

## ПРОБЛЕМЫ И ВЫЗОВЫ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.С. Арутюнов

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,  
ул. Косыгина, 4, Москва, Россия,  
Институт проблем химической физики РАН, пр. Семенова, 1, Черноголовка, Россия

### АННОТАЦИЯ

Для существенного снижения глобальной эмиссии CO<sub>2</sub> за счет использования в качестве энергоносителя водорода его производство должно достигать не менее 1 млрд т/г. Такой объем водорода не может быть получен за счет возобновляемых источников энергии, гидроэнергетики или атомной энергетики. До промышленного освоения энергии термоядерного синтеза единственным реальным источником такого объема водорода может быть только конверсия природного газа. Поэтому наиболее эффективный способ снижения углеродного следа энергетики – повышение эффективности использования углеводородов, в том числе их конверсии в водород. Как энергоноситель водород обладает серьезными недостатками: низким объемным содержанием энергии, большими затратами энергии на его получение, сжижение и компримирование, высокой взрывоопасностью. На начальном этапе развития водородной энергетики наиболее реальный путь преодоления сложных проблем транспортировки и хранения водорода – его рассредоточенное малотоннажное производство непосредственно в местах потребления.

*Ключевые слова:* водородная энергетика, водород, углеводороды, конверсия, синтез-газ.

### 1. Введение

Стремительно растущий интерес к водородной энергетике делает необходимым тщательный анализ ее реальных перспектив и возможностей. Прежде всего, стоит напомнить, когда и в каком контексте впервые возникло понятие «водородная энергетика». В конце 1960-х годов советские физики под руководством академика Л.А. Арцимовича разработали магнитные ловушки типа ТОКОМАК, позволившие резко увеличить время удержания плазмы при термоядерном синтезе. Казалось, еще немного усилий и постоянно действующий термоядерный реактор будет создан. И тогда возник вопрос о том, как хранить и передавать огромное количество энергии, которое будет непрерывно генерировать термоядерный реактор, работающий в режиме базовой нагрузки. Ответом стала идея использовать эту обильную и дешевую энергию для получения водорода электролизом воды, сделав его средством аккумуляции и транспортировки энергии, основным энергоносителем.

Проблема освоения «термояда» оказалась гораздо сложнее, чем представлялось в то время, устойчивую термоядерную реакцию не удалось осуществить до сих пор и вряд ли удастся осуществить в ближайшее время. А вот ее тень, водородная энергетика, отделилась от породившего ее предмета и, как в известной пьесе Е. Шварца, зажила своей самостоятельной и не всегда реальной жизнью. Поэтому необходима ее привязка к современным реалиям.

### 2. Масштаб производства водорода, необходимый для решения климатических проблем

Современный всплеск интереса к водородной энергетике связан с обострением климатических проблем и попытками регулирования наблюдаемых климатических процессов. Не вдаваясь в детали и обсуждение самой проблемы изменения климата [1, 2], отметим, что даже политикам становится очевидно то, что специалистам было очевидно еще полвека

тому назад: никакие возобновляемые источники энергии (ВИЭ) не могут обеспечить производство энергии в объеме, необходимом для современной экономики [3, 4]. Как реакция на это возникла идея решить проблему антропогенной эмиссии парниковых газов, прежде всего  $\text{CO}_2$ , заменой углеводородных топлив водородом. Переход на водород в качестве глобального энергоносителя фактически провозглашен целью Парижского соглашения по климату [5]. Но насколько реальна эта цель?

В настоящее время ежегодная мировая добыча нефти достигла 4,5 млрд т, природного газа – 4 трлн  $\text{м}^3$ , угля – 8 млрд т [6], что в совокупности составляет ~12 млрд т в нефтяном эквиваленте. Около 95% этих углеводородов сжигается в качестве энергетического и транспортного топлива. Чтобы заметно повлиять на глобальные выбросы  $\text{CO}_2$ , необходимо заменить водородом не менее 10 % этих углеводородов, то есть ежегодно производить не менее 1 млрд т  $\text{H}_2$ . Для полной замены потребуется ~10 млрд т  $\text{H}_2$ , причем получаемого из неуглеродных источников либо с улавливанием образующегося при этом  $\text{CO}_2$ .

Мировое производство водорода достигло в 2020 году 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 в произ-

водстве аммиака [7]. Более 3/4 этого водорода производится из природного газа, на что в 2019 г. было израсходовано 205 млрд  $\text{м}^3$  газа, примерно 5% его мировой добычи. Остальной водород был получен из угля. Вклад электролиза воды в промышленное производство водорода значительно меньше 1%.

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

Однако богатство цветовой палитры источников водорода и экологическая привлекательность процессов, обозначенных более светлыми оттенками, не соответствуют их ресурсной, технологической и экономической привлекательности. На рис. 2а представлена удельная стоимость водорода, получаемого различными методами, которая однозначно определяет структуру современных методов его промышленного производства, отдающих абсолютное предпочтение процессам конверсии углеводородов, прежде всего, природного газа. Безусловно, существуют перспективы определенного снижения стоимости получения водорода «зелеными» технологиями. Но эти возможности жестко ограничены термодинамикой соответствующих процессов (рис. 2б), которая отнюдь не благоприятствует альтернативным способам его производства, в основе которых, в большинстве случаев, лежит электролиз воды.



