факторы — в последние десятилетия появились изобретения и технологии, которые позволяют производить в необходимых масштабах водородное топливо и эффективно использовать топливные элементы;

— в-пятых, не стоит сбрасывать со счетов и *геополитические* факторы. Сейчас подавляющая часть запасов нефти и газа принадлежит трем цивилизациям — мусульманской, евразийской и латиноамериканской. От устойчивости поставок из этих регионов зависит экономика других цивилизаций, в том числе развитых, а также китайской и индийской. Источники и пути поставок могут подвергаться атакам международных террористов. В случае освоения водородной и другой альтернативной энергетики резко уменьшится зависимость стран-потребителей от импорта нефти и газа.

— во-первых, первозданные биосфера и экосистема давно уже не существуют: они преобразованы, и не всегда в лучшую сторону, человеческим разумом и трудом;

— во-вторых, вряд ли в будущем водород станет единственным источником энергии; вероятнее всего, сохранится множественность энергоисточников, хотя и в иной пропорции, чем сейчас;

— в-третьих, вряд ли правомерно говорить о *водородной экономике* и тем более о *водородной цивилизации*. И экономика и цивилизация — это многомерные, многоэлементные системы, и энергосектор — лишь один из элементов этих систем.

К развитию водородной энергетики подключились правительства ряда стран и межгосударственные объединения, формирующие национальные и международные водородные программы. Около 1000 фирм, компаний, концернов, университетских лабораторий, и научно-исследовательских объединений Запада уже много лет усиленно работают в различных направлениях водородной энергетики.

Еще в 1996 г. в США законом «Hydrogen Future Act» (Закон о водородном будущем) была принята «всеобъемлющая национальная энергетическая стратегия», разработанная Министерством энергетики. Закон устанавливал, что базовыми элементами в разработке технологий водородной энергетики должны быть признаны топливные элементы, а также принимал многолетний план научно-исследовательских работ, предложенный Министерством энергетики США. Частью этой стратегии стала «Водородная программа», целью которой является переход экономики США в течение 20 лет на водород как основной энергоноситель. В частности, должны быть разработаны, созданы и внедрены экономически приемлемые ключевые водородные технологии и продукты: топливные элементы, высокоэффективные технологии хранения водорода и т. д. Создание этих технологий потребует государственной поддержки промышленных лидеров-разработчиков.

Кроме США эти направления наиболее динамично развиваются в Канаде и Японии, где наряду с большим объемом исследований ведутся активные работы по коммерциализации водородной энергетики. Создано большое количество энергетических установок на топливных элементах мощностью от единиц ватт до мегаватт, уже сейчас конкурентоспособных с аналогичными установками, основанными на традиционных технологиях сгорания углеводородного топлива. В Японии принята водородная программа на период до 2020 г. с выделением 4 млрд долларов; уже в 2010 г. намечено поставить на рынок 10 тыс. автомобилей с водородным двигателем. В 2002 г. в Японии началось осуществление проекта по демонстрации и испытанию транспортных средств и стационарных приложений на основе топливных элементов (Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project). Для этого был построен специальный парк с демонстрационным залом, гаражом и заправочной станцией. В 2003 г. в Токио и Йокогаме открылись пять заправочных станций, использующих различные способы получения водорода. В 2004 г. открыты еще три подобные станции. Среди участников проекта — крупнейшие японские и иностранные автомобильные производители: «Тойота», «Хонда», «Нисан», «Мицубиси моторс», «Судзуки», «Дженерал моторс» и «Даймлер Крайслер».

В Индии создан Индийский национальный комитет водородной энергетики. В 2005 г. комитет разработал «Национальный план водородной энергетики». Планом предусмотрены инвестиции в размере 250 млрд рупий (примерно 5,6 млрд долларов) до 2020 г. Из них 10 млрд рупий выделяется на исследования и демонстрационные проекты, а 240 млрд рупий — на строительство инфраструктуры по производству, транспортировке и хранению водорода. Планом поставлены ближайшие цели — к 2020 г. вывести на дороги страны 1 млн автотранспортных средств, работающих на водороде, и построить водородные электростанции суммарной установленной мощностью 1000 МВт.

