

## ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ЗНАЧЕНИЕ, ИСТОЧНИКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)

© 2022 г. В. С. Арутюнов<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, 119991 Россия

<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

\*E-mail: v\_arutyunov@mail.ru

Поступила в редакцию 1 ноября 2021 г.

После доработки 4 марта 2022 г.

Принята к публикации 6 мая 2022 г.

Согласно приведенным в работе оценкам, ни гидроэнергетика, ни атомная энергетика, ни тем более другие возобновляемые источники энергии в принципе неспособны обеспечить промышленные объемы производства водорода, необходимые для заметного изменения глобальной эмиссии диоксида углерода. До освоения энергии термоядерного синтеза единственным реальным источником водорода для промышленной энергетики может быть только конверсия углеводородов. Поэтому самый эффективный способ снижения углеродного следа энергетики – повышение эффективности этих процессов. Необходимо также учитывать, что как энергоноситель водород имеет серьезные недостатки. Прежде всего, это низкое объемное содержание энергии. Транспортировка и хранение водорода требуют значительно более высоких капитальных и энергетических затрат, чем природного газа. Наиболее реальный путь преодоления не имеющих пока практического решения проблем транспортировки и хранения водорода – его рассредоточенное малотоннажное производство непосредственно на месте потребления. Такие отечественные технологии есть, и нужно предпринимать максимальные усилия для их реализации.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, водород, возобновляемые источники энергии, углеводороды, конверсия, синтез-газ

**DOI:** 10.31857/S0028242122040025, **EDN:** IFUUKH

Развитие мировой энергетики в настоящее время происходит под влиянием двух глобальных трендов: растущего дефицита традиционных ископаемых углеводородов и угрозы нарушения глобального климата [1, 2]. Несмотря на отсутствие убедительной научной аргументации и наличие альтернативных точек зрения [3–5], общественное мнение развитых стран однозначно связывает эти процессы с повышением концентрации парниковых газов в атмосфере [6], вызванным антропогенными факторами. Парижское соглашение по климату [7] провозгласило ведущую роль в решении климатических проблем перехода мировой энергетики на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Однако в связи с незначительным вкладом ВИЭ в глобальную энергетику [8] и растущим по-

ниманием принципиальной ограниченности их потенциала в последнее время акцент сместился на более широкое использование водорода в качестве альтернативного неуглеродного энергоносителя, использование которого в энергетике не приводит к эмиссии CO<sub>2</sub>.

Сама идея водородной энергетики не нова. Она широко обсуждалась в конце 60-х гг. прошлого века в связи с успехами в области термоядерной энергетик, прежде всего, созданием отечественными учеными термоядерных реакторов типа «ТОКАМАК», породившими надежду на быстрое освоение этого источника энергии. Так как термоядерный реактор, так же как и атомную электростанцию, наиболее эффективно использовать в режиме базовой нагрузки, с постоянной выработкой одного и того же

количества электроэнергии, возникает проблема ее аккумуляции и транспортировки на большие расстояния. Поскольку аккумуляция больших объемов электроэнергии остается нерешенной проблемой, а ее транспортировка на большие расстояния связана с высокими капитальными затратами и потерями в сетях, возникла идея аккумуляции и транспортировки дешевой и обильной энергии термоядерного синтеза в виде водорода. Однако даже наиболее оптимистичные прогнозы реализации термоядерной энергетики относят это к концу текущего столетия, поэтому привязка водородной энергетики к энергетике термоядерной пока неактуальна.

Тем не менее, стремительный рост интереса к водородной энергетике и предпринимаемые в этом отношении законодательные и технологические усилия делают необходимым проведение хотя бы самых общих оценок возможных путей получения необходимого объема водорода для достижения поставленной цели снижения глобальной антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$  за счет замещения им углеводородных энергоносителей, наличия необходимого для этого сырья и энергии, связанных с этим экономических затрат и возможных последствий реализации такого перехода для окружающей среды.

### **Объем водорода, необходимый для замещения углеводородных топлив, и его потенциальные источники**

Прежде всего, необходимо отметить, что земная кора не обладает сколько-нибудь значительными запасами водорода, поскольку гравитация Земли недостаточна для его удержания в атмосфере. Таким образом, водород является не источником энергии, а только вторичным энергоносителем, который необходимо производить, затрачивая на это энергию из других источников. Поэтому переход на использование водорода в качестве энергоносителя потребует увеличения глобального энергопотребления для компенсации неизбежных потерь при преобразовании энергии. Если мы возьмем в качестве базовой технологии его получения электролиз воды с КПД 60%, то даже без учета эффективности получения самой электроэнергии замена углеводородных топлив водородом потребует почти удвоения мирового производства энергии.

В настоящее время ежегодная мировая добыча нефти достигла 4.5 млрд т, природного газа – 4 трлн  $\text{m}^3$ , угля – 8 млрд т [8], что в совокупности составляет ~14 млрд т нефтяного эквивалента. Около 95% этих углеводородов сжигается в качестве энергетического и транспортного топлива. Чтобы заметно повлиять на глобальные выбросы  $\text{CO}_2$ , необходимо заменить не менее 10% этих углеводородов водородом, то есть ежегодно производить ~1 млрд т  $\text{H}_2$ . Для полной замены потребуется ~10 млрд т  $\text{H}_2$ , причем получаемого из неуглеродных источников либо с полным улавливанием образующегося при этом  $\text{CO}_2$ .

В 2020 г. мировое производство водорода достигло 87 млн т, что в 10 раз ниже минимально необходимого и в 100 раз ниже фактически необходимого для замены углеводородных энергоносителей. Подавляющая часть этого водорода, более 95%, используется непосредственно на месте производства, в основном в процессах переработки нефти и производства аммиака [9]. Более 3/4 этого водорода было произведено из природного газа, на что потребовалось 205 млрд  $\text{m}^3$  газа, а остальное – из угля. Вклад электролиза воды в промышленное производство водорода значительно меньше – 1%.

