

ВОДОРОД – ПЕРСПЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Иван Койнов,
аспирант кафедры географии мирового хозяйства
географического факультета, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова

Николай Слуга,
д.г.н., профессор кафедры географии мирового
хозяйства географического факультета,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Аннотация. Водород давно является промышленным газом. Существует потребность в технологии для интеграции возобновляемых источников энергии и замены ископаемого топлива в транспорте и жилищно-коммунальном хозяйстве. Водород рассматривается как перспективное средство достижения этих целей и перехода к энергетике и транспорту без выбросов CO₂.

Ключевые слова. Водород, энергетический переход, интеграция возобновляемых источников энергии, зеленая энергетика, топливная ячейка.

ANNOTATION. Hydrogen has long been an industrial gas. There is a need for technologies for the integration and replacement of fossil fuels in transport and utilities. Hydrogen is considered as a promising way of achieving these goals, and the transition to energy and transport without CO₂ emissions.

KEY WORDS. Hydrogen, energy transition, RES integration, green energy, fuel cell.

Актуальная мировая энергетическая и климатическая политика подталкивает мировую энергетическую отрасль к поиску и внедрению решений, вырабатывающих энергию без выделения CO₂. Наиболее распростра-

ненным подходом в текущих условиях являются активное замещение электростанций на ископаемом топливе возобновляемыми источниками электроэнергии (ВИЭ) и электрификация транспорта.

Такой подход в современной системе цепочек поставок в энергетике и промышленности имеет технологические пределы роста. Выработка электроэнергии на ВИЭ является стохастической и требует резервирования устойчивыми и гибкими генерирующими мощностями для покрытия графика ее потребления. При этом доля вырабатываемой электроэнергии, которая должна быть обеспечена резервом на включенных маневренных газовых электростанциях, растет вместе с долей выработки электроэнергии на ВИЭ. Также открыт вопрос сезонной неравномерности выработки электроэнергии.

Многие промышленные производства, такие как металлургия и производство цемента, теплоемки. Выработка тепла для них сегодня возможна лишь путем сжигания углеводородов. Электрификация транспорта ограничена запасами лития и неэффективностью использования аккумуляторов в грузовых крупнотоннажных автомобилях, осуществляющих междугородние перевозки.



В водородном транспорте среди множества пилотных проектов и прототипов уже запущены в мелкосерийное производство легковые автомобили, такие как Toyota Mirai
Источник изображения: <https://pol-z.ru/wp-content/uploads/2014/12/Toyota-Mirai.jpg>

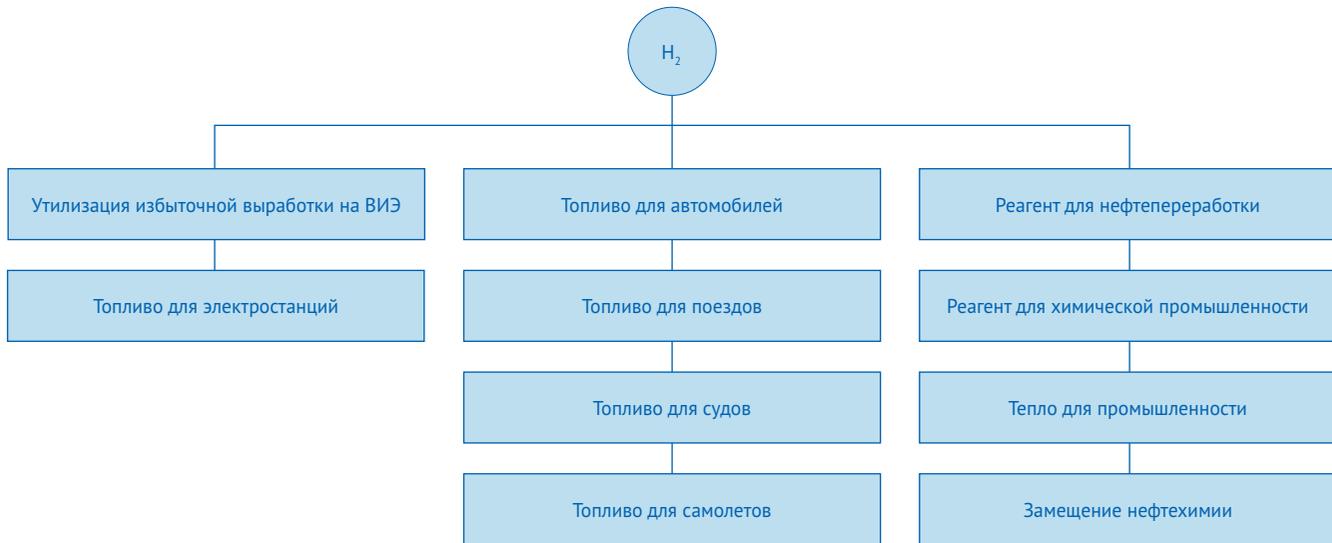


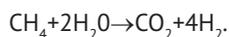
Рисунок 1. Основные направления использования водорода в современных условиях и ближайшем будущем
Источник: составлено авторами

