



Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора

Часть 2. Водородное топливо

И.В. Пискунов,

соискатель, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, к.т.н.,

О.Ф. Глаголева,

профессор кафедры технологии переработки нефти РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д.т.н.,

И.А. Голубева,

профессор кафедры газохимии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, академик РАН, д.х.н.

Продолжение. Начало в № 4 (82) 2021г.

Представлен краткий обзор развития альтернативных видов топлив. Вторая часть обзора посвящена водородному топливу, использование которого позволяет обеспечить снижение выбросов углекислого газа. Водород является перспективным видом топлива, однако в настоящее время занимает незначительную нишу в мировой энергетике. Тем не менее в рамках развития водородной энергетики многими странами мира были приняты соответствующие программы развития и стратегии. Рассмотрены некоторые способы производства водорода на базе углеводородного сырья, а также основные виды его хранения, в том числе в связанном состоянии (аммиак, метанол и др.). Благодаря преимуществам водородных топливных элементов можно повысить энергоэффективность транспорта (КПД в 1,5-2 раза выше, чем у ДВС), однако высокая себестоимость производства и сложность хранения водорода препятствуют его широкому распространению и развитию производственной и сбытовой инфраструктуры.

Перспективы развития водородной энергетики

В соответствии с принятой Еврокомиссией в июле 2021 года стратегией по борьбе с изменением климата, к 2030 году объёмы выбросов CO₂ в ЕС должны быть снижены до 55 % от уровня 1990 года [1]. Такие амбициозные планы ведут к необходимости трансформации энергетического сектора Евросоюза с учётом того, что более 46 % выбросов в ЕС приходится на энергетику и промышленность, 27 % – на транспорт [2].

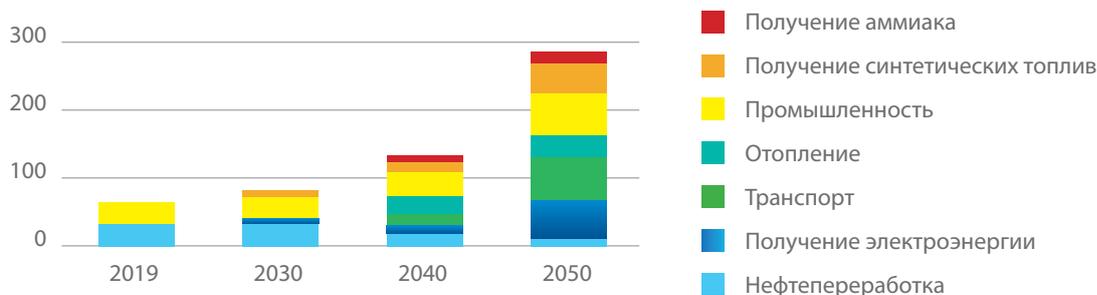
Потребление углеводородных топлив потенциально может снизиться в связи с активным переходом на электротранспорт и водородное топливо, а также в связи с повышением эффективности ДВС [3]. По прогнозам Bloomberg, к 2050 году потребление водорода может

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

альтернативные виды топлив, водород, водородное топливо, экология.

РИС. 1

Прогноз IEA объёмов потребления водорода в мире [6], млн т/год



составить от 190 до 1318 млн т/год [4]. В целом, по оценке разных агентств, потребление водорода к 2050 году варьируется в широких пределах и может достигнуть от 500 до 16 100 ТВт·ч/год [5]. Один из прогнозов потребления водорода в мире по отраслям от агентства IEA представлен на рис. 1.

Для развития водородной энергетики требуется проведение комплексной оценки внедрения водородных технологий с учётом анализа рисков, экономических и экологических эффектов, а также требуемых вложений в модернизацию существующей инфраструктуры и создание новой [7]. Водородная энергетика находится на начальном этапе развития, существующие технологии получения водорода имеют низкую экономическую эффективность. Есть также определённые особенности: например, чтобы не допустить водородное охрупчивание металла необходимо использовать специальные устойчивые материалы. Кроме того, объёмная энергоёмкость водорода в 3,5 раза ниже, чем у метана, а плотность в жидком виде почти в 6 раз ниже, чем у СПГ, что обуславливает повышенные расходы на его перекачку и хранение.