В соответствии с объемом образующегося при получении водорода  $\text{CO}_2$ , то есть негативным воздействием используемого процесса на климат, принята так называемая «цветовая» градация различных источников водорода (рис. 1).

Однако богатство цветовой гаммы источников водорода и экологическая привлекательность процессов, обозначенных более светлыми оттенками, далеко не соответствуют их ресурсной, технологической и экономической привлекательности. На рис. 2 показана примерная удельная стоимость водорода, получаемого различными методами, которая однозначно определяет структуру современных методов его промышленного производства.

Широко обсуждаемые перспективы возможного снижения стоимости получения водорода более «зелеными» технологиями, а также предлагаемые альтернативные реакции и способы его производства, как правило, не учитывают необходимых для этого затрат энергии, определяемых термодинамикой этих процессов (рис. 3), которую невозможно изменить за счет каких-либо технологических новаций.



Рис. 1. Градация методов получения водорода на основе их предполагаемого воздействия на климатические процессы.

Но главная проблема всех предлагаемых «зеленых» технологий получения водорода на основе ВИЭ – их низкий глобальный потенциал. В качестве основного метода получения «зеленого» водородарассматривается электролиз с использованием возобновляемых источников энергии [10], который теоретически требует 39 кВт·ч электроэнергии для производства 1 кг H<sub>2</sub> [11]. Даже при сильно завы-

шенном КПД электролиза 80% и без учета КПД производства самой электроэнергии и неизбежных потерь на ее преобразование, реально потребуется не менее 50 кВт·ч первичной энергии. Мировое же производство энергии всеми видами возобновляемых источников в 2019 г. составило 2800 ТВтч, что позволяет получать только ~56 млн т H<sub>2</sub> ежегодно, заметно ниже его текущего производства.

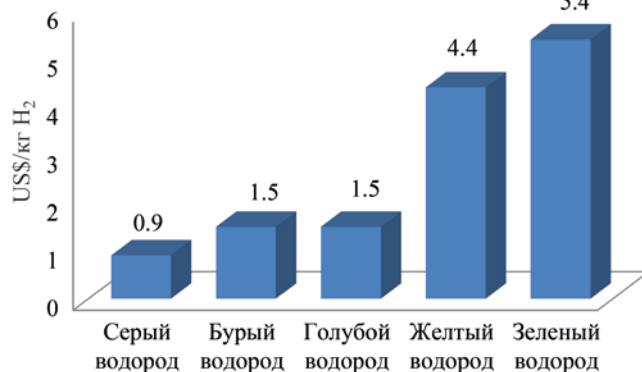


Рис. 2. Стоимость производства различных видов водорода.

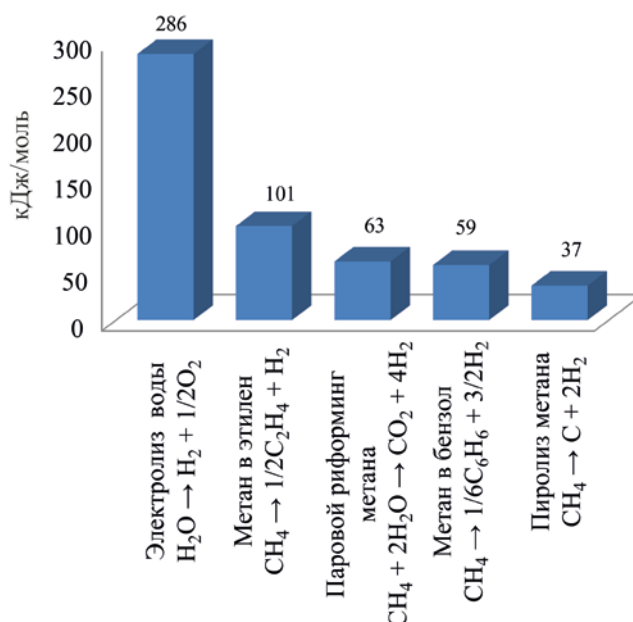


Рис. 3. Затраты энергии на образование водорода в различных реакциях.



**Рис. 4.** Демонтаж отработавших лопастей ветровых генераторов и кладбище лопастей, изготовленных из неподдающихся разложению композитных материалов [12].

Стоимость водорода, производимого с использованием возобновляемых источников энергии, в 3–5 раз (рис. 2) выше, чем традиционными технологиями [9, 10], а значительное увеличение доли возобновляемых источников в глобальном энергобалансе невозможно без нарушения природных экосистем. Это легко показать на примере солнечной энергии, которая является первичным источником всех видов ВИЭ (гидроэнергии, энергии ветра, морских приливов и волн). Поток солнечной радиации в полдень на экваторе составляет  $\sim 1$  кВт/м<sup>2</sup>. С учетом смены дня и ночи его среднее значение в три раза ниже, а в умеренных широтах оно ниже еще в два раза,  $\sim 150$  Вт/м<sup>2</sup>. При фактической эффективности солнечных панелей менее 24% для обеспечения средней мощности в 1 кВт требуется площадь в  $\sim 30$  м<sup>2</sup>.

Мировое производство энергии в 2019 г. составило 160 тыс. ТВтч [8], что требует установленной мощности  $\sim 1.8 \cdot 10^{10}$  кВт. Чтобы обеспечить производство такого объема энергии за счет солнечных панелей необходимо будет покрыть ими  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  м<sup>2</sup>. С учетом вспомогательных площадей для оборудования, дорог, линий электропередач и т.д. необходимая площадь превысит 1 млн км<sup>2</sup>. Поскольку вся площадь земной суши составляет  $\sim 150$  млн км<sup>2</sup>, и не более половины ее пригодно для хозяйственной деятельности, изъятие такой значительной ее доли из экономического пользования и природных экосистем нанесет непоправимый ущерб и тем, и другим.

