

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.91-119>

УДК 620.92

## Перспективы развития водородной энергетики

*Сахабутдинов Р.З.*

*Институт «ТатНИПИнефть», Бугульма, Россия*

## Prospects of hydrogen economy

*R.Z. Sakhabutdinov*

*TatNIPIneft Institute, Bugulma, Russia*

**E-mail: [rifkat@tatnipi.ru](mailto:rifkat@tatnipi.ru)**

**Аннотация.** В течение последнего года в России активно обсуждается тема водородной энергетики. В статье рассмотрены вопросы нахождения в природе, технологий получения, промышленного производства, проблем, возникающих при кардинальном расширении использования водорода. Показано, что, несмотря на широкую распространенность, водород не является источником энергии. Рассмотрены причины активного развития водородной энергетики. Показана низкая эффективность ВИЭ, что в сочетании с огромными затратами на зеленый энергопереход ставит под сомнение масштабы расширения водородной энергетики.

**Ключевые слова:** водород, энергетика, водородная энергетика, электролиз, метан, энергетическая эффективность, декарбонизация, возобновляемые источники энергии, углекислый газ

**Для цитирования:** Сахабутдинов Р.З. Перспективы развития водородной энергетики//Нефтяная провинция.-2022.-№1(29).-С.91-119. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.91-119>

**Abstract.** Over the past year, hydrogen economy has become the subject of extensive discussions in Russia. The paper considers hydrogen natural occurrence, generation, commercial production technologies, and the challenges associated with drastic expansion of hydrogen applications. Hydrogen is shown to be an energy carrier rather than a direct energy source despite its widespread use. Factors contributing to the rapid growth of hydrogen economy are considered. It is demonstrated that poor efficiency of renewable energy sources coupled with substantial expenses on green energy transition leave large-scale expansion of hydrogen energy projects in serious doubt.

**Key words:** hydrogen, energy economy, hydrogen economy, electrolysis, methane, energy efficiency, decarbonization, renewable energy sources, carbon dioxide

**For citation:** R.Z. Sakhabutdinov Perspektivy razvitiya vodorodnoj jenergetiki [Prospects of hydrogen economy]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(29), 2022. pp. 91-119. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2022.1.91-119> (in Russian)

В течение последнего года в России активно обсуждается тема водородной энергетики. Минэнерго создало специальную тематическую рабочую группу, объединившую представителей энергокомпаний, поставщиков оборудования и технологий, банковских структур, научных и экспертных организаций.

Сфера водородной энергетики находится в стадии становления во всем мире, причем лидирует считанное число государств, уделявших водороду серьезное внимание в течение многих лет (Япония, США, Германия, Великобритания, Южная Корея, в последние годы Китай). Эти государства предпринимают внушительные усилия: значительные бюджетные вливания, создается благоприятная регуляторная среда, принимаются меры долгосрочного стимулирования инвесторов и технологических компаний, система льгот и косвенных мер поддержки, разрабатываются международные стандарты, создаются альянсы и партнерства как внутри страны, так и международные. Можно выделить несколько базовых драйверов развития водородной энергетики: декарбонизация, охрана атмосферного воздуха, развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), энергетическая безопасность, поиск новых точек экономического роста.

В этой ситуации Россия определила свою позицию. Летом 2020 г. Председатель Правительства РФ М. Мишустин утвердил «Энергетическую стратегию Российской Федерации до 2035 года», в которой отдельным пунктом прописана Водородная энергетика. Задачи стратегии – «развитие производства и потребления водорода, вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту». Планируется, что Россия в 2024 году будет экспортировать около 200 тыс. тонн водорода, а к 2035 году в 10 раз больше – порядка 2 млн. тонн. Т.е. поставлена задача комплексного развития водородной энергетики и вхождение страны в

число мировых лидеров по его производству и экспорту, что в десятилетнем горизонте может составлять 10–15 % мирового рынка водорода. «Дорожная карта» плана развития водородной энергетики в России предполагает, что первыми производителями водорода станут «Газпром» и «Росатом». Компании запустят пилотные водородные установки в 2024 году – на атомных электростанциях, объектах добычи газа и предприятиях по переработке сырья.