Благодаря наличию большого ресурсного и научного потенциала Россия может успешно занять нишу на мировом рынке. К 2050 году объём экспорта водорода из РФ может достичь от 15 до 50 млн т/год. Развитие этого направления заложено в «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» (09.07.2020 г.), плане мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» (12.10.2020 г.), «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации» (05.08.2021 г.) и других документах [8].

В соответствии с «Концепцией развития водородной энергетики в Российской Федерации» [8] водород признан перспективным энергоносителем для перехода к низкоуглеродной экономике. Для его производства и экспортных отгрузок планируется создать четыре кластера, ориентированных на Европейский, Азиатский, Южный и Арктический регионы. При этом основным ориентиром является получение водорода с низким углеродным следом.

Технологии получения водорода

В настоящее время основной объём водорода и водородсодержащего газа (более 95 %) выпускается для обеспечения собственных нужд нефтеперерабатывающих и химических предприятий – процессов гидроочистки и гидрокрекинга нефтяных фракций, синтеза аммиака, метанола и др. В процессах гидроочистки происходит

насыщение продуктов водородом и удаление вредных соединений (сера, азот) с целью достижения требований современных экологических стандартов (Евро 5+).

Наибольший объём водорода (более 70 %) получают риформингом метана и углеводородных газов, на долю риформинга жидких нефтепродуктов (как совместный продукт производства бензина) приходится около 30 %, на долю газификации угля – 18 %, электролиз – 4 % [9, 10]. Следует отметить большую энергоёмкость процессов – расходы на производство превышают 50...55 % от себестоимости продукта, а также высокие капитальные затраты.

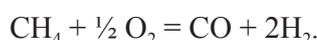
В настоящее время известны и в разной степени распространены более 100 различных способов получения водорода [7, 10-15].

- **Паровой риформинг** (паровая конверсия) метана (SMR) – наиболее широко применяемый способ. Проводится в присутствии водяного пара при температурах 800...1000 °С:

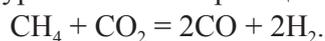


Разработаны различные модификации процесса (мембранные, микроканальные реакторы и т.д.), направленные на повышение его эффективности.

- **Парциальное окисление кислородом** (POX, окислительная конверсия) – имеет более простое аппаратное оформление, ниже энергопотребление и меньше требований к составу сырья, однако необходимо использовать чистый кислород. Синтез-газ по составу более предпочтителен для нефтехимического синтеза и получения жидких топлив по Фишеру–Тропшу (процесс GTL). Основная реакция:



- **Углекислотная конверсия** (DRM, сухой риформинг) – позволяет получать синтез-газ с соотношением $\text{H}_2:\text{CO}$ около 1:1, что предпочтительно для производства эфиров (ДМЭ) и других продуктов нефтехимии. Однако этот способ отличается высоким энергопотреблением и температурой. Основная реакция:



- **Автотермический риформинг** (ATR) – комбинация парового риформинга и парциального окисления. Не требует подачи тепла, что является преимуществом для крупнотоннажного производства. Получаемый синтез-газ можно использовать для нефтехимического синтеза.
- **Пиролиз метана** – позволяет получать водород без выбросов CO_2 за счёт выделения углерода в твёрдой фазе или в составе ацетилена. Основная реакция: $\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$. Проводится в псевдоожигенном слое катализатора, плазме или в среде расплавленного металла. Углеродные материалы можно получить в форме сажи, графита, углеволокна и т.д. Недостатком процесса являются его высокие затраты, а также ограниченность рынка углеродных материалов (около 18 млн т/год) [13]. Однако, по оценке [14], затраты на пиролиз оказываются ниже, чем у парового риформинга с учётом утилизации получаемого CO_2 , а углеродные материалы в случае их удешевления могут найти широкое применение в дорожном

строительстве и цементном производстве.