Еще более сложная проблема состоит в том, что земная кора не содержит необходимого количества

не только редких элементов, используемых при производстве солнечных панелей, но и обычных конструкционных материалов для их установки на таких огромных площадях. А производство, замена и последующая утилизация панелей и другого оборудования будут сопровождаться выбросом в окружающую среду такого количества токсичных веществ, что нынешние экологические проблемы на этом фоне покажутся тривиальными. Например, уже сейчас проблема утилизации стремительно растущего количества отработанных гигантских 90-метровых лопастей ветрогенераторов, изготовленных из неподдающихся разложению композитных материалов, представляет серьезную проблему во всех странах, развивающих этот вид энергетики (рис. 4).

Часто в качестве аргумента в пользу развития водородной энергетики, особенно в России, приводят наличие значительных свободных мощностей в отечественной гидроэнергетике и атомной энергетике. Поэтому необходимо оценить «водородный» потенциал и этих источников. Мировое производство гидроэнергии в 2019 г. составило  $\sim 38$  эксаДжоулей ( $\sim 1 \cdot 10^{13}$  кВт·ч) [8], что исходя из удельного расхода 50 кВт·ч электроэнергии на 1 кг H<sub>2</sub> позволяет производить всего 200 млн т H<sub>2</sub> в год, всего в два раза больше его текущего производства. Поэтому гидроэнергетика, глобальный потенциал которой уже реализован более чем на 20%, не в состоянии обеспечить требуемый объем производства водорода.

Мировая атомная энергетика произвела в 2019 г.  $\sim 25$  эксаДжоулей ( $0.7 \cdot 10^{13}$  кВт·ч) [8], что позволяет



производить всего 140 млн т  $H_2$  в год, то есть всего в полтора раза больше его нынешнего производства. Даже без учета неоднозначного отношения общественности многих стран к атомной энергетике, ее возможности ограничены запасами урана в земной коре, в которых уже сейчас ощущается явный дефицит. Иногда упоминаемые возможности использования реакторов-размножителей (бридеров) и вовлечения в топливный цикл тория – явно технологии не сегодняшнего дня. Таким образом, ни гидроэнергетика, ни атомная энергетика, ни тем более ВИЭ, в принципе неспособны обеспечить производство такого объема водорода, который мог бы принципиально повлиять на его антропогенную эмиссию в атмосферу [13] (рис. 5).

### Современные технологии получения водорода

Приведенный выше анализ однозначно показывает, что до промышленного освоения термоядерной энергии основным промышленно значимым источником водорода остаются ископаемые углеводороды. Наиболее эффективной современной технологией производства водорода является его выделение из синтез-газа, получаемого паровым риформингом метана (Steam Reforming of Methane – SRM) (~80% текущего производства  $H_2$ ) и угля (~20% производства  $H_2$ ). Поэтому помимо проблем хранения, транспортировки и распределения больших объемов водорода, которые все еще очень далеки от практически приемлемых решений, фундаментальной проблемой развития водородной энергетики является снижение стоимости конверсии углеводородов в водород и снижение удельных затрат энергии в этих процессах. Для конверсии природного газа – это снижение удельного расхода самого природного газа.

С учетом последующей паровой конверсии получаемого CO в реакции водяного газа из одной молекулы метана в процессе SRM можно получить четыре молекулы водорода:

Паровая конверсия метана (ПКМ, SRM):



Конверсия CO в водород (реакция водяного газа, Water Gas Shift Reaction, WGSR):

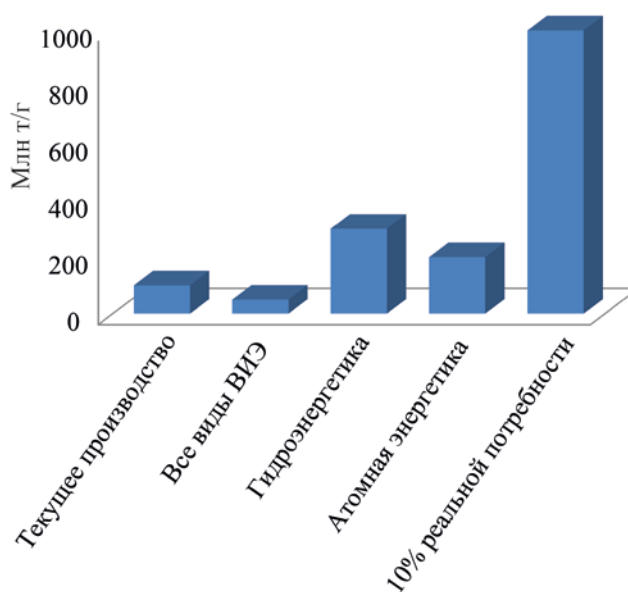


Рис. 5. Мировой объем производства водорода, глобальный потенциал его различных источников и реальная потребность для заметного снижения эмиссии  $CO_2$ .

Теплосодержание четырех молекул ( $4 \cdot 10800 \text{ кДж/м}^3$ ) примерно соответствует теплосодержанию исходной молекулы метана ( $35840 \text{ кДж/м}^3$ ). Однако, учитывая большие дополнительные энергозатраты на нагрев сырья и производство большого объема пара, реальное потребление метана в этой сложной энергоемкой технологии почти в два раза выше.