Наша страна обладает серьезными потенциальными конкурентными преимуществами в сфере поставок водорода на мировой рынок – есть и обширные ресурсы для его производства и возможности для его экспорта (существующая газотранспортная инфраструктура и отработанные маршруты экспорта сжиженного природного газа - СПГ). Кроме того, в России водород исторически играет серьезную роль в космической отрасли и для оборонных нужд, поэтому внутри страны имеются и собственные научные школы, и перспективные технологии в различных элементах цепочки создания стоимости (производство, транспорт, хранение, потребление водорода).

Основные видимые барьеры для развития водородной экономики в России тоже известны. Эта сфера находится в стадии становления во всем мире. Водородная экономика не появляется легко и бесплатно – помимо значительных бюджетных вливаний (например, в Японии затраты бюджета на НИОКР и субсидии достигают 300 млн евро в год), государства принимают и другие внушительные усилия. Хотя в отдельных случаях водородные технологии уже попадают в зону конкурентоспособности по сравнению с конкурентами без дополнительных субсидий, в целом в этой сфере еще многое предстоит сделать для масштабирования. Электромобиль на водороде пока существенно дороже электромобиля на батареях или автомобиля с ДВС; хранить и транспортировать природный газ гораздо дешевле и проще, чем водород, а магистральные пассажирские самолеты на водороде полетят еще нескоро. Тут возникает важный вопрос – а за-

чем в таком случае все эти усилия тысяч людей и затраты миллиардов долларов? Это поможет понять насколько радужны перспективы развития водородной энергетики. Чтобы попытаться спрогнозировать перспективы развития водородной энергетики надо ответить на несколько вопросов.

*Вопрос 1. Что подвигает страны к развитию водородной энергетики? Какое место водород занимает долгосрочных энергетических стратегиях стран?*

Здесь можно выделить несколько базовых причин, первый и главный среди которых – декарбонизация. Борьба с изменением климата Земли через сокращение выбросов парниковых газов (прежде всего  $\text{CO}_2$ ), то есть декарбонизация, уже стала мейнстримом в развитии мировой энергетики. От способов и темпов снижения выбросов зависит судьба как системообразующих отраслей, десятилетиями не слышавших о декарбонизации – угольной, нефтяной, газовой индустрии, металлургии, электроэнергетики на ископаемом топливе, – так и новых и быстрорастущих сфер – ВИЭ, электротранспорта, хранения энергии и др. Роль водорода в декарбонизации очень важна – если произвести его из воды с использованием электроэнергии от ВИЭ или АЭС, либо из углеводородов с последующим улавливанием и захоронением под землей выбросов  $\text{CO}_2$ , то получается практически «безуглеродный» энергоноситель, который можно использовать почти везде, где нужна энергия. Не менее важно и то, что водород и энергоносители на его основе можно хранить в течение многих месяцев и транспортировать разнообразными способами от места производства к месту потребления – в том числе и на другой континент.

Вторая важная причина – озабоченность чистотой воздуха в городах. Сжигание ископаемого топлива приводит не только к глобальному изменению климата. В краткосрочной перспективе даже важнее, что из-за этого сжигания в воздух попадают разнообразные загрязнители, провоцирующие различные заболевания (астму, опухоли) и рост смертности уже сейчас. Водород является очевидным ответом на этот вызов – при его сжигании

вредные выбросы близки к нулю, а с использованием топливных элементов и вовсе отсутствуют. Ужесточая требования к выхлопам автомобилей, к их количеству, к закупкам городских автобусов, государства тем самым стимулируют развитие водородного транспорта.