- **Газификация нефтяных остатков или угля** – проводится при температурах 1300...1450 °С при подаче кислорода и водяного пара:

$$C_xH_y + \frac{1}{2} x O_2 = x CO_2 + \frac{1}{2} y H_2.$$
- Процесс позволяет эффективно утилизировать нефтяные остатки, которые нецелесообразны для переработки в других процессах.
- **Прочие процессы:** три-риформинг (сочетание первых трёх процессов), фильтрационное горение, матричная конверсия, плазмохимические превращения метана, процесс chemical looping на основе циркулирующих микросферических оксидов металлов и др.
- **Комбинация процесса конверсии метана с атомным реактором**, применяемым для нагрева сырья. Направление развивается в РФ, США, Китае и других странах. Есть решения по модульным установкам получения водорода.
- **Электролиз воды.** Недостатком являются высокие энергозатраты и как следствие – себестоимость производства водорода таким способом составляет 3...7,5 долл./кг по сравнению с 0,9...3,2 долл./кг при получении из метана [16]. По другим оценкам: себестоимость для электролиза – 10...20 долл./ГДж, для риформинга – 6...12 долл./ГДж [17]. При использовании сетевого электричества углеродный след зависит от источника энергии и потенциально может быть выше, чем при производстве водорода из углеводородов.

Для очистки от примесей и повышения концентрации водорода применяют следующие методы: каталитической и абсорбционной очистки, короткоциклового адсорбции (КЦА), мембранного и криогенного разделения, металлогидриды и т.д. [18] Удаление примесей имеет особую важность в случае дальнейшего использования водорода для питания топливных элементов (ТЭ). Угарный газ способен отравлять платиновый катализатор ТЭ при содержании выше 10 ppm, сероводород – более 0,1 ppm.

Основным способом утилизации CO₂, наиболее актуальным для крупнотоннажного производства, является CCUS (carbon capture, utilization and storage), основанный на его закачке в пласт нефтяных и газовых месторождений, в том числе для интенсификации добычи и заполнения образовавшихся пустот. Это увеличивает себестоимость производства и транспортировки водорода почти в 1,5 раза [5].

Таким образом, в настоящий момент существует большое количество способов производства водорода. Основным потенциальным сырьём для его получения являются лёгкие углеводородные газы, причём в зависимости от выбранной технологии можно получать как максимальный выход водорода (паровой риформинг), так и синтез-газ, который можно использовать для нефтехимического синтеза, получения спиртов и углеводородных топлив по технологии GTL (синтез Фишера–Тропша) [19]. При этом необходимо обеспечивать утилизацию побочного продукта реакции – углекислого газа (технологии CCUS или связывания в другие химические продукты). Пиролиз метана позволяет избежать образования CO₂ с получением вместо этого твёрдого углерода (при этом требуется решить вопрос его эффективного применения).

