

Водород в энергетической и климатической повестке



Доцент Высшей школы атомной и тепловой энергетики ИЭ СПбПУ Ярослав Владимиров рассказывает о перспективах водорода и о разработках Политеха в области водородной энергетики.

Развитие «зеленой» экономики, сокращение объема потребления нефтепродуктов обуславливает активное развитие водородной энергетики. Уже в недалеком будущем это позволит достичь экологически чистого производства и транспорта.

Водородная энергетика основана на использовании водорода в качестве энергоносителя, то есть изначально нужно затратить энергию на производство водорода, а затем водород можно снова трансформировать в энергию. Водород – наиболее распространенный элемент на поверхности Земли и в космосе, теплота его сгорания на единицу массы в 2,5 раза превосходит калорийность природного газа, продуктом сгорания в кислороде являются пары воды. Водородная энергетика может рассматриваться как безуглеродная, если для производства водорода использована энергия возобновляемых источников.

На настоящий момент наиболее доступным является водород, произведенный посредством парового риформинга метана, однако в таком процессе выделяется углекислый газ, что дискредитирует саму идею перехода на водородную энергетику с целью декарбонизации. Снизить уровень выбросов углекислого газа можно за счет водорода, полученного с использованием низкоуглеродных технологий. Для этого можно применять технологии

улавливания и хранения углекислого газа при паровом риформинге метана, а также электролиза воды, в первую очередь с помощью энергии объектов атомной, гидро-, ветряной и солнечной энергетики.

5 августа 2021 года правительство Российской Федерации утвердило Концепцию развития водородной энергетики в РФ, тем самым Россия вошла в группу стран, поддерживающих и работающих в направлении перехода к водородной энергетике.

Водород в 2021 году прочно занял свое место в энергетической и климатической повестке. О нем говорят на всех крупнейших конференциях и форумах, связанных с энергетикой. Тема водорода затрагивалась на церемонии объявления шорт-листа номинантов на премию «Глобальная энергия», прошедшей в стенах Санкт-Петербургского политехнического университета, Петербургском международном газовом форуме и, конечно, на 16-й Российской конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». Экспортный потенциал водорода интересен всем крупнейшим энергокомпаниям России.

Перспективы

В среднесрочной перспективе следует ожидать многократного роста спроса на водород как на принципиально новый энергоноситель. Причем именно на «безуглеродный» водород. Если все смелые прогнозы сбудутся, то мы станем свидетелями глобального энергетического перехода. Дело в том, что сейчас водородная энергетика только зарождается, активный интерес к ней мировое сообщество начало проявлять в 2017 году (Япония), к концу 2021 года число стран с принятой водородной стратегией приблизилось к 25. Основные технологии, как по получению самого водорода, так и по получению энергии из него, сегодня носят, скорее, опытный, а не серийный характер. А как все новое, данные технологии дороги и в данный момент практически не могут конкурировать с традиционными электростанциями. Но со временем, при условии совершенствования и поиска новых подходов, следует ожидать удешевления водородной энергетики и роста ее конкурентоспособности, как, например, уже произошло с солнечной энергетикой (PV-элементы). Повысить конкурентоспособность водорода также может введение углеродного налога. От его величины будет зависеть инвестиционная привлекательность водородных технологий. Прогнозы по плате за выбросы тоже различаются: в Китае, например, они могут составить \$6 за тонну CO₂.

О стоимости водорода как энергоресурса в данный момент можно говорить тоже крайне приблизительно, ведь глобальный рынок водорода как энергоносителя еще не сформирован. В данный момент в мире стоимость водорода, произведенного методом электролиза (здесь следует обратить внимание на то, что как энергоноситель он практически не используется, а находит применение в основном в химической промышленности), колеблется от \$4 до 5,5 за кг. В энергетическом эквиваленте это на 65% дороже, чем природный газ (дано сравнение для стран Евросоюза), в России разница будет еще больше.

В плане реализации всей технологической цепочки производства электроэнергии из водорода также существует немало неразрешенных вопросов. Здесь уместно рассмотреть все этапы: производство, транспорт, хранение, генерацию энергии.