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

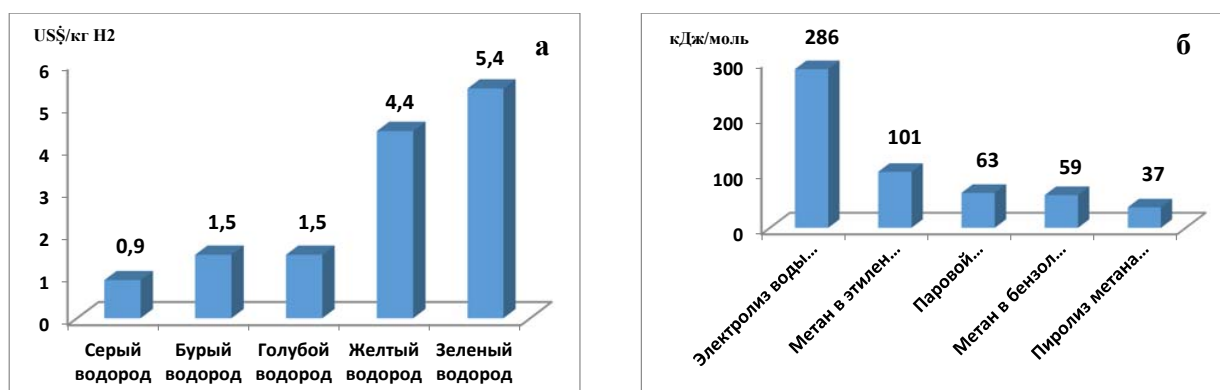


Рис. 2. Стоимость производства различных видов водорода (а) и затраты энергии на образование водорода в различных процессах (б).

### 3. Возможности ВИЭ в обеспечении мировой энергетики водородом

Основным методом получения «зеленого» водорода является электролиз с использованием возобновляемых источников энергии [8]. Теоретически для производства 1 кг H<sub>2</sub> требуется 39 кВт\*ч электроэнергии. Даже при сильно завышенном КПД электролиза воды 80% и без учета КПД производства самой электроэнергии и неизбежных потерь на ее преобразование, реально для этого потребуется не менее 50 кВт\*ч энергии из первичных источников. Поэтому все мировое производство энергии всеми видами возобновляемых источников (2800 ТВт\*ч в 2019 году [6]) позволяет получать немногим более 50 млн т H<sub>2</sub> ежегодно, что почти вдвое ниже его текущего производства.

Перспектива достижения требуемых объемов производства водорода за счет будущего развития ВИЭ, например солнечной энергетики, как показывает простая оценка, нереальна. Поток солнечной радиации в полдень на экваторе составляет ~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 и составляет ~150 Вт/м<sup>2</sup>. При реальном КПД солнечных панелей менее 24% для обеспечения средней мощности в 1 кВт требуется площадь в ~30 м<sup>2</sup> [9]. Мировое производство энергии в 2019 году составило 160 000 ТВт\*ч [6]. Чтобы обеспечить производство такого объема энергии за счет солнечных панелей необходимо будет покрыть ими площадь в ~6 10<sup>11</sup> м<sup>2</sup> или 0,6 млн км<sup>2</sup>. С учетом вспомогательных площадей для оборудования, дорог, линий электропередач и т.д. необходимая площадь превысит 1 млн км<sup>2</sup> [9]. Поскольку

вся площадь земной суши составляет ~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.

Решение этой задачи за счет других видов ВИЭ (ветровая энергетика, энергия морских волн и приливов, биотопливо) еще менее реально. Во-первых, все они являются производными солнечной радиации, поэтому их глобальный потенциал существенно ниже. А во-вторых, плотность потока производимой ими энергии ниже почти на порядок, поэтому получение энергии за их счет потребует примерно в десять раз большей площади, чем солнечная энергетика.

Получение за счет ВИЭ объемов энергии, сопоставимых с ее сегодняшним глобальным потреблением, нереально также из-за огромной потребности не только в редких элементах, необходимых для производства и регулярного обновления быстро выходящего из строя сложного энергоемкого в производстве оборудования, значительно превышающей их содержание в земной коре. На это может не хватить даже обычных конструкционных материалов, например, алюминия, на что в свое время обратил внимание академик В.А. Легазов [10].

Большим заблуждением являются и представления об экологической чистоте возобновляемых источников энергии [4]. Понятия «возобновляемый» и «экологически чистый» источник энергии отнюдь не являются синонимами. Например, производство, регулярная замена и последующая утилизация солнечных панелей и сопутствующего им оборудования сопровождается постоянным выбросом

в окружающую среду большого количества различных токсичных веществ. Размещаемые в пустынях огромные по площади солнечные панели или зеркала для концентрирования солнечного излучения необходимо регулярно промывать дефицитной там чистой водой. Но даже это не защищает их поверхность от быстрой эрозии под воздействием песка и ветра. Уже сейчас во всех странах, развивающих ветровую энергетику, остро стоит проблема утилизации стремительно растущего количества отработанных гигантских лопастей ветрогенераторов, изготовленных из неподдающихся разложению композитных материалов [11].