Перспективной и все более популярной в мировом энергетическом сообществе является концепция использования водорода в качестве средства хранения и транспортировки энергии, позволяющего снять ряд указанных выше технологических ограничений на пути к безуглеродной энергетике.

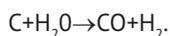
Методы производства

Водород является промышленным газом. По данным МЭА, в 2018 г. 38 млн т водорода было использовано в нефтепереработке, 31 млн т – в производстве удобрений и 4 млн т ушло на прочие нужды.

Самый распространенный метод производства водорода – паровой риформинг метана. Водяной пар смешивается с природным газом, и под действием тепла выделяются водород и углекислый газ. Химическая реакция в этом процессе выглядит следующим образом:



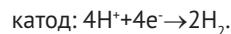
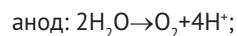
Следующим по распространенности методом получения водорода является газификация угля. Реакция также проходит при высокой температуре:



Эти методы наиболее дешевы в производстве на современном этапе развития технологий, и на них при-

ходитя 99% произведенного в мире водорода (по данным МЭА, 71% составляет риформинг метана и 28% – газификация угля). Вместе с тем при таком уровне распространенности эти технологии неприменимы в движении к безуглеродной энергетике в связи со значительными выбросами CO_2 в процессе производства. Перспективным является третий метод производства водорода – электролиз воды, на который сейчас приходится лишь 1% от вырабатываемого водорода.

Химическая реакция проходит под действием электроэнергии с использованием щелочного электролита и протон-проводящей мембраны:



Данный метод является наиболее дорогим и не используется в промышленных целях. По данным ИЦ EnergyNet, в 2018 г. стоимость производства водорода риформингом метана колеблется в пределах 1,6–1,9 долл./кг водорода, газификацией угля – 1,8–2,2 долл./кг, электролизом – 3,3–5,2 долл./кг.

Однако в реакции электролиза не выделяется углекислый газ, и при развитии технологий водород, произведенный электролизом воды с помощью источников энергии и АЭС, будет являться безуглеродным способом хранения,

транспортировки и перераспределения энергии. Детально перспективные направления использования водорода и уже реализуемые меры рассмотрены далее.

Использование водорода

С учетом современного состояния технико-технологического развития ведущих промышленных держав мира и экономической целесообразности активное использование водорода наиболее реалистично и схематично можно представить по ряду уже частично апробированных направлений (рис. 1).

В электроэнергетике

В классической энергосистеме выработка электростанций регулируется диспетчером для поддержания баланса спроса и предложения в каждый момент времени. Производство электроэнергии с помощью ВИЭ сопряжено с рядом технологических проблем. Ключевой из них является нерегулируемый волатильный график суточной выработки и значительные сезонные изменения выработки. В результате при росте доли ВИЭ в энергобалансе режим работы энергосистемы приближается к аварийному с постоянными избытками и дефицитами вырабатываемой электроэнергии.

Электролиз воды является электроемким процессом. Нарботка водорода в часы избытка по низким ценам на электроэнергию позволяет утили-



Компания Alstom представила поезд на водородном топливе с дальностью хода 600 км. Его использование целесообразно на неэлектрифицированных участках
 Источник изображения: <https://yandex.kz/collections/card/5df44f99c8ba0543701b0631/>

зировать избыточную выработку ВИЭ и поддерживать энергобаланс.

В дальнейшем водород может быть использован для выработки электроэнергии как на классических газовых электростанциях в смеси с метаном, так и с помощью топливных элементов, преобразующих водород в электроэнергию без процесса горения. Этот метод обладает большим КПД, нежели в классическом цикле Ренкина (до 80% против 40% у ТЭЦ). На современном этапе в промышленную эксплуатацию компанией Toyota уже введены транспортные топливные элементы. Определенным успехом во внедрении энергетических топливных элементов может похвастаться, например, компания BloomEnergy, поставляющая решения для электроснабжения серверов ИТ-гигантов Кремниевой долины.