Производство

В данный момент к промышленно освоенной технологии производства водорода на территории России можно отнести паровую конверсию метана с получением так называемого «серого» водорода. В условиях перехода к низкоуглеродной экономике спроса на такой водород не будет, так как при его производстве образуется углекислый газ, который выбрасывается в атмосферу. При такой конъюнктуре спросом будет пользоваться только тот водород, при производстве которого в атмосферу не выбрасывается углерод, «голубой» (паровая конверсия метана с применением технологий улавливания CO₂ (Carbon Capture technologies)), «бирюзовый» (пиролиз метана с захоронением или использованием твердого углерода), «зеленый» (производство водорода электролизом, электроэнергия генерируется посредством возобновляемых источников энергии) и «желтый» (производство водорода электролизом на атомных электростанциях). В направлении разработки и совершенствования данных технологий мировая наука и промышленность и ведут сейчас работу.

Серийное оборудование по крупнотоннажному производству такого водорода на данный момент практически отсутствует. Себестоимость производства такого водорода в разы выше, чем при паровой конверсии метана.

Транспорт

При транспортировке водорода возникают две большие проблемы, связанные с его физическими и химическими свойствами. Первая состоит в том, что водород – это легкий и летучий газ. При нормальных условиях плотность водорода в десять раз ниже, чем плотность природного газа, в сжиженном состоянии (- 253°C, 1 бар) – в шесть раз. Теплота сгорания единицы объема водорода (как в газообразном, так и в сжиженном состоянии) в три раза ниже, чем у природного газа. То есть, чтобы передать одно и то же количество энергии (при одинаковом давлении), нужно прокачать по трубопроводу в три раза больше по объему водорода, чем природного газа. Более того, температура кипения водорода значительно ниже, чем у природного газа, что усложняет и удорожает процесс его ожижения.

Вторая проблема – водородное охрупчивание металла, или водородная коррозия. При взаимодействии металла с чистым водородом довольно быстро изменяются механические свойства, и происходит его разрушение.

Перспективными способами для транспортировки водорода в России является трубопроводный транспорт, автомобильный, морской, железнодорожный для

транспортировки в сжатом, сжиженном или связанном состоянии, в том числе в виде аммиака, жидких или твердых носителей. Основной материаловедческой проблемой при этом является охрупчивание металлов водородом. Проблема водородной хрупкости тесно связана с хладостойкостью конструкционных материалов, так как большая часть России – это территории с низкой годовой температурой. Перед учеными и инженерами стоит задача разработки современных энергетических систем потребления водорода, включая создание турбогенераторов и двигателей. Также по водородной тематике требуется разработка нормативной документации по материалам, технологиям, конструкциям.

Таким образом, транспортировка чистого водорода накладывает определенные, повышенные по сравнению с системами транспорта природного газа, требования, как к материалам, так и производительности системы транспорта.

Опыт успешной эксплуатации систем транспорта водорода на дальние расстояния (как в газообразном, так и сжиженном виде) в мире, насколько мне известно, отсутствует. Исключения составляют резервуары сжиженного водорода емкостью порядка 1 500 кубических метров, установленные на космодромах.

Хранение

В системах хранения главные проблемы опять-таки замыкаются на большом удельном объеме, летучести и взрывоопасности водорода. Ученые предлагают хранить водород в сжатом состоянии в ресиверах большой емкости. Водород под атмосферным давлением может закачиваться в подземные солевые каверны, также возможно хранение водорода в сжиженном состоянии с организацией отдельной системы ожижения отпарного газа. Особняком стоит вопрос хранения водорода в химически связанном состоянии.

Генерация энергии

Генерация электрической энергии из водорода возможна либо путем его сжигания, либо посредством специальных электрохимических устройств – топливных элементов.

На текущий момент промышленные энергетические установки (энергетические котлы, газовые турбины и так далее), способные сжигать чистый водород, отсутствуют. Над их созданием трудятся ученые и инженеры по всему миру. Одна из проблем сжигания чистого водорода заключается в том, что скорость его горения в восемь раз быстрее, чем у метана, и, соответственно, сам факел очень короткий, также многократно увеличивается риск обратного заброса пламени в горелку. В частности, поэтому существующие газотурбинные установки и горелки котлов, работающие на природном газе, не подходят для сжигания чистого водорода. Вторая проблема заключается в том, что температура факела при горении водорода на 15% выше, чем при горении природного газа (порядка 2 200°C), соответственно, это провоцирует повышенное образование термических оксидов азота,

которые являются вредоносными для людей и окружающей среды. Среди российских проблем использования водорода в качестве энергетического топлива хотелось бы отметить отсутствие на сегодняшний день утвержденных норм промышленной безопасности по использованию водорода в качестве топлива на тепловых электростанциях и котельных.

Энергетические топливные элементы сейчас также находятся на стадии разработки. В мире уже успешно используются топливные элементы на автомобильном транспорте, однако в силу малого ресурса для непрерывной работы в качестве источника электрической энергии данные топливные элементы применяться не могут.