Поскольку получение водорода путем парового риформинга сопровождается образованием ~9 кг  $CO_2$ /кг  $H_2$ , такой водород в соответствии с «экологической» градацией считается «серым» (рис. 1), то есть это экологически непривлекательным, и не решает задачу сокращения выбросов  $CO_2$ . Чтобы сделать полученный водород «экологически» более чистым и подходящим для решения экологических и климатических проблем, необходимо улавливать как  $CO_2$ , содержащийся в дымовых газах, образующихся при нагревании реагентов и производстве пара, так и  $CO_2$ , образующийся при паровой конверсии CO. То есть необходимо дополнить процесс SRM улавливанием и захоронением углерода (Carbon Capture and Storage – CCS). Водород, полученный в таком комбинированном процессе, уже можно квалифицировать как «голубой». Однако для этого требуется допол-

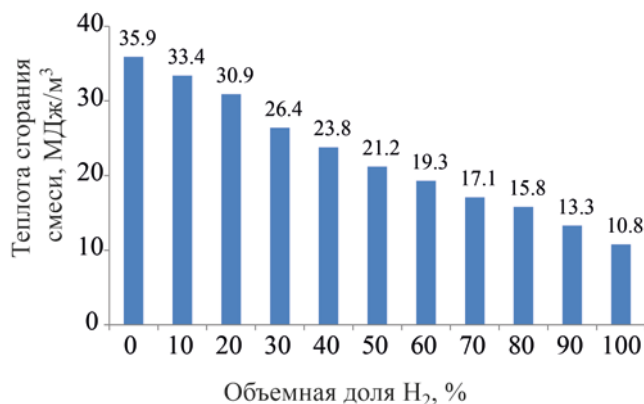
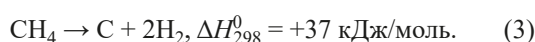


Рис. 6. Зависимости теплоты сгорания метановодородных смесей от объемной доли водорода [16].

нительная энергия и, соответственно, дополнительное потребление природного газа. То есть, наряду со значительными капитальными затратами и сложной переработкой, производство «голубого» водорода путем объединенной технологии SRM+CCS потребует почти утроения общего потребления природного газа и, соответственно, темпов истощения его природных ресурсов. По имеющимся оценкам, добавление технологии CCS увеличивает капитальные затраты на SRM почти на 90% и эксплуатационные расходы на 30%. Стоимость водорода увеличивается почти в 1.5 раза, до 1.8 евро/кг [14].

В принципе, «голубой» водород может быть получен путем пиролиза природного газа с образованием водорода и твердого углерода [15].



Такие процессы в настоящее время используются в ограниченных масштабах для производства технического углерода. Термодинамика процесса требует дополнительного расхода около 20% получаемого водорода. Однако, принимая во внимание неизбежные технологические потери, фактическое количество дополнительного газа, необходимого для производства водорода, составит ~50%. Таким образом, для пиролиза 1 м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> потребуется ~1.5 м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> с общей теплотой сгорания около 54000 кДж. При этом будет получено 2 м<sup>3</sup> водорода с общей теплотой сгорания 21600 кДж. Общая энергетическая эффективность этого процесса со-

ставляет всего 40%. Чтобы получать такое же количество энергии при переходе с природного газа на водород, получаемый пиролизом метана, необходимо будет увеличить глобальное потребление метана примерно в 2.5 раза, с нынешних ~4 трлн м<sup>3</sup>/год до ~10 трлн м<sup>3</sup>/год. Чтобы достичь такого уровня, мировой экономике потребуются десятилетия и огромные инвестиции, а газовые ресурсы будут истощаться в 2.5 раза быстрее. Кроме того, ежегодно будет образовываться ~5 млрд т мелкодисперсного угля, мировой спрос на который составляет всего около 14 млн т. Для того чтобы полученный водород считался «голубым», этот углерод нельзя использовать в качестве топлива, и возникнет дополнительная проблема его захоронения.

### Проблемы водородной энергетики

Помимо чисто энергетических проблем на пути промышленной водородной энергетики стоит значительное число сложных технологических барьеров [16]. Одной из наиболее серьезных проблем является отсутствие соответствующей инфраструктуры для хранения, транспортировки и распределения его промышленных объемов. Более того, для большинства этих проблем до сих пор даже нет практически приемлемых решений. Большой технической проблемой является разрушение большинства металлов под воздействием диффузии в них водорода (стресс-коррозии), особенно при высоких давлениях, что предъявляет значительно более жесткие требования к трубопроводам для транспортировки водорода по сравнению с трубопроводами для транспортировки природного газа [17] и резко повышает их стоимость. В качестве одной из мер снижения воздействия водорода на материал газопровода и снижения рисков, связанных с его высокой взрывоопасностью, рассматривается возможность трубопроводной транспортировки водорода в смеси с метаном [18].

При обосновании преимуществ водорода указывают на его высокую энергоемкость, но при этом рассматривают теплоту сгорания единицы массы, что не отражает реальную ситуацию с технологиями его хранения и транспортировки. На рис. 6 представлена зависимость теплоты сгорания метановодородных смесей с различной концентрацией водорода, из которой видно, что энергия, содержа-

сящая в одном объеме водорода, в 3.5 раза меньше энергии, получаемой из такого же объема метана.

Еще одной проблемой, редко обсуждаемой при анализе водородной энергетики, но крайне негативно влияющей на экономику практически всех направлений использования водорода, являются значительно более высокие затраты энергии на его компримирование по сравнению с природным газом. На рис. 7 представлено увеличение требуемой энергии на сжатие 1 кг смеси для повышения давления на 1 МПа по мере увеличения доли водорода. Видно, что затраты энергии увеличиваются примерно в 8.5 раза, что делает процесс трубопроводной транспортировки водородосодержащих смесей менее энергоэффективным. Это связано с тем, что кинематическая вязкость водорода при нормальных условиях составляет 91.05 против 14.7 сСт у метана. Вследствие большей кинематической вязкости метано-водородной смеси происходит рост потерь давления в трубопроводе, что требует создания больших избыточных давлений на компрессорных станциях для уже построенных трубопроводов, либо уменьшение расстояния между компрессорами для проектируемых трубопроводных систем [16].