- 2010 г. — начало серийного производства автомобилей на водородном топливе, создание сети водородных заправок;
- 2020 г. — достижение конкурентоспособности водородных автомобилей, появление дешевых высокотемпературных топливных элементов;
- 2030 г. — появление устройств длительного хранения водорода и производство электроэнергии домашними топливными элементами;
- 2040 г. — водородная энергетика станет доминирующей;
- 2050 г. — появление водородных самолетов.

— во-первых, сегодня мир стоит на пороге нового технологического уклада, и отнюдь не факт, что этот переход удастся именно тем странам, которые сейчас считаются экономическими и технологическими лидерами в мире. Наоборот, крупные вложения (триллионы долларов) в уже существующую дорогостоящую инфраструктуру могут не позволить им достаточно оперативно переориентироваться;

— во-вторых, у России просто нет выбора. Основа водородных технологий — снижение зависимости от современных энергоносителей, то есть нефти и газа, составляющих основу наших сегодняшних экономики и бюджета. Если через 15–20 лет мир перейдет на водород, то потребление нефти и газа резко сократится и Россию ждет депрессивная модель развития;

— в-третьих, чтобы конкурировать, нужны конкретные преимущества, а они у нас есть: фундаментальные разработки Российской академии наук и наличие металла будущего — палладия: Россия контролирует 50 % его мирового производства.

— отсутствие национальной программы по разработке и производству топливных элементов и энергетических установок на их основе;

— отсутствие целевого государственного финансирования фундаментальных и прикладных исследований и разработок в области топливных элементов;

— неразвитость и неготовность промышленной базы для производства топливных элементов и энергоустановок на их базе;

— неготовность частного бизнеса к субсидированию исследований в области водородной энергетики;

— отсутствие четкой и ясной государственной политики и реальной поддержки работ по экологически чистым ресурсо- и энерго-сберегающим технологиям.

Практически безальтернативный выбор водорода в качестве альтернативного энергоносителя (простите за нечаянный каламбур) объясняется следующими причинами:

- во-первых, водород имеет высокую теплотворную способность: при сжигании 1 г водорода получается 120 Дж тепловой энергии, а при сжигании 1 г бензина — только 47 Дж;

- во-вторых, высокий к.п.д. топливных элементов, достигающий 75 % по электроэнергии, а учитывая, что при этом выделяется еще и тепло, суммарный к.п.д. системы с топливными элементами может достигать 90–95 % (напомним, что к.п.д. современных ТЭС, работающих на органическом топливе, составляет около 40 %, а АЭС — 33 %);

- в-третьих, водород — наиболее распространенный элемент во Вселенной, в том числе и на Земле;

- в-четвертых, экологическая чистота. При сгорании водорода выделяется чистая вода и отсутствуют какие-либо вредные выбросы в атмосферу;

- в-пятых, водород позволяет осуществить аккумулирование энергии;

- в-шестых, широкое применение водородных топливных элементов снизит зависимость от наличия дорогостоящих ЛЭП;

- в-седьмых, водород находит широкое применение не только в энергетике в качестве энергоносителя, но и в других отраслях промышленности (металлургии, химической и нефтехимической промышленности и т. д.). Мировое производство водорода превысило 50 млн т и быстро растет.

Водород может сжигаться как прямым образом (в двигателях внутреннего сгорания, котлах ТЭС и т. п.), так и с помощью топливных элементов. Прямое сжигание вряд ли будет применяться широко в связи со склонностью водорода к детонации. В США еще в 1944 г. делались попытки использования водорода в качестве ракетного горючего, но в итоге от этой идеи отказались именно из-за опасности непредсказуемых взрывов при малейших утечках.