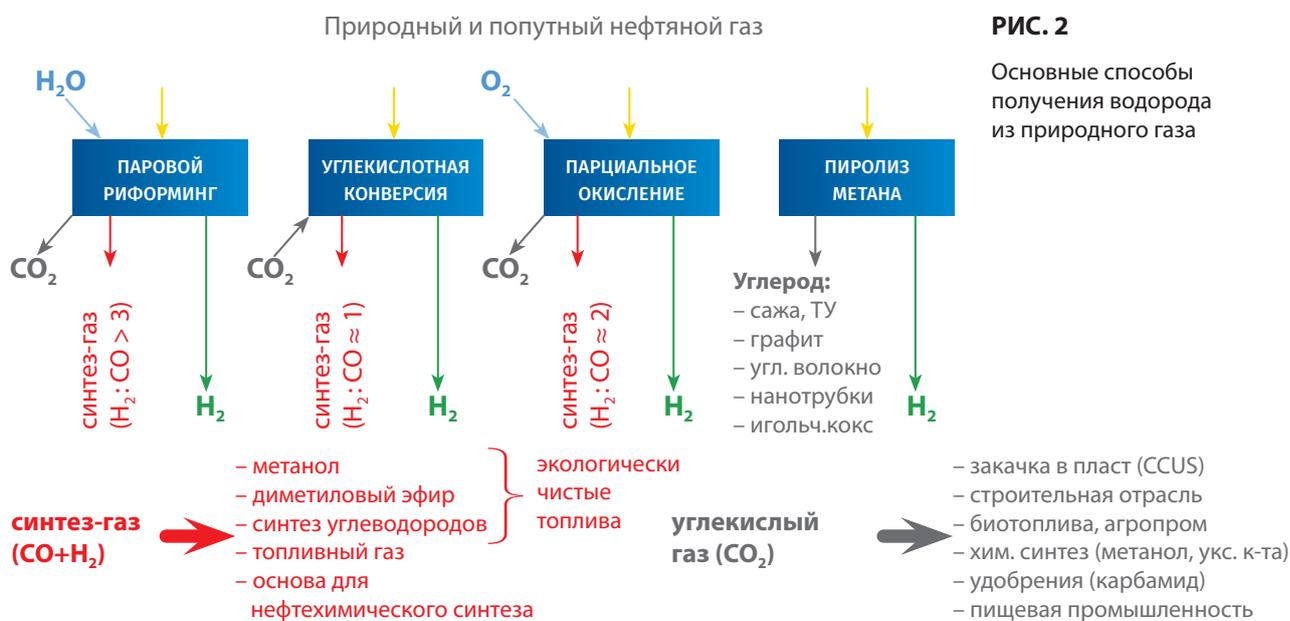


РИС. 2

Основные способы получения водорода из природного газа

В крупных масштабах производство водорода может осуществляться на отдельных комплексах по переработке природного газа, например, по способам, представленным на рис. 2, или их различным сочетаниям в зависимости от дальнейшего использования получаемых продуктов и других условий.

Транспортировка и хранение водородного топлива

Вопрос транспортировки и хранения является особенно важным в контексте развития водородной энергетики. Необходимость хранения водорода при высоком давлении вызывает опасения в связи с его высокой проникающей способностью и взрывоопасностью – предел взрываемости водорода в воздухе составляет 4...75 % об. При этом было отмечено [20], что в связи с более высокими значениями летучести, температуры самовоспламенения и нижнего концентрационного предела взрываемости водород оказывается безопаснее, чем СУГ. Водород рассеивается в атмосфере в 6 раз быстрее метана. Кроме того, водород является косвенным парниковым газом, вступая в реакцию со свободным радикалом OH , который выполняет функции первичного поглотителя метана. Сокращение содержания радикала OH в атмосфере будет тем самым препятствовать процессу естественного изъятия метана из атмосферы.

Существует целый ряд способов, позволяющих хранить и транспортировать чистый водород, в том числе на дальние расстояния [5, 7, 14, 21-27]:

- **Компримированный водород** (до давления 70 МПа). Применяют газовые баллоны из специальных композитных материалов. В бак легкового автомобиля (например, Toyota Mirai) таким образом можно вместить 5,6 кг водорода, что хватит на 850 км пути.

Расходы на сжатие достигают 6...15 % от энергии запасённого водорода. В случае разгерметизации возникают повышенные риски возгорания. Для хранения больших объёмов можно использовать подземные пустоты.

- **Жидкий водород.** Криогенный способ позволяет сжижать водород при температуре $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 K), что позволяет повысить плотность хранения в 848 раз. Потенциально пригоден для перевозок в больших объёмах (до 4 т). Требует значительных затрат на охлаждение до сверхнизкой температуры (до 20...30 % энергии), а также имеет большие потери вследствие нагрева – до 1 % в день. Увеличение объёма партии позволяет значительно снизить удельные расходы и долю потерь.
- **Обратимые гидриды металлов и интерметаллических соединений.** Позволяют обратимо адсорбировать водород при изменении температуры и давления. Ёмкость до 1...10 % масс. водорода, среди соединений можно использовать LaNi_5H_6 , Mg-Li-Ni , Mg-Mn-Ni , $\text{Mg}+3\%\text{Ni/C}$. Безопасны благодаря твердофазной форме хранения, а также позволяют использовать носитель многократно. К недостаткам относят высокую материалоемкость на единицу хранения (массовая плотность хранения 1...2 %) и необходимость специального оборудования для зарядки.
- **Другие адсорбенты водорода.** Цеолиты, активированный уголь, наноуглерод (до 7...8 % масс. водорода).
- **Лёгкие металлы и их гидриды (водореагирующие).** Al, LiH, Mg, гидрид магния MgH_2 (до 15 % масс. водорода). Можно придать удобную форму в виде сменных картриджей. Металлогидриды обеспечивают высокую плотность энергии, однако они дорогие и имеют одноразовое применение.
- **Прочие химические вещества – носители водорода:** борогидрид натрия NaBH_4 (10,8 % масс. водорода), LiBH_4 (18,5 % масс.), имид-гидридные системы (LiNH_2+LiH), фуллерены и др.
- **Углеводороды, обратимо связывающие водород.** Связка метилциклогексан-толуол (до 7 % масс. водорода), фенантрен, N-этилкарбазол. Можно перевозить на дальние расстояния как обычные жидкие нефтепродукты. Недостаток: необходимость в химическом синтезе для проведения гидрирования-дегидрирования.
- **Аммиак** как носитель водорода (17,8 % масс. водорода). Удобная форма хранения – легко сжижается (температура $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ или давление 0,86...1,7 МПа), является крупнотоннажным продуктом с развитой инфраструктурой (комплементарность с производством удобрения). Можно использовать в щелочных топливных элементах или битопливных режимах на базе бензиновых или дизельных ДВС (до 70 % аммиака). Однако аммиак токсичен (ПДК = 20 мг/м³), а объёмная энергоёмкость в 2 раза ниже традиционных топлив, и также требуются дополнительные расходы на его синтез. Для стабильного горения нужно вводить 1,5...5 % водорода. Кроме того, при высокой температуре при сгорании образуются оксиды азота NO_x . Есть опыт использования в автомобилях, тракторах, ракетной технике, на судах. Относительно легко разлагается на водород и азот [25-27].
- **Метанол.** Топливные элементы с протонообменной мембраной