Экономика и энергетика процессов хранения и транспортировки сжиженного водорода также не очень привлекательны. Плотность жидкого водорода  $\sim 70 \text{ кг/м}^3$ , что в 5.9 раза меньше, чем плотность сжиженного природного газа, а это значит, что при одинаковых условиях в одном и том же объеме резервуара можно хранить или транспортировать в 5.9 раз меньше жидкого водорода, чем сжиженного природного газа. При исключительно низкой температуре жидкого водорода трудно обеспечить его стабильность, что приводит к существенным потерям при его длительном хранении.

Тем не менее, японская компания Kawasaki Heavy Industries, Ltd. реализует совместно с партнерами из правительственных органов и частных компаний Японии и Австралии демонстрационный проект получения, транспортировки и использования жидкого водорода. В рамках этого проекта на предприятии в Австралии из местных залежей лигнита будут получать синтез-газ с захоронением образующегося  $\text{CO}_2$  и затем сжиженный водород. Сжиженный водород будет транспортироваться специальным танкером в Японию [19]. Вместим-

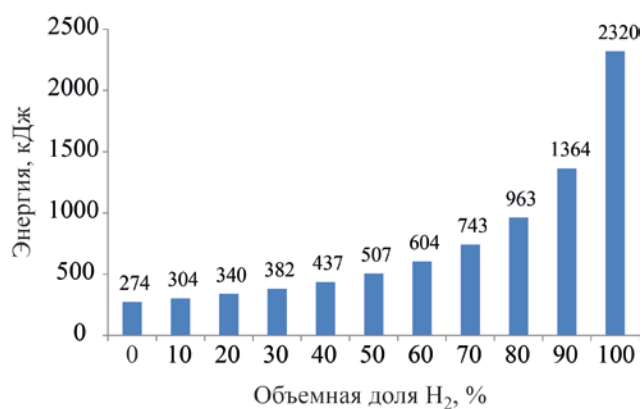


Рис. 7. Зависимость затрат энергии на сжатие 1 кг метано-водородной смеси давлением 1 МПа от объемной доли водорода [16].

мость пилотного танкера всего  $1250 \text{ м}^3$ , что соответствует транспортировке менее 90 т топлива. Хотя обсуждается возможность создания в будущем танкеров вместимостью до 40 тыс.  $\text{м}^3$ , даже в этом случае энергия сгорания перевозимого водорода будет примерно в 12.5 раз ниже энергии, перевозимой типовым СПГ-танкером.

Наряду с не имеющими пока экономически и технологически приемлемых решений проблем долговременного хранения и транспортировки промышленно значимых объемов водорода, важными вопросами на пути его широкого использования, особенно в быту и на транспорте, остаются вопросы безопасности. Высокая скорость горения водорода, примерно в пять раз превышающая скорость горения метана, и значительно более широкие концентрационные пределы распространения пламени (рис. 8), требуют более жестких норм техники безопасности при работе с ним.

Одна из реальных возможностей обеспечить безопасное использование водорода в энергетике – переход на метановодородные смеси. Как показывают исследования, при концентрации водорода в таких смесях до 40% пределы их самовоспламенения [21, 22] и скорость горения [20] еще не сильно отличаются от таковых для метановоздушных смесей (рис. 8), что позволяет работать при соблюдении уже хорошо отработанных требований безопасности для работы с природным газом.

Указанные выше проблемы хранения и транспортировки больших объемов водорода заставля-

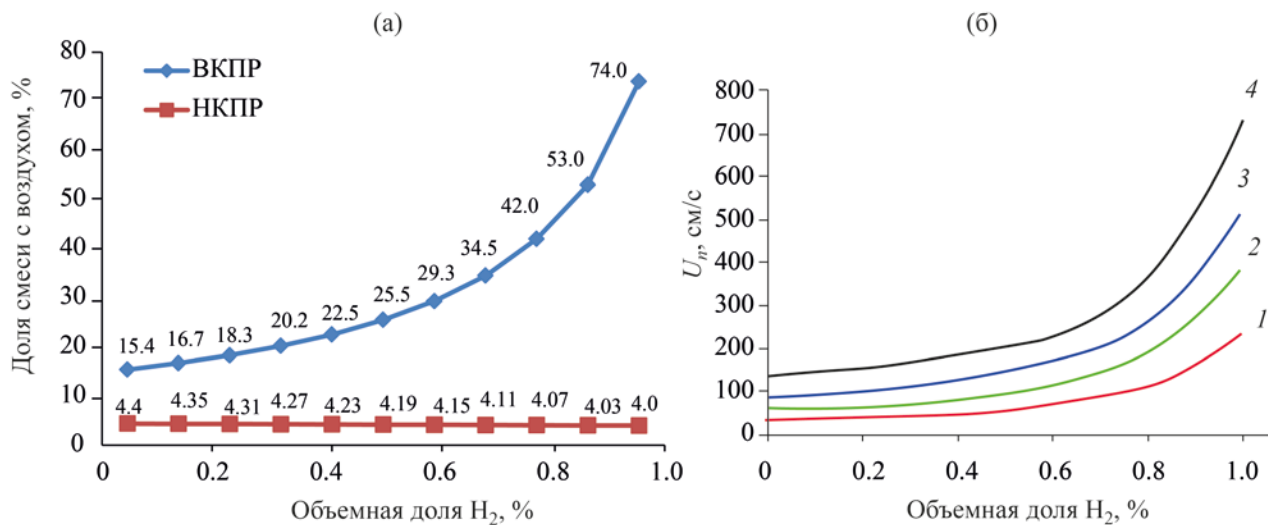


Рис. 8. Зависимость от объемной концентрации водорода в метано-водородной смеси: а – нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) и верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР) [16]; б – ламинарной скорости пламени [20].  $T_0$ , К: 300 (1), 400 (2), 500 (3), 600 (4).