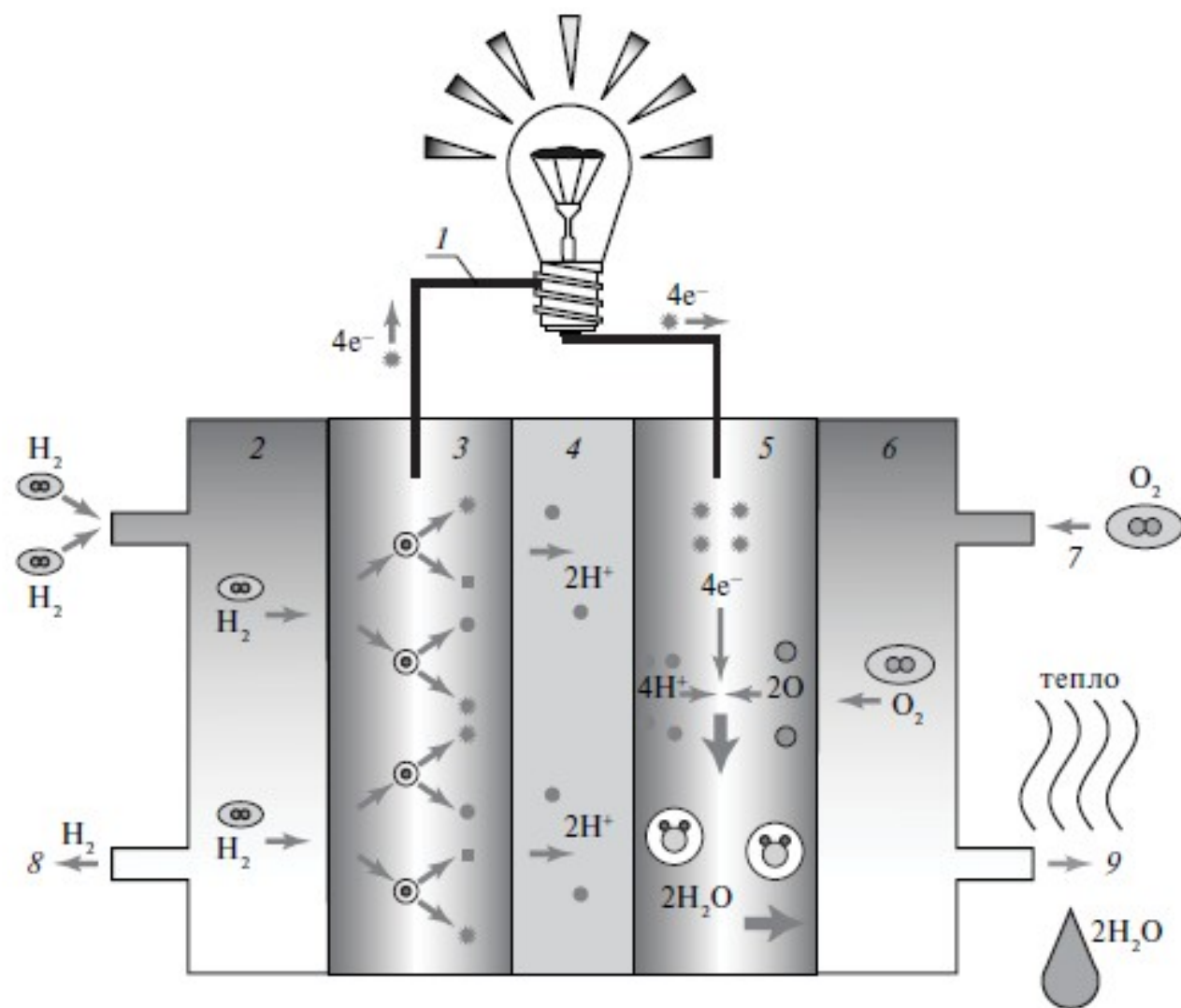


Рис. 17.1. Принципиальная схема топливного элемента:

H_2 – молекула водорода; H – атом водорода; H^+ – протон; e^- – электрон; O^2 – молекула кислорода; O – атом кислорода; H_2O – молекула воды; **1** – внешняя электрическая цепь; **2** – водородная камера; **3** – анод (каталитический слой); **4** – мембрана (твердополимерный электролит); **5** – катод (каталитический слой); **6** – кислородная камера; **7** – обогащенный кислородом воздух; **8** – отработанный H_2 ; **9** – обедненный кислородом воздух

$= 2\text{H}_2\text{O} + Q$. При этом химическая энергия реагентов (водорода и кислорода) в реакции горения полностью переходит только в тепло.