(DMFC) могут работать непосредственно на метаноле, который в свою очередь является крупнотоннажным продуктом, получаемым из водорода и синтез-газа. Однако в его составе содержится углерод, вследствие чего рассматривать метанол как углероднейтральное топливо можно только при условии его получения из переработанной биомассы, биогаза или уловленного CO₂. Возможна синергия между производством аммиака и метанола.

Трубопроводные поставки водородных энергоносителей в виде метано-водородной смеси в настоящее время невозможны с учётом технико-экономических, юридических и экологических аспектов. Так, открытыми остаются вопросы целостности технологического оборудования вследствие насыщения металла водородом (водородное охрупчивание, коррозионные процессы и т.д.), обеспечения промышленной безопасности, потерь из-за сверхвысокой проницаемости водорода, выполнения контрактных обязательств по составу и качеству газа.

Таким образом, несмотря на наличие большого числа способов хранения и транспортировки водорода практически всем им присущи как преимущества, так и весомые недостатки, поэтому эти способы, как правило, имеют ограниченное применение. Хранение в сжатом виде применяют в автомобилях при соблюдении высоких требований безопасности, в жидком виде используется в крупнотоннажных танкерных поставках и ограничено – на транспорте (из-за высокой стоимости). Хранение в связанном состоянии более безопасно и позволяет снизить потери, однако, как правило, более затратно. Использование обратимых гидридов ограничено из-за повышенной массы и материалоёмкости, а химических носителей водорода – из-за их дороговизны. Аммиак выглядит достаточно перспективным носителем водорода, так как легко сжижается и позволяет перейти от углеродного цикла к азотному, но дополнительные затраты на синтез, а также образование оксидов азота при сгорании снижают целесообразность его использования.

По всей видимости, наибольшие перспективы для широкого использования водорода на транспорте имеют топливные элементы на аммиаке, а также улучшенные адсорбционные носители.

Транспорт на водородном топливе

Первый двигатель на водороде был запатентован в 1841 году, после чего водород в двигателях использовался в некоторых пилотных моделях. Во время блокады Ленинграда на газ из аэростатов были переоборудованы 200 грузовиков ГАЗ. В 1959 году был выпущен первый трактор на водороде, а в 1966-м – первый автомобиль компании GM [28]. Более широкое применение началось в начале 2000-х гг. с появлением моделей BMW Hydrogen 7 и Mazda RX-8 Hydrogen RE. Работали они по схеме непосредственного сжигания водорода в ДВС.

Значительно повысить эффективность двигателя позволило внедрение топливных элементов, в которых происходит преобразование водородного топлива в электрическую энергию. Автомобиль на ТЭ (FCEV) представляет собой гибридный автомобиль с электрическим приводом, работающий на водороде. Эффективность преобразования водорода

в электроэнергию у современных авто достигает 83 %, в то время как у традиционных ДВС КПД не превышает 30...40 % [15]. За счёт снижения потерь в двигателе и отсутствия потерь холостого хода в электромобилях на ось передаётся более 75 % энергии, в то время как у ДВС – всего 13 % [29].