ют искать обходные пути, в частности, возможность его хранения и транспортировки в виде альтернативных водородсодержащих продуктов, к наиболее перспективным из которых можно отнести аммиак, метанол, диметилловый эфир и другие водородсодержащие соединения. Например, японская компания Chiyoda Corporation разрабатывает возможность создания цепочки поставки водорода в Японию на основе гидрирования толуола в метилциклогексан, имеющий физические параметры, аналогичные жидким нефтехимическим продуктам и обеспечивающий минимальные потери при транспортировке на большие расстояния [23]. Однако масса обратимо выделяемого водорода при дегидрировании метилциклогексана в толуол составляет всего 6% от массы транспортируемого груза.

#### Распределенное малотоннажное производство водорода как альтернатива технологиям его хранения и транспортировки

Поскольку более 90% производимого в мире водорода потребляется непосредственно на месте его производства (так называемый кэптивный продукт) и лишь менее 10% поставляется специализированными компаниями, работающими на рынке промышленных газов (Air Liquide, Linde, Praxair и др.), проблемы хранения и транспортировки водо-

рода до сих пор не сдерживали развитие его производства. Однако в связи с интересом к использованию водорода в энергетике они становятся определяющими. Одна из реальных возможностей обойти сложные проблемы хранения и транспортировки водорода – его распределенное малотоннажное производство из различных углеводородных продуктов непосредственно в местах потребления. Такой подход может быть особенно привлекательным при использовании водорода в коммунальном и транспортном секторе мегаполисов для снижения локальной экологической нагрузки. Однако традиционные крупнотоннажные газохимические технологии непригодны для решения этой задачи, так как их экономическая эффективность резко падает с уменьшением масштаба производства [24]. Необходимы принципиально новые технологии, рассчитанные на эффективное малотоннажное производство водорода.

Одной из таких технологий может стать комбинированный процесс на основе сочетания некаталитической матричной конверсии углеводородных газов в синтез-газ с последующей каталитической паровой конверсией содержащегося в синтез-газе СО в дополнительное количество водорода по реакции водяного газа [25, 26]. Это автотермический процесс, позволяющий перерабатывать углеводо-



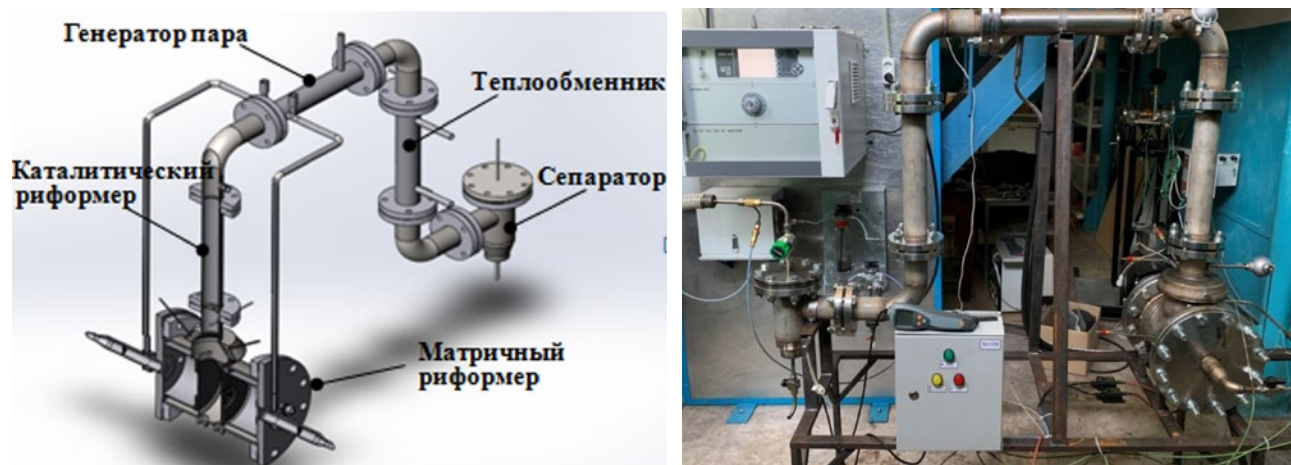


Рис. 9. 3D-схема и общий вид демонстрационной установки комбинированного матричного и каталитического риформинга для получения водорода.

родные газы практически любого состава и происхождения. Процесс обеспечивает большой диапазон возможной производительности, от нескольких м<sup>3</sup>/ч до нескольких тысяч м<sup>3</sup>/ч по водороду. Высокая удельная объемная производительность, более чем в 10 раз превышающая таковую в традиционных технологиях, обеспечивает компактность и низкую металлоемкость процесса, а простота конструкции и обслуживания – низкие капитальные и операционные затраты (рис. 9).

Матричная конверсия открывает возможность малотоннажного производства водорода на основе практически любых местных ресурсов непосредственно на месте его потребления и обеспечивает существенное снижение удельного углеродного следа по сравнению с паровым риформингом [25, 26].