На транспорте

Водород на транспорте может применяться как в существующих ДВС, так и с использованием топливных элементов. Но в связи с более высоким КПД все современные разработки направлены на использование топливных элементов в сочетании с электродвигателями. В водородном транспорте среди множества пилотных проектов и прототипов уже запущены в мелкосерийное производство легковые автомобили. Наиболее известными представителями среди них являются Toyota Mirai и Honda Clarity.

Делфтский технический университет приводит сравнение характеристик Tesla Model S и Toyota Mirai. Топливная система Tesla весит 600 кг

с дальностью хода 475 км и временем заряда на Tesla Supercharger за 33 мин. до 80%. Топливная система Toyota Mirai весит 200 кг с дальностью хода 500 км и скоростью заряда менее 5 мин. до 100%. Среди прототипов уже были представлены автомобили с дальностью хода 1000 км.

Достаточно широко (по данным ЭЦ «Сколково», более 11 тыс. шт.) используются промышленные грузовики, в первую очередь строительная и погрузочно-разгрузочная техника. Перспективным считается развитие автобусных и грузоперевозок по фиксированным маршрутам средней дальности со строительством заправочных станций в ключевых логистических узлах.

В ж/д транспорте также существуют рабочие прототипы. Например, компания Alstom представила поезд на водородном топливе с дальностью хода 600 км. Его использование целесообразно на неэлектрифицированных участках.

Ограничением развития транспорта является отсутствие заправочной инфраструктуры и высокая стоимость ее строительства. Стоимость одной заправочной станции, по данным McKinsey & Company, составляет около 1 млн долл. Всего в мире в 2019 г. функционировало около 300 водородных заправочных станций. При этом решения для быстрой зарядки одного электромобиля стоят не более 50 тыс. долл. (без учета стоимости подключения к энергосистеме).

По оценке ЭЦ «Сколково», наиболее перспективным в замещении транспорта с ДВС является развитие

автобусов и малых грузоперевозок с долей рынка в сегменте 30–50% к 2050 г. Использование водорода в морском и авиатранспорте пока представляется только в виде ранних прототипов.

В промышленности

Водород является хорошо изученным газом, давно используемым в промышленности. С точки зрения развития его применения уже представлены проекты в концепции Power-to-X, в которой меняются технологические процессы. Например, разрабатываются проекты использования в теплоемких процессах металлургии и производства цемента тепла от водородного цикла. Также рассматриваются проекты производства зеленых метанола, аммиака, этилена, пропилена и так далее.

Транспортировка и хранение

На текущем этапе развития 90% водорода потребляется в месте его производства. Тем не менее уже сейчас в США существуют специализированные компании на рынке промышленных газов, осуществляющие централизованное водородоснабжение. Два основных метода транспортировки – с помощью автотранспорта и трубопроводов.

По данным Bloomberg New Energy Finance, в 2020 г. уже функционирует 4,5 тыс. км водородопроводов. При этом водород может быть подмешан в природный газ в существующую газотранспортную систему. Использование зеленого водорода в смеси с природным газом приведет к снижению выбросов CO₂ без технологического перевооружения. По оценке, приведенной ЭЦ «Сколково» на базе европейских исследований, в существующей европейской ГТС доля водорода может составлять 15%. В новых проектах вроде «Северного потока» достижима доля в 70%.

Перевозка водорода автомобильным транспортом осуществляется в сжатом виде с давлением 25 МПа. Он имеет очень низкую плотность и низкую массу даже при такой степени сжатия. Стандартный грузовой водородовоз перевозит до 1 т водорода. Аналогичный бензовоз перевез бы 25 т бензина. Увеличение массы перевозимого водорода сопряжено с технологическими ограничениями увеличения давления. Потребуются либо

более тяжелые стальные баки, либо использование новых композитных материалов.

Более широкие возможности представляет транспортировка водорода водным транспортом. Однако технологии существуют пока только в виде концептов. Перевозка водорода в сжатом виде по существующим технологиям экономически неэффективна в связи с небольшой доступной степенью сжатия. Решением проблемы представляется перевозка водорода в сжиженном виде либо в форме аммиака.

Перевозка в сжиженном виде пока недоступна в промышленном масштабе в связи с необходимостью поддержания температуры до $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако этот метод хранения и транспортировки уже давно используется в космонавтике. Перевозка в виде аммиака потребует дополнительных затрат на его производство и последующее разделение на азот и водород на стороне потребителя. Также разрабатываются решения, предусматривающие растворение водорода в органических веществах (до 1 : 400).