Как один из аргументов в пользу развития водородной энергетики, особенно в России, отмечается наличие значительных свободных мощностей в отечественной атомной и гидроэнергетике. «Водородный» потенциал этих источников также несложно оценить. Мировое производство гидроэнергии в 2019 году составило ~38 Эксаджоулей (~1 1013 кВт\*ч) [6], 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.

Количество энергии, произведенной в 2019 году атомными электростанциями, составило ~25 Эксаджоулей (0,7 1013 кВт\*ч) [6], что позволяет производить всего 140 млн т H<sub>2</sub> в год, всего в полтора раза больше его нынешнего производства. Даже без учета неоднозначного отношения общественности ряда стран к атомной энергетике, ее возможности ограничены запасами урана в земной коре, явный дефицит в которых ощущается уже сейчас. 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 неспособны обеспечить производство водорода в объемах, которые могли бы принципиально повлиять на его антропогенную эмиссию в атмосферу [9] (рис. 3).

### 3. Современные технологии получения водорода

Приведенные выше оценки однозначно показывают, что до промышленного освое-

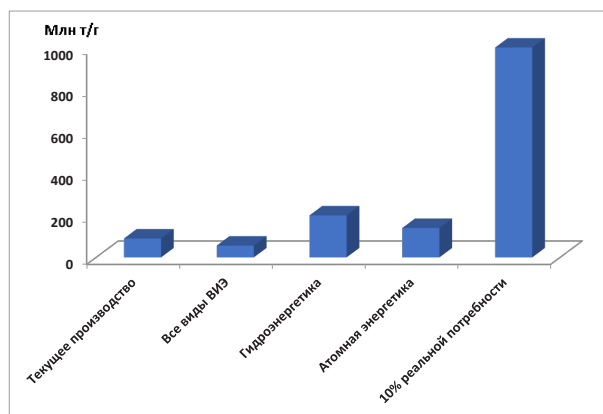


Рис. 3. Мировой объем производства водорода, глобальный потенциал его различных источников и реальная потребность в водороде для заметного снижения антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub>.

ния термоядерной энергии единственным реальным источником, способным обеспечить необходимый для заметного влияния на антропогенную эмиссию CO<sub>2</sub> объем водорода, являются ископаемые углеводороды. Наиболее эффективной современной технологией производства водорода является его получение на основе синтез-газа, производимого паровым риформингом метана (Steam Reforming of Methane – SRM) (~80% текущего производства H<sub>2</sub>) и угля (~20% производства H<sub>2</sub>). Поэтому помимо проблем хранения, транспортировки и распределения больших объемов водорода, которые все еще очень далеки от практически приемлемых решений, фундаментальной проблемой водородной энергетики является снижение затрат на конверсию углеводородов в водород, в том числе удельных затрат энергии в этих процессах.

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

Паровая конверсия метана (ПКМ, SRM)



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



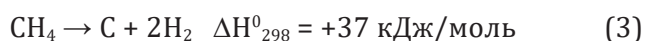
Их теплосодержание ( $4 \times 10^8$  800 кДж/м<sup>3</sup>) примерно соответствует теплосодержанию исходной молекулы метана (35 840 кДж/м<sup>3</sup>). Однако, учитывая большие дополнительные энергозатраты на нагрев сырья и производ-



ство большого объема пара, реальное потребление метана в этой сложной энергоемкой технологии почти в два раза выше.

Поскольку получение водорода путем парового риформинга сопровождается образованием  $\sim 9$  кг  $\text{CO}_2/\text{кг H}_2$ , такой водород считается «серым» (рис. 1), то есть экологически непривлекательным, и не решает задачу сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ . Чтобы сделать полученный водород «экологически» более чистым и подходящим для решения климатических проблем, необходимо улавливать как  $\text{CO}_2$ , содержащийся в дымовых газах, образующихся при нагревании реагентов и производстве пара, так и  $\text{CO}_2$ , образующийся при паровой конверсии  $\text{CO}$ . Для этого необходимо дополнить процесс SRM процессом улавливанием и захоронением углерода CCS (Carbon Capture and Storage). Водород, полученный в таком комбинированном процессе, уже можно квалифицировать как «голубой». Однако для этого требуется дополнительная энергия и, соответственно, дополнительный расход природного газа с образованием дополнительной порции  $\text{CO}_2$ . Наряду с дополнительными капитальными затратами и усложнением технологии, производство для замены природного газа «голубым» водородом по технологии SRM+CCS потребует почти утроения общего потребления природного газа и, соответственно, темпов истощения его природных ресурсов. По оценкам, добавление технологии CCS увеличивает капитальные затраты на SRM почти на 90% и эксплуатационные расходы на 30%. Стоимость водорода при этом увеличивается почти в 1,5 раза, до 1,8 евро/кг [12].

«Голубой» водород может быть также получен путем пиролиза природного газа с образованием водорода и твердого углерода [13].



