

Трезвый взгляд на водородную энергетику

Доктор химических наук
В.З.Мордкович



В феврале в Москве прошел Международный форум по водородным технологиям для производства энергии. Доклад доктора химических наук В.З.Мордковича произвел сенсацию среди всех участников форума, и особенно бурно реагировали иностранные специалисты. В Объединенном центре исследований и разработок компании «ЮКОС», где работает Владимир Зальманович, подсчитали, какие глобальные последствия повлечет переход на водородную энергетику человечества вообще и России в частности. Выводы, которые следуют из расчетов, однозначны: водород как источник энергии довольно перспективен, но бездумная переориентация на водород может привести к серьезному, а возможно, катастрофическому ухудшению положения дел с запасом полезных ископаемых и гораздо большему загрязнению окружающей среды.

Водородная экономика — это экономика, в которой роль основного средства передачи энергии выполняет водород. Важно, что водород — именно переносчик энергии, а не ее источник. Неоспоримые преимущества нового носителя, во-первых, в том, что при любом выделении

энергии с использованием водорода (топливный элемент, обычное водородное отопление, водородный двигатель внутреннего сгорания) получается весьма благоприятное соотношение энергия/масса, то есть водород — необычайно энергоемкий носитель. Во-вторых, при его использовании действительно не будет выброса вредных веществ (углекислого газа и метана), а это очень хорошо для здоровья человечества и теплового баланса Земли. В-третьих, водород позволяет уйти от прямой электрификации, при которой велики потери при передаче, и к тому же невозможно хранить энергию. Водород позволяет хранить и передавать энергию на расстоянии. Действительно, эти преимущества бесспорны.

Водородную экономику можно разделить на четыре основные составляющие: технология производства водорода; его очистки; хранения и распределения; использования (в частности, в топливных элементах). Для начала мы решили оценить, откуда и сколько водорода можно получить. Источников водорода не так уж много (рис. 1): хими-

Таблица 1

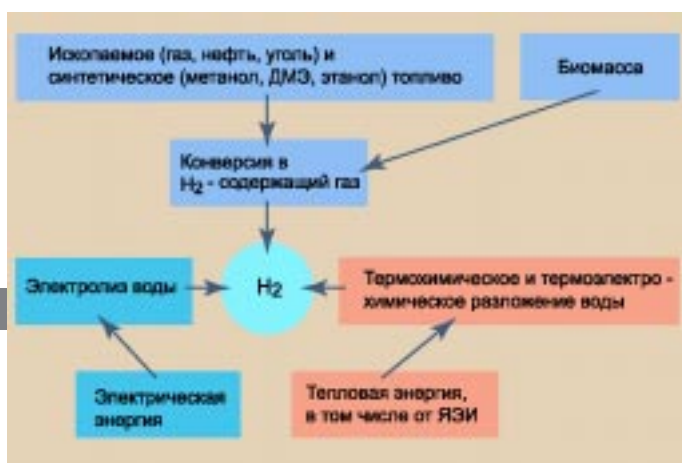
Доступные ресурсы для перехода на водородное топливо

	В мире	В России
Потребляемые моторные топлива (млн. тонн)	2200	60
Водородный эквивалент (млн. тонн)	679	19
Электричество на производство требуемого количества H_2 электролизом (млрд. кВт·ч)	29 700	834
Реальный объем электричества, вырабатываемый электростанциями (млрд. кВт·ч)	15 500	877





1 Источники получения водорода



ческая конверсия органических веществ в синтез-газ (горючих ископаемых, биомассы либо синтетических веществ — метанола, ДМЭ, спиртов); электролиз воды; тепловое расщепление воды, в том числе с использованием ядерной энергии. Прежде чем перейти к нашим подсчетам, не могу не привести данные Минэнерго США. На настоящий момент себестоимость производства водорода следующая: из горючих ископаемых — 1,5 дол./кг, электролизом — 2,5 дол./кг, из биомассы — 2,9 дол./кг.

В расчетах мы исходили из двух предположений. Наибольший экологический эффект мы получим, если перевести на водород весь транспорт больших городов — именно там происходит массованное загрязнение окружающей среды. Поэтому мы моделируем ситуацию, когда все моторные топлива, потребляемые в мире, мы заменяем на H_2 . Водорода в этом случае потребуется в четыре раза меньше (табл. 1) благодаря его энергоемкости и большому КПД водородных приводов по сравнению с двигателями внутреннего сгорания. Вторая очень важная оговорка: во всех расчетах мы принимали допущения, максимально благоприятные для перехода на водородную энергетику, то есть брали максимально высокие КПД топливных элементов, электролизеров и электростанций, которые снабжают их энергией, водородных двигателей. Этот оптимизм связан с тем, что переход произойдет все-таки в будущем и тогда, возможно, все, что нам сегодня обещают инженеры, будет реализовано.