В литературе встречается информация об опытных образцах энергетических топливных элементов мощностью 300 кВт, 1,2 и 2,4 МВт (FuelCell Energy) и 30 МВт (Ansaldo Fuel Cells). Но, во-первых, это еще не серийная продукция, во-вторых, совершенно очевидно, что единичная мощность таких топливных элементов недостаточна для применения в большой энергетике. На мой взгляд, мировая водородная энергетика пойдет именно по пути использования топливных элементов.

Подводя итоги, хочется сказать, что мы сегодня являемся свидетелями «энергетической революции», нового энергоперехода, где водородная энергетика играет одну из ведущих ролей. Конечно, в силу инновационности задачи есть много технических проблем и вопросов. Это новая и перспективная область энергетики, которая открывает простор для творчества ученым и инженерам. Конечно, прогресс невозможен и без подготовки кадров для новой отрасли, куда должны внести свой вклад ведущие технические вузы России, в том числе Петербургский Политех.

Развитие водородной энергетики поддерживается в вузе в рамках федеральной программы «Приоритет-2030». Так, исследования ведутся сразу в нескольких областях: материалы для водородной энергетике, твердооксидные топливные элементы, производство «голубого» водорода на ТЭЦ. В 2022 году ученым Политехнического университета удалось разработать принципиальную схему ТЭЦ с применением теплонасосных установок в технологической схеме парового риформинга метана. Интеграция данной установки в тепловую схему ТЭЦ позволит трансформировать ее в тригенерационную установку с получением сразу трех полезных продуктов: электрической энергии, тепловой энергии водорода, что обеспечит повышение коэффициента использования теплоты топлива на 5%. Также закуплено оборудования, собраны исследовательские стенды и проведены первые эксперименты в области подбора материалов для систем транспортировки водорода; идет лабораторная апробация разработанной технологии создания мембранно-электронного блока твердооксидного топливного элемента, не имеющей аналогов в России и имеющей мировой потенциал развития. Технология позволяет снизить диапазон рабочей температуры топливного элемента до 500-700°C. Участвуя в конкурсе в рамках проекта, Политех выбрал исследовательский трек и поставил цели по усилению своего влияния на федеральном

уровне и увеличению вклада в развитие всей страны. Водородная энергетика в настоящее время является одним из важных стратегических направлений науки и техники и может послужить основой для перехода экономики России на более высокий уровень по энергоэффективности, производительности и экологии, а также обеспечить страну еще одним экспортным ресурсом, который, возможно, в будущем вытеснит с рынка столь привычные сегодня углеводороды. У Политеха есть уверенность в том, что партнерство с регионом – залог успеха вклада университета в социально-экономическое развитие на федеральном уровне. Санкт-Петербург – один из крупнейших городов страны с развитой промышленностью и высочайшим уровнем человеческого капитала. Это и есть лучшая экспериментальная площадка для апробации новых разработок, неиссякаемый источник талантов. Именно поэтому СПбПУ видит свое дальнейшее развитие не только как сотрудничество с ведущими исследовательскими организациями, но и как партнерство с регионом и его крупнейшими предприятиями для усиления влияния на всю страну. Хочется отметить, что разработки вуза в области водородной энергетике интересуют представителей реального сектора экономики: в 2022 году выполнен ряд работ по водородной тематике для двух организаций из «Газпрома», ведутся переговоры с предприятиями «Росатома». Вуз занимается опережающей инженерной подготовкой. Будущие выпускники могут получить несколько специальностей и опыт проектной деятельности еще во время учебы в университете. В 2023 году будет осуществлен первый набор студентов в магистратуру по программе подготовки «Водородная энергетика».

Водородная экономика как панацея

Почему вообще появилась потребность в таком топливе, как водород? Сейчас в глобальном масштабе на прямое сжигание топлива для транспорта и отопления приходится более половины выбросов парниковых газов, значительная часть выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и около двух третей использования первичной энергии. Большинство прогнозов предсказывают: даже при продолжающемся прогрессе в энергетических технологиях выбросы парниковых газов и загрязнителей воздуха в результате использования топлива будут расти в течение ближайшего столетия из-за растущего спроса, особенно в развивающихся странах. Безопасность энергоснабжения – одна из важнейших глобальных задач, стоящих перед человечеством.