Процесс в настоящее время используют для производства технического углерода. Термодинамика процесса требует дополнительно расхода около 20% получаемого водорода. Однако, принимая во внимание неизбежные технологические потери, фактическое количество дополнительного газа, необходимого для производства водорода, составит  $\sim 50\%$ . Таким образом, для получения водорода при пиролизе  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  фактически потребуется  $\sim 1,5 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  с общей теплотой сгорания около 54 000 кДж. При этом будет получено  $2 \text{ м}^3$  водорода с общей теплотой сгорания 21 600 кДж.

Общая энергетическая эффективность этого процесса составит всего 40%. Чтобы сохранить количество получаемой энергии при переходе с природного газа на водород, получаемый пиролизом метана, необходимо будет увеличить потребление метана примерно в 2,5 раза, с нынешних  $\sim 4$  трлн  $\text{м}^3/\text{год}$  до  $\sim 10$  трлн  $\text{м}^3/\text{год}$ . Это потребует от мировой экономики огромных инвестиций, а ресурсы природного газа будут истощаться в 2,5 раза быстрее. Кроме того, ежегодно будет образовываться более 5 млрд т мелкодисперсного углерода, реальный спрос на который составляет всего около 14 млн т/год. Для того чтобы полученный водород считался «голубым», этот углерод нельзя использовать в качестве топлива, и возникнет дополнительная проблема его транспортировки и захоронения.

#### 4. Технологические и логистические проблемы водородной энергетики

Помимо ресурсных проблем на пути водородной энергетики стоят серьезные технологические и логистические барьеры. Серьезной логистической проблемой является отсутствие соответствующей инфраструктуры для хранения, транспортировки и распределения промышленно значимых объемов водорода [14]. Причем для ее создания до сих пор все еще нет практически приемлемых решений. Большинство металлов подвержены разрушению под воздействием диффузии в них водорода (стресс-коррозии), особенно при высоких давлениях. Это предъявляет значительно более жесткие требования к изготовлению трубопроводов для транспортировки водорода по сравнению с трубопроводами для транспортировки природного газа [15] и резко повышает их стоимость. Надо отдавать ясный отчет в том, что существующие газопроводы не могут быть использованы для транспортировки водорода, а стоимость специально создаваемых трубопроводов, даже если будет решено множество стоящих на этом пути сложнейших проблем, будет в разы выше существующих газопроводов.

В качестве достоинств водорода часто указывают на высокое весовое содержание энергии, что не отражает реальную ситуацию с методами хранения и транспортировки ни газообразного, ни жидкого водорода, определяемыми объемными единицами. А по объемному содержанию энергии водород – очень низкокалорийное топливо. На рис. 4 представлена

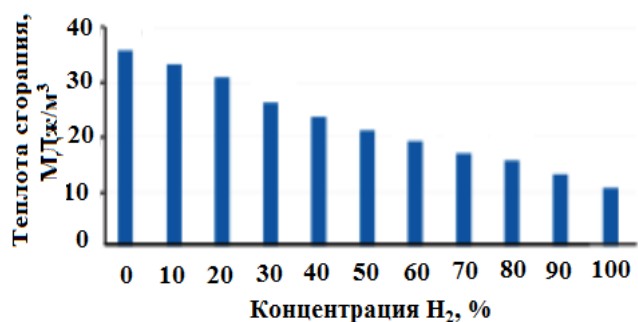


Рис. 4. Зависимости теплоты сгорания метановодородных смесей от концентрации водорода.

зависимость теплоты сгорания метановодородных смесей с различной концентрацией в них водорода, показывающая, что энергия газообразного водорода в ~4 раза меньше энергии, содержащейся в таком же объеме метана. А плотность жидкого водорода в ~6 раз ниже, чем жидкого метана.

Серьезным экономическим фактором, влияющим на технологии получения жидкого водорода и трубопроводной транспортировки газообразного водорода, являются значительно более высокие по сравнению с природным газом затраты энергии на его компримирование. По мере перехода в метановодородных смесях от метана к водороду энергия, требуемая для сжатия 1 кг смеси для повышения давления на 1 МПа, увеличивается примерно в 8,5 раз (рис. 5). Это связано с тем, что кинематическая вязкость водорода при нормальных условиях составляет 91,05 против 14,7 сСт у метана. Вследствие большей кинематической вязкости метановодородной смеси происходит рост потерь давления в трубопроводе, что требует создания больших избыточных давле-

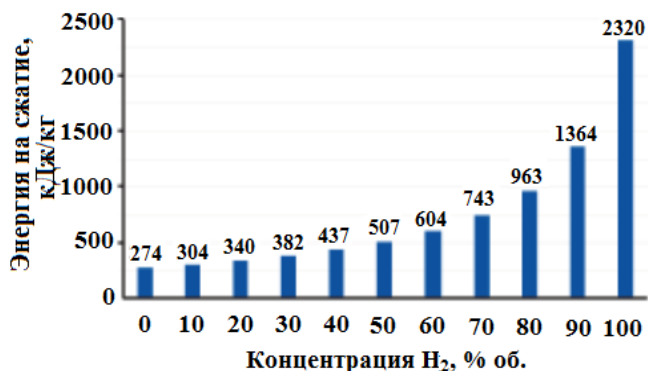


Рис. 5. Зависимость затрат энергии на сжатие метановодородной смеси давлением 1 МПа от концентрации в ней водорода (по материалам [14]).