Итак, чтобы с помощью электролиза получить водород, необходимый для замены всех моторных топлив, нужно будет в три раза увеличить мировое производство электроэнергии (табл. 1)! Чтобы сделать нужное количество водорода (КПД электролизеров взят максимальный), выработка всех сегодняшних электростанций недостаточна. Увеличить мощность в три раза придется потому, что уже существующие потребители никуда не денутся, а водород, как мы предположили, пойдет только на автотранспорт. Кстати, сегодня повысить производство электроэнергии даже на 10% — уже сверхзадача.

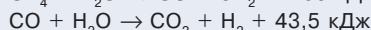
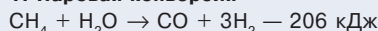
Существенный факт, о котором почему-то часто забывают, — больше половины всей мировой электроэнергии, а точнее, 63–64% производится на тепловых электростанциях, в которых сжигают горючие ископаемые (газ, нефть, уголь). И эти цифры уменьшить намного просто невозможно, пока не изобретен термоядерный синтез или что-то подобное. Ну может быть, со временем удастся отвоевать процентов 15%: увеличить долю атомных электростанций на 5–10%, увеличить долю возобновляемых источников — солнечных и ветровых, вклад которых пока что исчезающе мал. На сегодня единственный технологически реальный способ намного увеличить производство электричества — всю Землю застроить ядерными реакторами. Но даже Франция, где в свое время была поставлена национальная за-

дача всемерно увеличить производство энергии на АЭС, не смогла сильно перевалить за 50%, и никто не собирается повторять это достижение, учитывая все сопутствующие сложности и опасности. В результате после максимального использования всех альтернативных возможностей и при условии, что потребности человечества останутся прежними, может быть, только половину электроэнергии будут производить на тепловых электростанциях, используя все те же нефть и газ. Но никак не меньше. Это очень важно, поскольку любое увеличение мощности электростанций, которое понадобится для производства водорода электролизом, приведет к увеличению объема сжигания горючих ископаемых.

Отсюда первый фундаментальный вывод: переход на водородное топливо в ближайшие десятилетия потребует совсем другого пути, а именно водородной переориентации нефте- и газоперерабатывающей промышленности. Иначе говоря, промышленность, которая сегодня из горючих ископаемых делает в основном моторные топлива, должна будет производить главным образом водород для распределения его в сетях новой экономики. Конечно, какое-то количество моторных топлив все равно останется. Но, как и сегодня моторные топлива, 90% водорода будет производиться из природного газа, нефти и немного из угля, и этот процесс должен охватить всю нефте- и газоперерабатывающую промышленность. Тогда станет возможным убрать загрязнения из больших городов и перенести их в те места, где будут производить водород.

Следующий ключевой вопрос: как это делать? Существует несколько путей получения водорода из природного газа (рис. 2), и при переходе на водородную энергетику есть

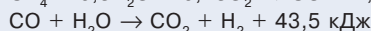
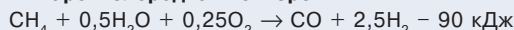
1. Паровая конверсия



Топливо используется:

- на технологию
- для поддержания реакции
- на парообразование

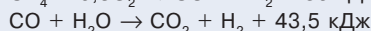
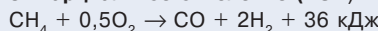
2. Парокислородная конверсия



Топливо используется:

- на технологию
- для поддержания реакции
- на парообразование
- на выделение кислорода из воздуха

3. Парциальное окисление (POX)



Топливо используется:

- только на технологию и парообразование (современный процесс парциального окисления не требует блока разделения воздуха)

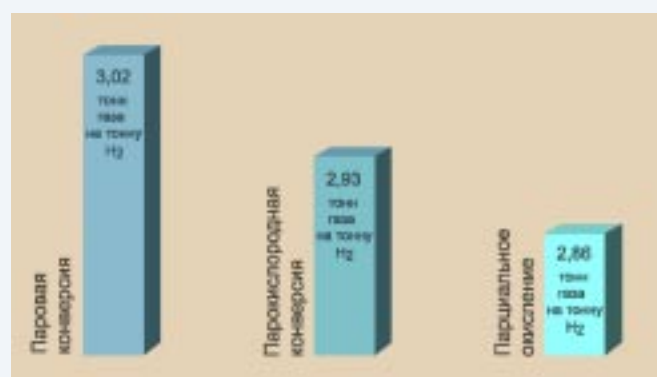
2 Основные методы получения H_2 из природного газа

соблазн выбрать простое, отработанное решение — однако, как мы увидим далее, неверное. (Мы берем сразу природный газ, поскольку в нем самое большое содержание водорода по сравнению с нефтью и углем.)