Реакция образования воды в топливном элементе проходит иначе. Здесь окисление водорода проходит как *электрохимическая* реакция, и в результате бо́льшая часть химической энергии реагентов (теоретически 83 %) *напрямую* преобразуется в энергию электрического тока и лишь частично — в тепло. Таким образом, топливный элемент является весьма эффективным источником электрической энергии и дополнительно к этому — источником низкопотенциального тепла. Важнейшей составной частью топливных элементов являются платиновые катализаторы, как правило, на углеродном носителе: Pd/C; Pt—Ir/C; Pt—Pd/C; Pt—Ru/C; Pt—Rh/C; Pt—Ru—Ir/C; Pd—Ru—Pd/C и др.

Наибольшее распространение получила классификация по типу электролита, то есть среды для внутреннего переноса протонов:

- твердооксидный топливный элемент (Solid-oxide fuel cells – SOFC);
- топливный элемент с протонообменной мембраной (Proton-exchange membrane fuel cell – PEMFC);
- обратимый топливный элемент (Reversible fuel cell – RFC);
- прямой метанольный топливный элемент (Direct-methanol fuel cell – DMFC);
- расплавной карбонатный топливный элемент (Molten-carbonate fuel cell – MCFC);
- фосфорнокислый топливный элемент (Alkaline fuel cell – AFC).

Применение топливных элементов возможно в следующих сферах:

- стационарные приложения:
 - производство электрической энергии на электростанциях;
 - аварийные источники питания;
 - автономное электроснабжение;
- транспорт:
 - электромобили, автотранспорт;
 - морской транспорт;
 - железнодорожный транспорт, горная и шахтная техника;
 - вспомогательный транспорт (складская, аэродромная техника и т. д.);
- бортовое питание:
 - авиация, космос;
 - подводные лодки, морской транспорт;
- мобильные устройства:
 - портативная электроника;
 - питание сотовых телефонов;
 - зарядные устройства для армии.

Стационарных энергоустановок мощностью более 10 кВт к концу 2006 г. во всем мире было установлено более 800 комплектов суммарной мощностью около 100 МВт, в том числе за один только 2006 г. было построено более 500 установок суммарной мощностью около 18 МВт.

Компании — производители энергоустановок на базе топливных элементов

Компания	Страна	Технология	Мощность установок
Ansaldo Fuel Cells	Италия	MCFC	500 кВт — 5 МВт
Fuel Cell Energy	США	MCFC	250 кВт — 1 МВт
Gen Cell	США	MCFC	40 — 100 кВт
Ishikawajima Harima Heavy Industries	Япония	MCFC	300 кВт — 1 МВт
MTU CFC Solutions	Германия	MCFC	200 кВт — 3 МВт
Fuji Electric	Япония	PAFC	100 кВт — 1 МВт
KoreaGas	Корея	PAFC	40 кВт
UTC Fuel Cells	США	PAFC, MCFC, PEMFC	200 кВт, транспортные приложения
Ballard Power Systems	Канада	PEMFC	1–200 кВт

General Motors	США	PEMFC	75–300 кВт
Hydrogenics	Канада	PEMFC	7–65 кВт
J-Power	Япония	SOFC	Разрабатывает тройные системы: топливные элементы, газовые турбины и паровые турбины
Mitsubishi Materials	Япония	SOFC, PEMFC	10 кВт
Mitsubishi Heavy Industries	Япония	SOFC, PEMFC	200 кВт. Также разрабатывается SOFC электростанция тройного цикла 700 МВт
Rolls-Royce Group plc	Япония	SOFC	80 кВт
Siemens AG Power Generation	Великобритания	SOFC	125 кВт
Ztek		SOFC	25 кВт – 1 МВт

К сожалению, при использовании водорода возникает целый ряд проблем, требующих решения:

- получение водорода;
- хранение и транспортировка водорода;
- создание водородной инфраструктуры;
- водородная безопасность и экологические проблемы.