Было предложено множество альтернативных видов топлива, которые так или иначе могут помочь решить будущие проблемы окружающей среды и энергоснабжения. Эти виды топлива включают метанол, этанол, синтетические жидкости (например, диметиловый эфир, полученный из природного газа или угля), сжатый природный газ, бензин или

дизельное топливо новых поколений, водород. И именно водород предлагает наибольшие потенциальные преимущества для окружающей среды и энергоснабжения.

Как и электричество, водород является универсальным энергоносителем, который может быть получен из множества широко доступных первичных (то есть естественных) источников энергии, включая природный газ, уголь, биомассу (сельскохозяйственные или лесные отходы, или энергетические культуры), отходы, солнечный свет, ветер и ядерную энергию. Водород можно сжигать или подвергать химической реакции с высокой эффективностью преобразования и практически нулевыми выбросами в месте использования. Если водород производится из возобновляемых или ядерных источников либо из декарбонизированных ископаемых источников, в которых во время обработки улавливается и надежно хранится углекислый газ, становится возможным производить и использовать топливо в глобальном масштабе с нулевыми или очень низкими выбросами загрязнителей воздуха (оксиды азота, оксид углерода, оксиды серы, летучие углеводороды и твердые частицы) и парниковых газов. Энергетическая система будущего, основанная на электричестве и водороде – так называемая водородная экономика, выглядит как идеальное долгосрочное решение экологических проблем, связанных с энергией.

Вспомним школу

Почему именно водород? Есть несколько причин, делающих этот газ великолепным выбором для экономики будущего.

1. Водород – самый распространенный элемент во Вселенной. Около 75% всей материи – это именно водород! Даже человек примерно на 10% состоит из H_2 . В отличие от нефти, газа, угля, урана и других видов ископаемого топлива, запасы водорода в буквальном смысле неисчерпаемы.
2. Сгорание водорода происходит по формуле, знакомой любому восьмикласснику:
 $H_2 + O_2 = H_2O$. То есть выхлопной газ у водородомобилей – это чистейший водяной пар. Сложно представить себе более «зеленое» топливо, чем водород.
3. Колоссальная теплотворная способность. Удельная теплота сгорания у водорода не просто выше, чем у любого другого топлива, а выше в несколько раз. Для водорода этот показатель равен 141 кДж/кг, для бензина – 43 кДж/кг, для угля – 30 кДж/кг. Это означает, что при том же КПД удельный расход топлива у водородных двигателей должен быть значительно ниже, чем у углеводородных.
4. Высокая скорость сгорания. Позволяет увеличить мощность двигателей.
5. Устойчивость горения даже в составе экстремально бедных смесей. Дает возможность

максимально экономно расходовать топливо.

6. Легкость воспламенения. Легкий запуск в любую погоду.

Почему же мы все еще не ездим на водородомобилях и не летаем на водородолётах? К сожалению, есть у H_2 и недостатки.

1. Несмотря на исключительную распространенность в масштабах Вселенной, на Земле водород практически не встречается в чистом виде – только в виде соединений. То есть для его получения (из воды, природного газа, и т.д.) необходимо затрачивать энергию.
2. Легкость воспламенения оборачивается исключительной взрывоопасностью. Смесь водорода с кислородом имеет собственное название: гремучий газ. Он горюч в широком диапазоне концентраций водорода – от 4 до 75%. Причем для воспламенения гремучего газа достаточно искры с энергией 17 микроджоулей – например «статики» от синтетической одежды! Другими словами, утечка водорода почти гарантированно приводит к взрыву газа.
3. Утечку водорода зачастую сложно предотвратить, ведь этот газ обладает способностью улетучиваться даже из закрытых сосудов, в которых хранится, например диффундировать сквозь металлические стенки газового баллона. При этом происходит еще и охрупчивание стали. Ситуация усугубляется тем, что водород не имеет запаха и утечку сложно обнаружить.
4. Водород – самый легкий газ. Для промышленного использования его приходится сжимать или сжижать, то есть емкости для хранения и трубы для перекачки H_2 должны быть герметичными и высокопрочными, обеспечивая сохранность газа под давлением в сотни атмосфер. Но и плотность жидкого водорода – лишь 0,07 г/см³, что в 10 раз ниже плотности бензина. Соответственно, для получения того же теплового эквивалента потребуется значительно увеличивать емкости топливных баков. Правда, масса топлива при этом будет заметно ниже.

Эти недостатки стали причиной того, что самый распространенный во Вселенной элемент применяется в современной экономике лишь очень незначительно и практически не используется в качестве топлива. А ведь попыток исправить эту ситуацию было немало.