Простым решением будет получение водорода с помощью паровой конверсии (реакция 1) — этот процесс известен почти сто лет и хорошо изучен, для него есть очень хорошие катализаторы, и его отлично умеют проектировать сотни фирм. Более того, оборудование для него не очень дорого по сравнению с конкурентными технологиями. В уравнении видно, что процесс происходит в две стадии: первая — сильно эндотермическая реакция метана с водой, потом конверсия CO. В паровой конверсии топливо потребуется непосредственно на получение из него водорода, а также для поддержания эндотермической реакции (смесь надо подогревать) и на образование пара в двух местах. Это немало. Второй способ — парокислородная конверсия (комбинированная). Ее проводят в одном или нескольких реакторах с водой и кислородом, предварительно выделенным из воздуха на криогенных установках. Реакция тоже слабо эндотермическая (то есть требует подогрева), и после первой стадии надо опять же проводить конверсию CO. В этом случае топливо расходуется так же, как и в первом процессе (на технологию, подогрев, паробразование), а еще и на получение кислорода из воздуха. И наконец, новый, еще не очень освоенный процесс — парциальное окисление, который требует доработки, особенно в наиболее выгодном мембранном варианте. Но в нем топливо будет нужно только на технологию и паробразование.

Почему обманчива выгода паровой конверсии? Кажется, будто на одну молекулу метана получается четыре молекулы водорода, а при парциальном окислении всего 2,5. Но если учесть, что природный газ метан помимо стехиометрии используется еще и на другое, то картина получится совсем обратная (рис. 3), и малоосвоенный процесс парциального окисления требует почти на 10% меньше метана.

Подобное же соотношение мы получим, если сравним два автомобиля одинаковой мощности (рис. 4), заправленные 1 т водорода или 3,2 т моторного топлива (с такой заправкой они проедут одинаковое расстояние). Для производства 3,2 т бензина или дизельного топлива нужно 3,6–4,5 т нефти или 4,5–4,8 т природного газа. Разброс объясняется тем, что расход ископаемых на получение нужного количества бензина, как известно, зависит от глубины переработки (для производства одного и того же количества моторного топлива в России по сравнению с США расходуют по крайней мере на 20% больше



3
Количество природного газа, необходимое для получения H₂



4
Количества нефти и газа, необходимые для одинаковой заправки машины

нефти). Что касается водорода, то для производства 1 т H₂ потребуется 3,4–3,6 т нефти или 2,8–3,1 т газа, причем очевидное преимущество у газа, поскольку в нем, как мы уже упоминали, водорода вдвое больше. Из приведенных цифр видно, что оптимистичный сценарий нужно еще реализовать: и разница между 2,8 т и 3,1 т природного газа — это разница между хорошо и плохо организованными способами получения водорода. Цена вопроса очень большая. Если посчитать все капитальные и эксплуатационные затраты на три описанных процесса получения водорода из газа (рис. 5), то будет понятно, что современный метод парциального окисления заметно экономичнее. Тем не менее действительно хочется сде-

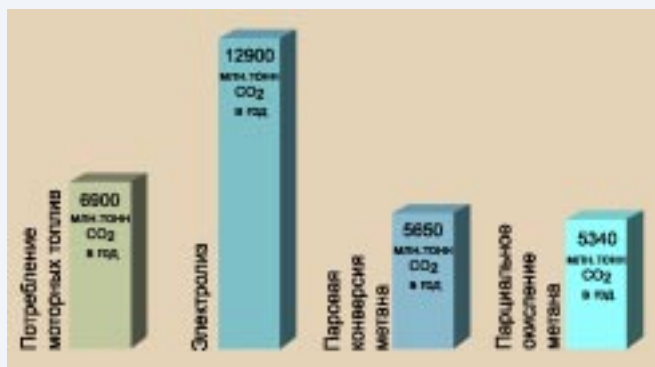


Таблица 2
Проблемы с Киотским протоколом

	В мире	В России
Потребляемые моторные топлива (млн. тонн)	2200	60
Водородный эквивалент (млн. тонн)	679	19
Объем метана, необходимого для производства требуемого количества H ₂ (паровая конверсия) (млн.тонн)	2060	58
Объем метана, необходимого для производства требуемого количества H ₂ (парциальное окисление метана) (млн.тонн)	1940	54
Эмиссия CO ₂ в результате потребления моторных топлив (млн. тонн)	6900	188
Эмиссия CO ₂ в результате перехода на водород (мазут — электричество — электролиз) (млн. тонн)	12 900	361
Эмиссия CO ₂ в результате перехода на водород (метан — паровая конверсия метана) (млн. тонн)	5650	159
Эмиссия CO ₂ в результате перехода на водород (метан — парциальное окисление метана) (млн. тонн)	5340	148



5
Затраты на разные способы получения водорода



6
Выбросы CO₂ сейчас и при переводе транспорта на водород

лать выбор в пользу двух первых, поскольку они доступны, понятны и хорошо разработаны — только запуская. И это второй фундаментальный вывод: надо очень хорошо считать, прежде чем выбирать способ получения водорода.