Топливные элементы были открыты ещё в XIX веке английским ученым У. Гроувом, однако их широкое использование в автомобилях началось лишь в прошлом десятилетии. Наиболее популярной моделью стала Toyota Mirai, продажи которой в 2019 году превысили 10 тыс. ед. При этом первая модель имела запас хода на одной заправке более 500 км, а вторая – уже 850 км [30]. Другие известные марки также создали свои версии таких автомобилей: Honda Clarity Fuel Cell, Ford Focus FCV, Mercedes-Benz GLC F-CELL, Hyundai Tucson FCEV, Nissan X-TRAIL FCV, Audi A2H2 и др. [15] Автомобиль китайской компании Grove Hydrogen Automotive, представленный в 2019 году, способен на одной заправке проехать 1000 км.

Среди разработок в нашей стране – несколько поколений опытных образцов «Антэл», а также созданная в 2019 году модель водородного автомобиля на базе LADA Ellada [31]. В представительском классе первым в мире водородным автомобилем на ТЭ стал Augus Senat [32].

Водородное топливо применяется также в спецтехнике (например, автопогрузчики, машины для гольфа и складов), авиации (самолеты, беспилотные летательные аппараты), на морских судах [28]. Известны примеры использования ТЭ в военных и космических аппаратах (например, проект «Буран»). Наиболее эффективно его использование на транспорте, которому необходим большой запас хода – грузовиках, магистральных автобусах, железнодорожном транспорте. Известны проекты грузовиков от Nikola One, Toyota, Daimler Trucks, Huzon Motors. Компания Grove планирует в 3-м квартале 2021 года запустить серийное производство тяжёлого грузовика на водороде с пробегом на одной заправке более 1000 км [33]. Также о планах по разработке грузовика и автобуса на водороде заявил КАМАЗ [34].

По оценкам [5], транспорт на водороде займёт к 2050 году значимую долю в автобусных (> 45 %) и малых грузовых (~ 40 %) перевозках, а также в качестве легковых автомобилей (30%).

В настоящее время применяется несколько типов топливных элементов, из них наиболее широко распространены: ТПТЭ (PEMFC) – с протон-обменной мембраной, ТОТЭ (SOFC) – твердооксидный. PEMFC является низкотемпературным ТЭ, работает на чистом водороде и является универсальным для применения в автомобилях. Допускается работа на метаноле. Особенностью высокотемпературных SOFC является возможность непосредственной переработки углеводородного сырья, и они чаще используются в качестве стационарных источников энергии.

Для надёжного обеспечения топливом водородных автомобилей требуется развитая сеть водородных АЗС – по оценкам на каждый 1 млн ед. FCEV нужно 400 заправочных станций. Одной из первых стран о создании такой сети заявила Германия. Первые АЗС были построены 15 лет назад, а в рамках совместного предприятия химических компаний и автопроизводителей H2 Mobility по состоянию на

2021 год было запущено более 130 АЗС для заправки сжатым водородом [35]. В Китае программа строительства водородных заправок началась в 2019 году, и к 2020 году в стране насчитывалось более 50 АЗС и 6 тыс. водородных автомобилей с перспективой роста до 50 тыс. ед. к 2025 году [36].

В России же в настоящее время действует всего одна водородная АЗС (в г. Черноголовка), при этом к 2030 году их число планируется увеличить до 1000 ед. [37, 38].

Активное внедрение водородного транспорта обусловлено следующими его преимуществами:

- более быстрая заправка (несколько минут) и большая дальность пробега (500...1000 км) на одной заправке по сравнению с электромобилями на аккумуляторах (BEV);
- отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу – в выхлопе только водяной пар; в случае использования углероднейтрального водорода обеспечивается полная экологическая безопасность использования такого транспорта;
- при использовании топливных элементов можно достичь КПД 70...85 % по сравнению с 30...40 % у традиционных ДВС;
- в случае использования в качестве добавки к топливу в ДВС – снижение детонации (ИОЧ водорода = 130), повышение КПД двигателя на обеднённых смесях;
- автономное производство электроэнергии в отличие от вторичных источников энергии – аккумуляторов электромобилей, заряжаемых от внешних источников;
- при производстве автомобилей нет привязки к дефицитным металлам (Li) для производства аккумуляторных батарей.