Bloomberg New Energy Finance приводит свои оценки себестоимости транспортировки в 2019 г. Локальная транспортировка стоит в пределах 0,7–1,8 долл. за тонну автотранспортом (небольшими объемами) и 0,05–0,2 долл. за тонну с помощью трубопроводов. Транспортировка на большие расстояния более 1000 км будет стоить менее 3 долл. за тонну трубопроводом, до 6,7 долл. – автотранспортом в растворенном виде и более 3 долл. – морским транспортом в форме аммиака.

На текущий момент существует 4 доступных способа хранения водорода и еще 4 способа активно исследуются. Базовым способом является хранение в баках под давлением. Перспективным развитием этого метода является хранение в соляных пещерах. По данным ЭЦ «Сколково», энергоемкости объема водорода, хранящегося в одной небольшой пещере, хватит для покрытия 5% годового спроса на электроэнергию в России. Хранение также может осуществляться в баках в сжиженном виде. Этот метод не требует больших емкостей в связи с высокой плотностью, но требует значительных энергозатрат на поддержание температуры до $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следующий способ – хранение водорода в форме аммиака. Он безопасен с точки зрения пожароопасности, но требует повышенных норм химической защиты, а также затрат сначала на производство аммиака, а затем его разделение.

Перспективными являются технологии хранения в металлах, которые абсорбируют водород, в форме органических растворов, в скальных полостях и выработанных нефтегазовых месторождениях.

Заключение

Несмотря на определенные ограничения и проблемы концепция использования водорода в качестве средства хранения и транспортировки энергии завоевывает все больше сторонников, а целый ряд инновационных решений проходит апробацию на практике. Ее перспективность на пути к устойчивому развитию и безуглеродной энергетике высоко оценили крупные бизнес-структуры и компетентные органы власти многих государств. В большинстве экономически высокоразвитых стран мира приняты специальные программы развития и государственной поддержки водородных технологий. Масштабные государственные программы поддержки водородной энергетики активно реализуются в Японии, Германии, Великобритании и других странах Евросоюза. Так, в 2020 г. запущен пилотный проект Евросоюза HYFLEXPOWER, в котором на базе действующей ТЭЦ будет создан комплекс по выработке водорода электролизом и последующего балансирования ВИЭ на метан-водородной смеси на турбине Siemens SGT-400. Газораспределительная сеть Шотландии выполняет проект по переводу на водородное отопление 300 домохозяйств. Португальские компании EDP и GALP осуществляют совместный проект по строительству электролизной установки мощностью 1 ГВт. Президент ж/д компании Франции SNCF Жан-Пьер Фаранду заявил о планах перевода всей тяги на неэлектрифицированных участках на водород к 2030 г. В 2021 г. в четырех регионах страны уже начнут курсировать первые водородные поезда. При успешной реализации пилотных проектов водород может быстро занять значительную позицию в мировом энергобалансе и обеспечить технологическую возможность для четвертого

энергетического перехода с ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрова Т., Мельников Ю., Чуринов Д. Водородная экономика. Путь к низкоуглеродному развитию. – М.: МШУ «Сколково», 2019.
2. Чаусов И., Тертышная А., Бурдин И. Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива / под ред. Д. Холкина. – М.: Инфраструктурный центр Energy Net., 2019.
3. Hydrogen: the next wave for electric vehicles? – McKinsey & Company. November, 2017.
4. Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy // Agency for Natural Resources and Energy (ANRE). Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). – Japan, October, 2018.
5. Bhavnagri K., Henbest S., Izadinajafabadi A., Wand X. etc. all. Hydrogen Economy Outlook // Bloomberg New Energy Finance. – 2020.
6. HYFLEXPOWER: The world's first integrated power-to-X-to-power hydrogen gas turbine demonstrator. Электронный ресурс: URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator>
7. Dessarts P., Andreau S. Jean-Pierre Farandou, président de la SNCF: «Je veux que la SNCF soit pionnière des trains à hydrogène». Электронный ресурс: URL: <https://www.lejdd.fr/Economie/jean-pierre-farandou-president-de-la-sncf-je-veux-que-la-sncf-soit-pionniere-des-trains-a-hydrogene-3974694>
8. Сидорович В. Португальский ответ кризису: производство зеленого водорода мощностью 1 ГВт. Электронный ресурс: URL: <https://renen.ru/portugalskij-otvet-krizisu-proizvodstvo-zelenogo-vodoroda-moshhnostyu-1-gvt/>
9. Шотландская газораспределительная сеть реализует проект по водородному отоплению 300 домов. Электронный ресурс: URL: https://elektrovesti.net/71001_shotlandskaya-gazoraspredelitel'naya-set-realizuet-proekt-po-vodorodnomu-otopleniyu-300-domov