Сегодня существуют два практических способа получения водорода. Во-первых, это давно известный электролиз воды — разложение молекул воды на водород и кислород под действием электрического тока. Для производства водорода методом электролиза в настоящее время используется высокопотенциальная энергия, на получение которой, в свою очередь, затрачивается дефицитное ископаемое топливо (уголь, природный газ, нефтепродукты) или электроэнергия, вырабатываемая на электростанциях. Такое производство водорода всегда будет оставаться неэкономичным и экологически опасным и, следовательно, бесперспективным. Поэтому ученые всего мира заняты поиском возможностей для осуществления электролиза с использованием ВИЭ, прежде всего солнечной.

Второй способ (точнее, группа способов) связан с различными технологиями реформинга (разложения) традиционных органических видов топлива с выделением водорода в качестве конечного продукта. Здесь в качестве примера можно назвать паровую конверсию природного газа (метана), газификацию угля. В конце XX века в развитых экономиках около 80 % водорода получали из природного газа и нефтепродуктов. Крупнотоннажное производство водорода осуществляется в основном путем паровой конверсии природного газа. Для осуществления эндотермического процесса паровой конверсии метана сжигается около половины исходного газа. С целью его экономии и снижения выбросов продуктов горения в России, США и Японии продолжаются разработки этого процесса с отводом тепла от высокотемпературного гелиевого реактора АЭС.

Группа атомов алюминия, являющаяся кислотой Льюиса, «притягивает» кислород из воды, а основание Льюиса — водород. В результате связь между ними разрывается. Когда аналогичный процесс происходит с другой молекулой воды, два атома водорода объединяются в молекулу H_2 . Исследователи заявляют, что некоторые из синтезированных ими кластеров разлагают воду при комнатной температуре. Однако эта технология пока не готова для внедрения в промышленность.

В России ученые, занимающиеся разработкой водородной энергетики, не надеются на природные залежи свободного водорода. Большинство из них считают, что самым перспективным методом получения водорода является его синтез на АЭС, поскольку АЭС — одновременно источник высоких температур и сравнительно дешевого электричества.

Из астрономических наблюдений ученые-механики давно поняли, что масса внутри нашей планеты распределяется неравномерно — в центре Земли есть какое-то плотное тяжелое ядро. Это стало известным из расчетов уже в середине XIX века. Позже (в начале XX века) ядро было обнаружено экспериментально при обработке результатов наблюдений сети сейсмических станций, в результате чего нашли так называемую *сейсмическую тень* от некоего очень плотного ядра. Но какое есть плотное и при этом достаточно широко распространенное во Вселенной вещество? Первым кандидатом на эту роль оказалось железо.

Далее нужно вспомнить, что начало XX века — это время бурного становления во всем мире металлургии, доменного процесса. В домне более легкие шлаки всплывают вверх, а тяжелое жидкое железо стекает вниз. Если учесть, что у истоков геохимии стояли люди с металлургическим образованием и опытом, ничего удивительного, что родилась аналогия планеты с домной: когда Земля была еще горячей, тяжелое расплавленное железо под действием гравитации стекло вниз, а легкие силикатные шлаки всплыли вверх. Эта идея, фактически ничем, кроме умозрительных рассуждений, не подтвержденная, утвердилась во всех учебниках по геологии.

Английский физик Хойл в первой половине XX века на уровне чистой идеи высказал предположение, что при формировании планет не столько солнечный ветер распределял вещество от центра к периферии, сколько магнитное поле молодого Солнца. Дело в том, что вещество в туманности, из которой позднее сформировались планеты, было частично ионизировано. При этом атомы разных элементов имеют разную склонность к ионизации: чем дальше электроны от ядра атома, тем легче они могут быть потеряны. Например, электрон с внешней оболочки цезия может быть потерян от света зажженной спички, а вот у гелия или водорода электроны удалить достаточно тяжело, так как они расположены на внутренней орбите максимально близко к ядру, где силы электрического притяжения отрицательно заряженных электронов и положительного ядра велики. Поэтому атомы с высокой способностью к ионизации задерживаются около протосолнца магнитным полем, а другие, с малой способностью к ионизации, свободно улетают. Именно поэтому на периферии Солнечной системы находятся гигантские газовые пузыри, а вблизи — маленькие «металлические» планеты. Другими словами, на стадии формирования планет под влиянием магнитного поля Солнца осуществлялась магнитная сепарация вещества по степени его ионизации.