ний на компрессорных станциях либо уменьшения расстояния между компрессорами [14]. Если в настоящее время уже более 7% всей производимой в России первичной энергии расходуется на перекачку природного газа, то трудно даже представить, какая ее доля потребует на перекачку эквивалентного по энергии объема водорода.

Экономика и энергетика процессов хранения и транспортировки сжиженного водорода также малопривлекательны. Плотность жидкого водорода ~ 70 кг/м<sup>3</sup>, что в ~ 6 раз 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 6 раз меньше жидкого водорода, чем сжиженного природного газа. При исключительно низкой температуре жидкого водорода, которая на 90° ниже температуры жидкого метана, трудно обеспечить его стабильность, что приводит к существенным потерям при его транспортировке и длительном хранении.

Связанные с этим проблемы наглядно демонстрирует пилотный проект получения, транспортировки и использования жидкого водорода, реализуемый японской компанией *Kawasaki Heavy Industries, Ltd.* совместно с правительственными органами и рядом частных компаний Японии и Австралии [16]. В рамках этого проекта в Австралии из местных залежей лигнита будут получать водород с захоронением образующегося CO<sub>2</sub>, а сжиженный водород будет транспортироваться специальным танкером в Японию. При вместимости уже построенного танкера всего 1250 м<sup>3</sup> вес транспортируемого водорода менее 90 т, что по содержанию энергии соответствует всего одной железнодорожной цистерне обычного жидкого топлива. Даже обсуждаемая возможность создания в будущем танкеров вместимостью 40 000 м<sup>3</sup> вряд ли позволит оказать существенное влияние на энергетику Японии, так как энергия сгорания водорода, перевозимого таким танкером, будет примерно в 12,5 раз ниже энергии сгорания СПГ, перевозимой типовым СПГ-танкером с объемом 200 000 м<sup>3</sup>.

В качестве альтернативы технологически сложным, энергозатратным и потому экономически малопривлекательным методам хранения и транспортировки жидкого и газообразного водорода рассматривается возможность его хранения и транспортировки в химически связанном состоянии в виде различных водородсодержащих соединений. К наиболее

перспективным из них можно отнести аммиак, метанол, диметиловый эфир и другие водородсодержащие соединения. Но во всех случаях это требует значительных дополнительных затрат энергии на получение этих продуктов и последующее выделение из них водорода, а весовое содержание водорода в них составляет незначительную долю веса самого транспортируемого продукта. Например, японская компания *Chiyoda Corporation* рассматривает 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 [17]. Однако масса обратимо выделяемого водорода при дегидрировании метилциклогексана в толуол составляет всего 6% от массы транспортируемого груза. Трудно представить, что такая схема поставки энергоносителя может быть экономически оправдана.

## 5. Проблемы безопасности в водородной энергетике

Важнейшей проблемой на пути широкого использования водорода, особенно в быту и на транспорте, остаются вопросы безопасности. Высокая скорость горения водорода, примерно в пять раз превышающая скорость горения метана (рис. 6а), и его значительно более широкие концентрационные пределы распространения пламени (рис. 6б), требуют более жестких норм техники безопасности при работе с ним.

Как одна из возможностей обеспечить бо-

лее безопасное использование водорода в энергетике, а заодно и снизить его воздействие на материал газопроводов, рассматривается возможность трубопроводной транспортировки водорода в смеси с метаном [19]. Как показывают исследования, при концентрации водорода в таких смесях до 40% пределы их самовоспламенения [20] и скорость горения [18] еще не сильно отличаются от таковых для метановоздушных смесей (рис. 6). Это позволяет работать при соблюдении уже хорошо отработанных требований безопасности для работы с природным газом и использовать практически такое же оборудование для горелочных устройств. Но при этом остается проблема водородного охрупчивания материала газопровода.

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

Более 90% производимого в настоящее время водорода потребляется непосредственно на месте его производства (кэптивный продукт) и лишь менее 10% поставляется специализированными компаниями, работающими на рынке промышленных газов (*Air Liquide, Linde, Praxair* и др.). Поэтому проблемы хранения и транспортировки водорода до сих пор не влияли на развитие его производства. Однако при использовании водорода в качестве энергоносителя эти проблемы становятся определяющими.