### Перспективы водородной энергетики для России

Принимая во внимание растущий за рубежом интерес к низкоуглеродному топливу и, прежде всего, водороду, своим распоряжением от 12 октября 2020 г. правительство РФ утвердило план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г.» [27]. Задачей плана является организация работ по формированию в РФ высокопроизводительной ориентированной на экспорт области производства водорода и развитию водородной энергетики. Огромный ресурсный

потенциал РФ (запасы природного газа, нефти и угля) и наличие незагруженных мощностей в атомной и гидроэнергетике, при наличии спроса, гарантируемого Парижским соглашением по климату и ожидаемым введением Евросоюзом «углеродного налога», делает экспорт низкоуглеродного топлива (водорода или его смеси с природным газом) достаточно перспективным направлением. Оно вполне может компенсировать прогнозируемые для РФ потери от введения «углеродного налога» на импорт в страны Евросоюза, который предполагает, что поставщики товаров на европейский рынок, которые сжигают слишком много ископаемого топлива в процессе их производства, будут платить за каждую тонну углекислого газа, попавшего в атмосферу.

Без масштабных поставок водорода из России выполнение собственных планов стран Европейского союза по развитию водородной энергетики нереально. Поэтому развитие ориентированного на экспорт производства водорода в РФ представляется вполне целесообразным. Учитывая нерешенные пока проблемы хранения и транспортировки больших объемов водорода, наиболее реальным способом экспорта низкоуглеродного топлива могла бы быть поставка смеси природного газа с водородом (20–40 об. %) по уже существующим газопроводам. Поскольку пределы воспламенения и скорость горения таких смесей еще не сильно отличаются от пределов воспламенения и скорости

горения природного газа [16, 20–22], это позволяет эксплуатировать их на том же оборудовании и при соблюдении тех же мер безопасности, которые давно отработаны для работы с природным газом.

Менее очевидна целесообразность перехода на водород для отечественной энергетики. Необходимо ясно понимать, что в основе жесткой «экологической позиции» европейских стран стоят два очевидных фактора: страх возможности резкого изменения комфортного климата Европы даже при незначительных изменениях параметров течения Гольфстрим, и ограниченность энергоресурсов, вынуждающая их более широко использовать значительно более дорогие возобновляемые источники энергии. Последнее серьезно подрывает их конкурентоспособность на мировом рынке, что и объясняет стремление вынудить такие страны, как Россия, обладающие обильными и дешевыми энергоресурсами, также перейти на более дорогие «экологически чистые» источники. Учитывая климатические и энергетические реалии России, масштабный переход на ВИЭ или использование водорода вряд ли соответствует ее экономическим интересам.

Конечно, большинство типов газовых турбин может работать на водороде или его смеси с природным газом. Недавно компании «НОВАТЭК» и Nuovo Pignone заключили соглашение о сотрудничестве в области электрических и газотурбинных решений по добыче и сжижению газа, а также сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ , в рамках которого приступят к реализации проекта по переводу турбин на работу на водородсодержащих смесях [28]. Но как показывают исследования, переход на использование в энергетике метановодородных смесей с содержанием водорода менее 50% не дает дополнительных экологических преимуществ, кроме соответствующего снижения эмиссии  $\text{CO}_2$  из-за более высокой доли водорода, причем только непосредственно в месте потребления. Но при этом, как было показано выше, вырастут глобальная эмиссия  $\text{CO}_2$  в атмосферу, стоимость получаемой энергии и расход первичных энергоресурсов. Учитывая, что энергетический КПД экологически чистого преобразования природного газа в водород, как было показано выше, ~30%, КПД современных газовых турбин также ~30%, суммарный энергетический коэффициент полезного действия использования

природного газа по такой схеме будет ~10%. Вряд ли желание следовать зарубежным политическим и экономическим трендам оправдывает реализацию такой низкоэффективной схемы [29].

Видимо, в отечественной модели развития водородной энергетики, помимо производства водорода, ориентированного на экспорт, имеет смысл ограничиться его использованием в транспортном секторе крупных мегаполисов для решения локальных экологических проблем. А основным, помимо энергетики, направлением использования отечественных углеводородных ресурсов должна стать их переработка в нефтехимические продукты с высокой добавленной стоимостью.

## ВЫВОДЫ

Представленный выше анализ показывает, что:

- альтернативные источники энергии (ВИЭ) в принципе неспособны обеспечить промышленные объемы производства водорода;
- гидроэнергетика и атомная энергетика могут производить водород без эмиссии  $\text{CO}_2$ , но в объеме не более нескольких процентов от мирового энергобаланса;
- до практического освоения энергии термоядерного синтеза ископаемые углеводороды остаются единственным реальным ресурсом для развития водородной энергетики;
- получение  $\text{H}_2$  пиролизом природного газа потребует кратного увеличения добычи и потребления газа и создаст проблему ежегодного захоронения миллиардов тонн мелкодисперсного углерода;
- глобальный переход к процессам получения энергии с захоронением образующегося  $\text{CO}_2$  потребует кратного увеличения добычи и потребления углеводородных ресурсов и повысит цену водорода примерно в 2 раза;
- самый эффективный промышленный способ получения водорода – конверсия природного газа, а самый эффективный способ снижения углеродного следа – повышение эффективности этого процесса;
- водород – топливо с низким объемным содержанием энергии; его транспортировка и хранение требуют значительно более высоких капитальных и энергозатрат, чем для природного газа;

– наиболее реальный путь преодоления не имеющих пока экономически эффективного решения проблем транспортировки и хранения водорода – его рассредоточенное малотоннажное производство непосредственно на месте потребления;

– такие отечественные технологии есть, и нужно предпринимать максимальные усилия для их реализации.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