При этом есть ряд недостатков:

- сложности хранения водорода – необходимость закачки под высоким давлением (70 МПа), сжижение при низких температурах ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) или использование носителей, что повышает риски и удорожает процесс;
- при использовании сжатого водорода – необходимость применения материалов, устойчивых к стресс-коррозии, а также повышенная взрыво- и пожароопасность;
- высокая стоимость водородного автомобиля, так как используются сложные системы хранения и подачи водорода, платиновый катализатор для топливных элементов;
- низкое развитие сети водородных АЗС (особенно в РФ) и высокая стоимость водородного топлива – в несколько раз выше, чем у традиционных жидких топлив.

Заключение

Текущие прогнозы существенно расходятся в оценке будущего потребления водорода. В связи с масштабностью необходимых для этого изменений важно проводить комплексную оценку всех аспектов развития водородной энергетики, с учётом всех рисков и с опорой на имеющиеся ресурсы. Вследствие этого видится целесообразным

поддерживать взаимодополняемость производственных схем получения водорода и традиционных топлив, в частности, путём использования природного газа.

По нашему мнению, получение водорода из природного газа с утилизацией побочных продуктов (углекислый газ или углеродные материалы) будет наиболее рациональным способом его производства в РФ в ближайшей перспективе. При этом вопрос поиска наиболее эффективной формы хранения водорода на текущий момент ещё не закрыт. В настоящее время самое большое развитие на транспорте получило применение сжатого водорода (до давления 70 МПа), однако в будущем, по-видимому, использование водорода в связанной форме может стать более актуальным (в виде аммиака и других химических соединений, а также в адсорбированном виде), что позволит повысить безопасность его использования, а также снизить издержки на получение и хранение. Дополнительным аргументом в пользу топлив на основе водорода является возможность использования гибридных автомобилей на топливных элементах, КПД которых в 1,5-2 раза выше, чем у традиционных ДВС на углеводородном топливе.

Третья часть статьи будет напечатана в следующем номере.