Зная состав протосолнечного диска (по составу сегодняшнего Солнца), а также потенциалы ионизации, Ларин спрогнозировал состав изначальной Земли, который вошел в противоречие с основной догмой геологии о железном ядре. Для планеты с железным ядром и силикатно-шлаковой оболочкой в составе протоземли должно быть 30 % кислорода и 40 % железа. Однако магнитная сепарация ограничила среднюю концентрацию кислорода в пределах 1–2 %, а железа — примерно в 12 весовых процентов (заметим, что именно такая концентрация железа фактически наблюдается в глубинных мантийных породах). Исходная же концентрация водорода по теории Ларина составляла 60 атомных процентов. Водород оказался везде: при формировании планеты все остальные элементы были в виде водородных соединений (гидридов).

мере в виде гидридов металлов в глубинных зонах. Глубина залегания металлогидридов — сотни километров (напомним, что самая глубокая скважина, пробуренная человечеством, — 15 км). Но в так называемых зонах рифтогенеза*, где земная кора тоньше, кремниевомagneзиево-железистые слои с растворенным водородом подходят к поверхности планеты на 30—40 километров. Для добычи это тоже слишком большие глубины. Однако в этих зонах есть места, в которых металлы отдельными языками дотягиваются почти до самой поверхности и залегают на глубине 4—6 км, что вполне доступно даже при современной технике бурения. Большая часть таких зон находится в океане, но есть несколько и на суше:

Любопытно, что еще в годы советской власти Россия чуть было не вышла в лидеры в области получения водорода и, следовательно, в области водородной энергетики. В октябре 1989 г. академическое совещание в Геологическом институте Академии наук, заслушав доклад Ларина, постановило: «Рекомендовать сверхглубокое бурение (до 10–12 км) в области современного рифтогенеза...Предложить в качестве объекта Тункинскую впадину, где бурение может иметь исключительно большое значение для энергетики и экологии, так как позволит оценить и проверить научно обоснованную возможность обнаружения принципиально нового и экологически чистого энергоресурса, могущего составить конкуренцию традиционным энергетическим источникам...» Но перестройка и последующее крушение СССР помешали реализации этого проекта. В Сибирском отделении АН СССР даже успели сделать технико-экономическую оценку проекта, в соответствии с которой с 10 км² можно было сравнительно легко получать 100–200 млн т.у.т. в год.

Практически во всех национальных программах по водородной энергетике присутствует направление по разработке методов хранения и транспортировки водорода. Правда, Н. С. Прохоров, специалист по безопасности водорода, считает, что эта проблема давно решена. В СССР в свое время производили около 500 тыс. т жидкого водорода в год и перевозили его автомобильным, железнодорожным и воздушным транспортом. Водород в больших количествах нужен был для космоса (напомним, что 15 мая 1987 г. был запущен комплекс «Энергия — Буран», в котором, в частности, использовались водородные топливные элементы). Поэтому проблема хранения и транспортировки водорода сегодня не столько технологическая, сколько экономическая.

При разработке водородных технологий следует учитывать, что водород обладает высокой степенью взрывопожароопасности, поскольку образует с воздухом взрывоопасные смеси.

Кроме того, и у экологов есть свои претензии к водороду, точнее, к перспективе бурного развития водородной энергетики. Они резонно замечают, что сейчас водорода в атмосфере всего 0,00005 % и его влияние на климат Земли ничтожно.

И еще одна экологическая проблема всплывает в связи с развитием водородной энергетики. Дело в том, что одним из основных источников водорода являются природные органические соединения: метан, уголь, древесина и т. д. Специалисты Массачусетского технологического института подсчитали, что выбросы заводов, производящих водород, сведут к минимуму выгоду от полученного экологически чистого продукта.

Термин «Энергия 2,0» впервые был придуман ученым Массачусетского технологического института Нолом Брауном. Он писал, что по аналогии с новым бесплатным поколением Интернета, который теперь называют Интернетом версии 2,0, новую энергию, не загрязняющую окружающую среду, можно назвать энергией версии 2,0. В массовом сознании термин «Энергия 2,0» начал укрепляться после доклада ООН о глобальном потеплении «Изменения климата—2007».