В.С. Арутюнов, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0339-0297>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнов В.С., Лисичкин Г.В. Энергетические ресурсы XXI столетия: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо? // Успехи химии. 2017. Т. 86. №8. С. 777–804. <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4723/pdf> [Arutyunov V.S., Lisichkin G.V. Energy resources of the 21st century: problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels? // Russ. Chem. Rev. 2017. V. 86. № 8. P. 777–804. <https://doi.org/10.1070/RCR4723>].
2. Арутюнов В.С. Концепция устойчивого развития и реальные вызовы цивилизации // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 3. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0869587321030026> [Arutyunov V.S. The concept of sustainable development and real challenges of civilization // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2021. V. 91. № 2. P. 102–110. <https://doi.org/10.1134/S1019331621020027>].
3. Шполянская Н.А. Климат и его динамика в плейстоцене–голоцене как основа для возникновения разнообразных рисков при освоении районов криолитозоны // Геориск. 2019. № 1. С. 6–24. [http://www.geomark.ru/journals\\_list/zhurnal-georisk-1-2019/](http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-1-2019/)
4. Арутюнов В.С. Глобальное потепление: Миф или реальность? Катастрофа или благо? // Российский химический журнал. 2005. Т. 49. № 4. С. 102–109.
5. Arutyunov V.S. Is it possible to stabilize the Earth climate by transition to renewable energy? // Eurasian Chem.-Technol. J. 2021. V. 23. № 2. P. 67–75. <https://doi.org/10.18321/ectj1076>
6. Lindsey R. 2020. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=The%20global%20average%20atmospheric%20carbon,least%20the%20past%20>
7. The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
8. BP Statistical Review of World Energy, 2020. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
9. Якубсон К.И. Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в российской федерации // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. № 12. С. 1675–1695.
10. Gardner D. Hydrogen production from renewables // Renewable Energy Focus. 2009. V. 9. № 7. P. 34–37. [https://doi.org/10.1016/s1755-0084\(09\)70036-5](https://doi.org/10.1016/s1755-0084(09)70036-5)
11. Vitchev D. A brief analysis of the physical requirements for converting coal-fired power plants to hydrogen // Academia Letters, Article 2884. <https://doi.org/10.20935/AL2884>
12. Ладыгина О. Темная сторона альтернативной энергетики // Discovery. 2021. № 5 (140). С. 14–16.
13. Arutyunov V.S. On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons // Academia Letters. 2021. Article 3692. <https://doi.org/10.20935/AL3692>
14. Mitrova N., Melnikov Y., Chugunov D. The hydrogen economy – a path towards low carbon development // Skolkovo Energy Centre, Moscow School of Management. 2019. Skolkovo. [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Hydrogen-economy\\_Eng.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Eng.pdf)
15. Amin A.M., Croiset E., Epling W. // Review of methane catalytic cracking for hydrogen production // Int. J. Hydrogen En. 2011. V. 36. P. 2904–2935. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.035>
16. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 421–431. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.421>
17. Hydrogen pipeline systems. Doc 121/14. European Industrial Gases Association AISBL. <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC121.pdf>
18. Соколинский Ю.А., Сосна М.Х., Галикеева Л.П. Технологические аспекты транспортировки метановодородной смеси по трубопроводу «Северный поток-2» // НефтеГазоХимия. 2021. № 1–2. С. 12–16. <https://doi.org/10.24412/2310-8266-2021-1-2-12-16>
19. Kawasaki Hydrogen Road. <https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/index.html>
20. Арутюнов А.В., Беляев А.А., Иновенков И.Н., Арутюнов В.С. Влияние водорода на нормальную скорость

- горения метан-воздушных смесей при повышенных температурах // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 4. С. 4–10. <https://doi.org/10.30826/CE19120401>
21. Трошин К.Я., Беляев А.А., Арутюнов А.В., Царенко А.А., Никитин А.В., Арутюнов В.С. Влияние давления на самовоспламенение метановодородных смесей с воздухом. Горение и взрыв. 2020. Т. 13. № 1. С. 18–32. <https://doi.org/10.30826/CE20130102>
  22. Арутюнов В.С., Трошин К.Я., Беляев А.В., Арутюнов А.В., Никитин А.В., Стрекова Л.Н. Влияние состава газовых смесей на задержку их самовоспламенения и нормальную скорость пламени // Горение и плазмохимия. 2020. Т. 18. № 2. С. 61–80.
  23. SPERA Hydrogen. Chiyoda's Hydrogen Supply Chain Business. <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/>.
  24. Арутюнов В. Альтернативные энергоносители из углеводородных газов // Энергетическая политика. 2021. № 7 (161). С. 56–69. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_7161\\_56](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_7161_56)
  25. Арутюнов В.С., Савченко В.И., Седов И.В., Никитин А.В. Некаталитические процессы переработки природных и попутных газов // Катализ в промышленности. 2021. Т. 21. № 4. С. 227–237. <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2021-4-227-237>
  26. Арутюнов В.С., Никитин А.В., Стрекова Л.Н., Савченко В.И., Седов И.В., Озерский А.В., Зимин Я.С. Матричная конверсия природного газа в синтез-газ и водород как перспективное направление в газохимии и энергетике. Журнал технической физики. 2021. Т. 91. №5, С. 713–720. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.05.50681.265-20>
  27. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». <https://docs.cntd.ru/document/566069233> (последнее посещение 09.01.2021).
  28. <https://globuc.com/ru/news/novatyek-i-nuovo-pignone-podpisali-soglashenie/> (последнее посещение 02.02.2021).
  29. Арутюнов В. Российский акцент в мировом энергопереходе // Энергетическая политика. 2021. № 8 (162). С. 30–41. [https://doi.org/10.46920/2409-5516\\_2021\\_8162\\_30](https://doi.org/10.46920/2409-5516_2021_8162_30)