Использованные источники

- European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. 14.07.2021 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541
- FuelsEurope. Statistical report 2021. Editor: John Cooper. – 72 p. URL: https://www.fuels-europe.eu/wp-content/uploads/SR_FuelsEurope-2021.pdf
- Ершов М. Революционные изменения для НПЗ. Будущее рынка бензинов – гибридные низкоуглеродные топлива // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 17. – С. 39-49.
- New Energy Outlook 2021. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д., Глаголева А. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 63 с.
- Основные тенденции на водородном рынке. Отчёт Vostock Capital // Транспорт на альтернативном топливе. – 2021. – № 4 (82). – С. 37-48
- Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаяв Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 428-438.
- Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Распоряжение правительства № 2162-р от 05.08.2021. <http://government.ru/news/42971/>
- The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- Макарян И.А., Седов И.В., Никитин А.В., Арутюнов В.С. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья // Научный журнал Российского газового общества. – 2020. – № 1 (24). – С. 50-68.
- Овсиенко О.Л., Сидельников И.В., Анисеев Н.А. Потенциал ПАО «НК «Роснефть» в развитии водородной энергетики // Материалы научно-практ. конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса. Добыча и переработка». Ноябрь 2020. – С. 43-44.
- Солодова Н.Л., Черкасова Е.И., Салахов И.И., Тутубалина В.П. Водород – энергоноситель и реагент: Технологии его получения // Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 11-12. – С. 39-50.
- Парфенов В.Е., Никитченко Н.В., Пименов А.А., Максимов А.Л. и др. Пиролиз метана водородного направления: особенности применения металлических расплавов (обзор) // Журнал прикладной химии. – Т. 93. – Вып. 5. – 2020. – С. 611-619.
- Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A. et al. New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region // Resources. – 2021. – № 10, 3. – Pp. 1-18 <https://doi.org/10.3390/resources10010003>
- Пискунов И.В. Перспективы развития водородной энергетики и транспорта // Нефть. Газ. Новации. – 2020. – № 4 (233). – С. 18-21.
- Kalinenko E., Sanchez S. Will hydrogen be the next 'oil', fuelling the global economy? 03.09.2020. <https://europetro.ru/media/2020/will-the-hydrogen-be-the-next-oil-fuelling-the-global-economy>
- Овсянников Е.М., Гайтова Т.Б., Фомин А.П. Эксплуатация автомобильного транспорта на водородном топливе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6 (60). – С. 61-64.
- Сипатов И.С., Сидоров Н.И., Пастухов Э.А., Востряков А.А. Перспективные технологии и материалы для получения особо чистого водорода // Проблемы недропользования. – 2015. – № 3. – С. 86-93.
- Капустин В.М. Технология производства автомобильных бензинов. – М.: Химия, 2015. – 256 с.
- Порсин А.В., Цариченко С.Г., Добровольский Ю.А. и др. Анализ безопасности использования в автомобилях углеводородных топлив и водорода // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, в. 10. – С. 1508-1519.
- Тарасов Б.П. Физикохимия водород-аккумулирующих материалов // Водородные энергетические технологии: Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сб. науч. тр. / Д.О. Дуников (отв. ред.) [и др.]. – М.: ОИВТ РАН, 2017. – Вып. 1. – 190 с.
- Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В. и др. Проблемы аккумулярования и хранения водорода // Chemical problem. – 2018. – № 4 (16). – С. 453-483.
- Хохонов А.А., Шайхатдинов Ф.А., Бобровский В.А. и др. Технологии хранения водорода. Водородные накопители энергии // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 12. – С. 47-52.
- Водород в энергетике: учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
- Климентьев А.Ю., Климентьева А.А. Аммиак – перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 3 (57). – С. 32-44.
- Климентьев А.Ю., Климентьева А.А. Аммиак – перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики. Продолжение // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 4 (58). – С. 17-27.
- Использование аммиака как судового топлива в Сингапуре. 17.06.2020. <https://energybase.ru/news/industry/ammonia-as-marine-fuel-in-singapore-2020-06-17>
- Как работает водородный двигатель и какие у него перспективы. РБК. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6048e0629a794750974c67a7>
- Левинбук М.И., Глаголева О.Ф., Котов В.Н. О необходимости корректировки проекта Энергетической стратегии России в условиях доминирования добычи легкой нефти в США и переходе к альтернативным двигателям на автотранспорте // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 2. – С. 4-20.
- Начались продажи водородомобиля Toyota Mirai второго поколения. 09.12.2020. <https://motor.ru/news/toyota-mirai-09-12-2020-839808.htm>
- В России построили Lada Kalina на водороде. 28.10.2019. <https://motor.ru/news/lada-hylada-28-10-2019.htm>
- Первый российский водородный автомобиль // Транспорт на автомобильном топливе. – 2021. – № 4 (82). – С. 22-23.
- Дебют водородных автомобилей в супертяжелом весе. 27.04.2021. <https://greenstartpoint.ru/debut-vodorodnyh-avtomobilej-vs-pertvazhyolom-vese-triumfalnoe-vtoroe-poyavlenie-grove-hydrogen-automotive-na-avto-shanhaj-2021/>
- KAMAZ планирует создать грузовик и автобус на водороде. 02.02.2021. <https://nangs.org/news/renewables/kamaz-planiruet-sozdaty-gruzovik-i-avtobus-na-vodorode>
- H2 MOBILITY. We are building the filling station network of the future. <https://h2.live/en/h2mobility/>
- В Китае предлагают ускорить внедрение водородных технологий на транспорте. 04.06.2020. <https://trans.ru/news/v-kitae-predlagayut-uskorit-vnedrenie-vodorodnih-tehnologii-na-transporte>
- Поедем на водороде? Как обстоят дела с самыми экологически чистыми электромобилями. Национальная Ассоциация нефтегазового сервиса. 20.07.2021. <https://nangs.org/news/renewables/poedem-na-vodorode-kak-obstoyat-dela-s-samyimi-ekologicheski-chistymi-elektromobilyami>
- Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение правительства № 2290-р от 23.08.2021. <http://government.ru/news/43060/>