Наиболее реальный в настоящее время путь преодоления не имеющих пока практического решения проблем транспортировки и хране-

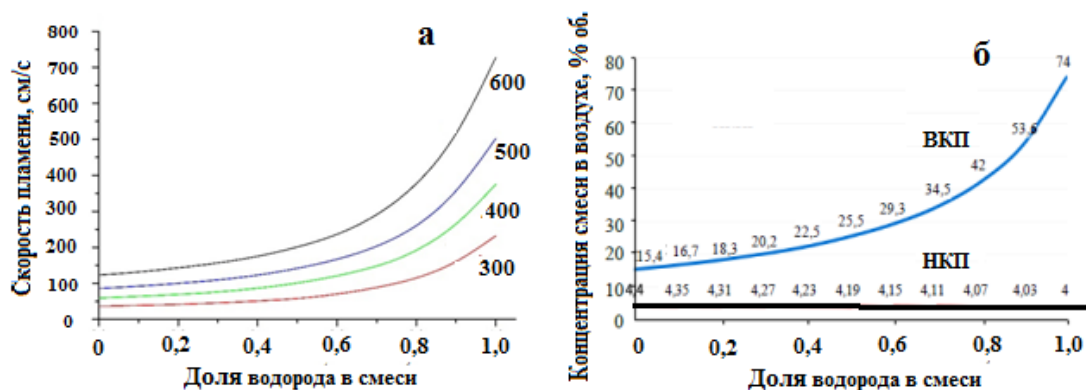


Рис. 6. Зависимость от объемной доли водорода в метановодородной смеси (а) ламинарной скорости пламени при разной начальной температуре (К), (б) нижнего концентрационного предела (НКП) и верхнего концентрационного предела (ВКП) распространения пламени (по материалам [14] и [18]).

ния больших объемов водорода – его распределенное производство непосредственно на месте 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. Необходимы принципиально новые технологии, рассчитанные на эффективное малотоннажное производство водорода.

Примером такой технологии является комбинированный процесс на основе сочетания некаталитической матричной конверсии углеводородных газов в синтез-газ с последующей каталитической паровой конверсией содержащегося в синтез-газе  $\text{CO}$  в дополнительное количество водорода по реакции водяного газа [21]. Это автотермический процесс, позволяющий перерабатывать углеводородные газы практически любого состава и происхождения. Процесс обеспечивает большой диапазон возможной производительности по водороду, от нескольких метров куб. в час до нескольких тысяч метров куб. в час. 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. 7).

Матричная конверсия открывает возможность малотоннажного производства водорода на основе практически любых местных

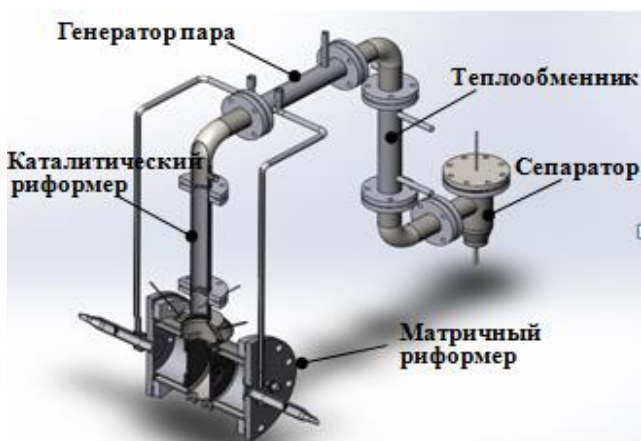


Рис. 7. 3D-схема демонстрационной установки комбинированного матричного и каталитического риформинга для получения водорода.

ресурсов (природный газ, ПНГ, пропан-бутановая фракция, нефтезаводские газы, биогаз, жидкие углеводороды) непосредственно на месте его потребления и обеспечивает существенное снижение удельного углеродного следа по сравнению с паровым риформингом.

## 7. Заключение

Предпринимаемые в настоящее время различными странами усилия по выполнению Парижских соглашений по климату и их активность в переходе на низкоуглеродные энергоносители ограничены серьезными ресурсными, технологическими и экономическими проблемами, стоящими на этом пути. Для реального вклада в решение климатических проблем масштаб производства водорода должен быть соизмерим с современным энергопотреблением, то есть достигать миллиардов тонн в год. Этот масштаб несоизмерим с возможностями альтернативной энергетики, которая несмотря на определенные успехи последних лет в принципе не способна обеспечить объемы производства водорода, необходимые для глобальной замены углеводородных источников энергии. Другие неуглеродные источники энергии, гидроэнергетика и атомная энергетика, способны обеспечить не более нескольких процентов мировой потребности в водороде. Поэтому до освоения термоядерной энергии единственный реальный источник получения водорода в масштабах, способных существенно потеснить углеродные энергоносители – это конверсия самих углеводородов, прежде всего, природного газа. А наиболее эффективный способ снижения углеродного следа – повышение эффективности этого процесса.

Дооснащение технологий получения водорода процессами захоронения  $\text{CO}_2$  потребует кратного увеличения потребления газа, приведет к дополнительному образованию  $\text{CO}_2$ , повысит цену водорода в  $\sim 2$  раза. А получение  $\text{H}_2$  пиролизом природного газа также потребует кратного увеличения добычи и потребления газа и создаст проблему захоронения  $\sim 5$  млрд т в год мелкодисперсного углерода.

Практическое использование водорода в необходимых для промышленной энергетики масштабах требует преодоления многих проблем, еще очень далеких от экономически приемлемых решений. Одна из наиболее серьезных состоит в том, что водород – топливо с низким объемным содержанием энергии. Транспортировка энергии в виде водорода



требует значительно более высоких затрат энергии, чем в виде метана. Поэтому в настоящее время наиболее реальный путь преодоления не имеющих пока практического решения проблем транспортировки и хранения водорода – его распределенное производство непосредственно на месте потребления.