Есть еще один важный вопрос — выбросы CO₂ и, в частности, проблемы с исполнением Киотского протокола. Рассмотрим переход на водородную энергетику с этой точки зрения. Сегодня в результате сжигания моторных топлив на Земле выделяется почти 7 миллиардов тонн CO₂. Из них 188 миллионов тонн — в России. Эмиссия сосредоточена в городах, и если мы заменим бензин на водород, то в них выбросы станут меньше. Но они не исчезнут вообще, а просто, как уже упоминалось, будут выведены в места производства водорода. На глобальный баланс углекислого газа это не повлияет, и вот почему.

Вернемся к электролизу и посмотрим, сколько углекислого газа будет выделяться по цепочке мазут — электричество — электролиз. Напоминаю, электролиз — идеальный, с КПД 90%. Эта «экологически чистая» технология приведет к катастрофическому ухудшению — CO₂ будет выделяться вдвое больше (табл. 2, рис. 6)! Кстати, электролиз — это самый любимый адептами водородной энергетики метод. Совсем другое дело, если производить водород из горючих ископаемых. При получении водорода из метана возможно даже некоторое снижение выбросов CO₂. Но если мы будем делать водород из нефти, то экологический выигрыш по CO₂ станет уже существенно меньше (в ней меньше водорода), и еще хуже дело обстоит с углем. И разброс цифр между этими разными способами получения H₂ будет все время увеличиваться.

Хочется еще раз подытожить, что же у нас получилось:

1) электричества, которое вырабатывают все сегодняшние электростанции, недостаточно для того, чтобы произ-



РЕСУРСЫ

вести нужное количество водорода, даже только для замены моторных топлив. Более половины этого электричества на сегодня получают после сжигания горючих ископаемых, а если наращивать его производство, то их потребуются еще больше;

2) поэтому переход к водородной энергетике потребует водородной переориентации нефте- и газоперерабатывающей промышленности (возможно, и углеродперерабатывающей). Для производства водорода понадобится почти столько же полезных ископаемых, сколько их нужно сейчас. Если использовать новые технологии, а не отлаженные, то можно улучшить ситуацию: сэкономят ископаемые и немного уменьшат выброс CO₂. Правильное поведение — верно выбранные технологии и разработка выигрышных направлений в сумме могут действительно улучшить положение на десятки процентов.

Так что думать, и считать, и семь раз отмерить, а только потом действовать — другого пути нет.

P.S. Вы спросите: а как же получение водорода конверсией биомассы? Да, этот путь возможен, но с двумя оговорками. Во-первых, на ситуацию с выбросами CO₂ это не повлияет вообще. А во-вторых, хочу напомнить, что на сегодня практически все плодородные земли распаханы и при этом сотни миллионов людей голодают. Даже представить невозможно, сколько миллиардов гектаров надо выделить на выращивание рапса или других технических культур, чтобы из них получать альтернативное топливо, в том числе водород. Как локальное решение — это реально, но в глобальных масштабах об это говорить несерьезно.

Еще один вопрос: а как быть с солнечной энергетикой, нельзя ли при ее помощи добыть большое количество электричества для получения водорода? Для того чтобы покрыть сегодняшнюю мировую потребность в электричестве, надо покрыть 4% земного шара фотоэлементами с хорошим для них КПД 10%, а это очень много. Увы, пока это очень дорого, и всерьез об этом говорить не приходится. Конечно, если создать систему концентрирующих космических зеркал, то ситуация изменится, но зеркала — еще более фантастичный проект, чем термоядерная энергия.

Нельзя ли использовать водород из водородной мантии? Можно, если ее откроют и вскроют — а это еще один фантастический сюжет.

А нельзя ли закачивать CO₂ под землю? Можно, но для этого надо опять-таки сжигать ископаемое топливо, чтобы приводить в действие компрессоры. Правда, сегодня углекислоту из дымовых газов надо сжимать, чтобы закачать под землю, а водородные технологии позволяют получать CO₂ при давлении 18 атмосфер, то есть в сжиженном виде, и тогда его легче загонять под землю. Только для этого рядом должен быть подходящий пласт, и еще должно выполняться много других условий.