Что касается жесткой и агрессивной экологической риторики и политики западных стран, вынуждающих другие страны переходить на «экологически чистые» энергоносители, то нужно ясно отдавать себе отчет в их экономической основе. Не имея собственных дешевых энергоресурсов, они вынуждены использовать дорогие источники энергии. Поэтому естественно их желание заставить страны, обладающие дешевыми и обильными энергоресурсами, такие как Россия, Казахстан и другие страны СНГ, также перейти на дорогие источники энергии, чтобы лишить их конкурентных преимуществ в мировой экономике. Поэтому при развитии водородной энергетики стран СНГ, помимо производства водорода, ориентированного на экспорт и только по предоплаченным долговременным контрактам, имеет смысл ограничиться его использованием в транспортном секторе крупных мегаполисов для решения локальных экологических проблем. Перевод собственной промышленной энергетики стран СНГ на дорогой водород экономически и экологически абсолютно не оправдан. А основным, помимо энергетики, направлением использования собственных дешевых углеводородных ресурсов должна стать их переработка в нефтехимические продукты с высокой добавленной стоимостью для увеличения доли стран СНГ на этом огромном и перспективном рынке на основе использования собственного дешевого сырья.

## Литература

- [1]. Arutyunov V. Is it possible to stabilize the Earth climate by transition to renewable energy? // *Eurasian Chem.-Technol. J.* – 2021. – Vol.23, №2. – P.67–75.
- [2]. Арутюнов В.С. Концепция устойчивого развития и реальные вызовы цивилизации // *Вестник РАН.* – 2021. – Т.91, №3. – С.3–12.
- [3]. Капица П.Л. Энергия и физика // *Успехи физ. Наук.* – 1976. – Т.118. – С.307–314.
- [4]. 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.
- [5]. The Paris Agreement <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [6]. 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>
- [7]. Hydrogen production [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production)
- [8]. Gardner D. Hydrogen production from renewable // *Renewable Energy Focus.* – 2009. – Vol.9, №7. – P.34–37.
- [9]. Arutyunov V.S. On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons. *Academia Letters.* 2021. Article 3692.
- [10]. Легасов В.А., Кузьмин И.И. Проблемы энергетики // *Природа.* – 1981. – №2. – С.8–23.
- [11]. Ладыгина О. Темная сторона альтернативной энергетики. *Discovery.* – 2021. – №5(140). – С.14–16.
- [12]. Mitrova N., Melnikov Y., Chugunov D. The hydrogen economy – a path towards low carbon development. – Skolkovo:Skolkovo Energy Centre, Moscow School of Management, 2019. [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)
- [13]. Amin A.M., Croiset E., Epling W. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production // *Int. J. Hydrogen En.* – 2011. – Vol. 36. – P.2904–2935.
- [14]. 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.
- [15]. Hydrogen pipeline systems. Doc 121/14. European Industrial Gases Association AISBL. <https://www.eiga.eu/publications/eiga-documents/doc-12114-hydrogen-pipeline-systems/>
- [16]. Kawasaki Hydrogen Road <https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/index.html>
- [17]. SPERA Hydrogen. Chiyoda's Hydrogen Supply Chain Business <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/>
- [18]. Арутюнов А.В., Беляев А.А., Иновенков И.Н., Арутюнов В.С. Влияние водорода на нормальную скорость горения метановоздушных смесей при повышенных температурах // *Горение и взрыв.* – 2019. – Т.12, №4. – С.4–10.
- [19]. Соколинский Ю.А., Сосна М.Х., Галикеева Л.Р. Технологические аспекты транспортировки метановодородной смеси по трубопроводу

- «Северный поток-2» // НефтеГазоХимия. – 2021. – №1–2. – С.12–16.
- [20]. Арутюнов В.С., Трошин К.Я., Беляев А.А., 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.
- [21]. 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.
- [14]. Litvinenko VS, Tsvetkov PS, Dvoynikov MV, Buslaev GV (2020) Notes of the Mining Institute [Zapiski Gornogo instituta] 244:421–431. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.421
- [15]. Hydrogen pipeline systems. Doc 121/14. European Industrial Gases Association AISBL. <https://www.eiga.eu/publications/eiga-documents/doc-12114-hydrogen-pipeline-systems/>
- [16]. Kawasaki Hydrogen Road <https://global.kawasaki.com/en/hydrogen/index.html>
- [17]. SPERA Hydrogen. Chiyoda's Hydrogen Supply Chain Business <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/>
- [18]. Arutyunov AV, Belyaev AA, Inovenkov IN, Arutyunov VS (2019) Combustion and Explosion 12(4)4–10. DOI: 10.30826/CE19120401
- [19]. Sokolinsky YuA, Sosna MKh, Galikeeva LR (2021) Oil&GasChemistry [NefteGazoHimiya] 1–2:12–16. DOI: 10.24412/2310-8266-2021-1-2-12-16 (in Russian)
- [20]. Arutyunov VS, Troshin KYa, Belyaev AA, Arutyunov AV, Nikitin AV, Strekova LN (2020) Combustion and plasma chemistry 18(2):61–80. DOI: 10.18321/cpc349. (in Russian)
- [21]. Arutyunov VS, Nikitin AV, Strekova LN, Savchenko VI, Sedov IV, Ozersky AV, Zimin YaS (2021) Journal of Technical Physics [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki] 91(5):713–720. DOI:10.21883/JTF.2021.05.50681.265-20 (in Russian)

## References

- [1]. Arutyunov V (2021) Eurasian Chem.-Technol. J. 23(2):67–75. DOI: 10.18321/ectj1076
- [2]. Arutyunov VS (2021) Herald of the Russian Academy of Sciences 91(2):102–110. DOI:10.1134/S1019331621020027
- [3]. Kapitsa PL (1976) Physics-Uspekhi 19:169–173.
- [4]. Arutyunov VS, Lisichkin GV (2017) Russ. Chem. Rev. 86(8):777–804. DOI: 10.1070/RCR4723.
- [5]. The Paris Agreement <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [6]. 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>
- [7]. Hydrogen production [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production)
- [8]. Gardner D (2009) Renewable Energy Focus 9(7):34–37. DOI:10.1016/S1755-0084(09)70036-5
- [9]. Arutyunov VS (2021) On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons. Academia Letters. Article 3692. DOI:10.20935/AL3692
- [10]. Legasov VA, Kuzmin II (1981) Nature [Priroda] 2:8–23. (in Russian)
- [11]. Ladygina O (2021) Discovery 5(140):14–16. (in Russian)
- [12]. Mitrova N, Melnikov Y, Chugunov D (2019) The hydrogen economy – a path towards low carbon development. Skolkovo Energy Centre, Moscow School of Management, Skolkovo, Russia. [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)
- [13]. Amin AM, Croiset E, Epling W (2011) Int. J. Hydrogen En. 36:2904–2935. DOI:10.1016/j.ijhydene.2010.11.035

## Problems and challenges of hydrogen energy

V.S. Arutyunov

Federal Research Center of Chemical Physics N.N. Semenov RAS, 4 Kosygina str., Moscow, Russia  
Institute for Problems of Chemical Physics RAS, 1 Semenova Ave., Chernogolovka, Russia

## Abstract

To significantly reduce global CO<sub>2</sub> emissions due to the use of hydrogen as an energy carrier, its production should reach at least 1 billion tons/year. Such a volume of hydrogen cannot be obtained from renewable energy sources, hydropower, or nuclear power. Before the industrial development of thermonuclear fusion energy, the only real source of such a volume of hydrogen can only be the conversion of natural gas. Therefore, the most effective way to reduce the carbon footprint of the energy sector is to increase the efficiency of the use of hydrocarbons, including their conversion

into hydrogen. As an energy carrier, hydrogen has serious disadvantages: low volumetric energy content, high energy consumption for its production, liquefaction and compression, and high explosiveness. At the initial stage of the development of hydrogen energy, the most realistic way to overcome the complex problems of transporting and storing hydrogen is its dispersed low-tonnage production directly at the places of consumption.

*Keywords:* hydrogen energy, hydrogen, hydrocarbons, conversion, synthesis gas.

### **Сутегі энергиясының мәселелері мен қиындықтары**

В.С. Арутюнов

Н.Н. Семенов атындағы химиялық физикан федералдық ғылыми орталығы РФА, Косыгин көшесі 4, Мәскеу, Ресей  
Химиялық физика мәселелері институты, РФА, Семенов даңғылы, 1, Черноголовка, Ресей

### **Аңдатпа**

Энергия тасымалдаушысы ретінде сутекті пайдалану есебінен жаһандық CO<sub>2</sub> эмиссияларын айтарлықтай азайту үшін оның өндірісін жылына кемінде 1 миллиард тоннаға жетуі

керек. Мұндай сутегі көлемін жаңартылатын энергия көздерінен, су энергетикасынан немесе атом энергетикасынан алу мүмкін емес. Термоядролық синтез энергиясының өнеркәсіптік дамуына дейін сутегінің мұндай көлемінің жалғыз нақты көзі тек табиғи газды түрлендіру болуы мүмкін. Сондықтан энергетикалық сектордың көміртегі ізін азайтудың ең тиімді жолы көмірсутектерді пайдалану тиімділігін арттыру, оның ішінде оларды сутегіге айналдыру болып табылады. Энергия тасымалдаушы ретінде сутегінің елеулі кемшіліктері бар: төмен көлемдік энергия мөлшері, оны өндіруге жоғары энергия шығыны, сұйылту және сығу, жоғары жарылыс. Сутегі энергетикасы дамуының бастапқы кезеңінде сутегін тасымалдау мен сақтаудың күрделі мәселелерін шешудің ең шынайы жолы оны тікелей тұтыну орындарында дисперсті төмен тоннажды өндіру болып табылады.

*Кілт сөздер:* сутегі энергиясы, сутегі, көмірсутектер, конверсия, синтез газы.