Третья причина связана с интенсивным развитием ВИЭ – прежде всего, ветряной и солнечной энергетики, доля которой в энергобалансе отдельных европейских стран уже превысила 40%. Из-за непостоянства и трудностей в прогнозировании погоды производство электроэнергии на этих источниках нередко не совпадает с ее потреблением. Водород может выступить в качестве балансира между производством и спросом энергии ВИЭ - «лишнюю» электроэнергию можно тратить для производства водорода, который, в свою очередь, можно хранить для использования в периоды увеличения спроса. В Германии уже сейчас более 50 объектов по технологии power-to-gas, а содержание водорода в газовой сети в пилотных проектах доводят уже до 20 %.

Следующий важный фактор, обуславливающий интерес государств к водородной энергетике – стремление обеспечить энергобезопасность, равноудаленность и независимость от импортных поставщиков энергоресурсов. «Безуглеродный» водород можно производить в любом месте на планете, где есть вода и электроэнергия от ВИЭ или АЭС – поэтому страны-импортеры энергоресурсов получают возможность как заместить этот импорт (или его часть), так и диверсифицировать маршруты поставок.

Наконец, последняя причина – это поиск новых точек экономического роста в условиях глобального энергетического перехода. Водородные технологии относятся к наукоемким, находятся в начале «кривой обучения» и обладают большим потенциалом снижения стоимости за счет эффекта масштаба. В правительстве Германии не скрывают, что мировое лидерство в технологиях – одна из целей водородной стратегии страны.

Пять перечисленных факторов «работают» в каждой из стран-лидеров, но везде по-своему: так, для Европы важнее декарбонизация, для

Китая – чистота воздуха в городах, для Японии – энергобезопасность. При этом учитывая количество вовлеченных стран, наибольшее влияние на рост рынка водорода окажет первый фактор. При этом развитие третьего фактора также во многом будет зависеть от масштабов и глубины процессов декарбонизации экономики.

Наша страна стала полноценным участником Парижского соглашения, тем самым приняв на себя добровольные долгосрочные обязательства по декарбонизации через создание стимулов для перераспределения инвестиций в низкоуглеродные технологии. Предварительно заявленный Россией вклад в общую борьбу с изменением климата – сокращение выбросов до уровня 70 % процентов от уровня 1990 г. с учетом поглощающей способности лесов – был фактически достигнут уже 20 лет назад на фоне падения экономики в начале 1990-х годов. Углеродное регулирование находится в ранней фазе становления. Выбросы CO<sub>2</sub> пока ничего не стоят российским предприятиям. В связи с этим, на российском рынке «безуглеродность» водорода как энергоносителя пока не является сколь-нибудь важным фактором, конкуренция с другими видами топлива идет исключительно по цене. Это оставляет мало шансов на успех в борьбе, в первую очередь, с природным газом (цены на который к тому же регулируются на низком уровне).

Есть и еще одно серьезное отличие – российская экономика по разным причинам в 2-2,5 раза более энергоемкая, чем, например, японская или немецкая. Углеродное регулирование, когда оно будет введено в России, в первую очередь будет способствовать инвестициям в повышение энергоэффективности. Тем не менее, отечественные компании, в первую очередь экспортирующие продукцию в Европу, все большее внимание уделяют сокращению «углеродного» следа с целью не потерять рынки сбыта.

Еще большее внимание стало уделяться вопросам экологии. В рамках федерального проекта «Чистый воздух» запланировано сократить ко-

личество вредных выбросов на 22 % к 2024 г., бюджет проекта оценивается в 500 млрд руб.

Солнечная и ветряная энергетика в России всерьез стартовала 2-3 года назад, отрасль демонстрирует неплохие перспективы развития вплоть до выхода (в будущем) на паритет по стоимости с генерацией на ископаемом топливе, АЭС или ГЭС. Потенциал роста здесь колоссален – Россия обладает крупнейшим в мире потенциалом ветряной энергетики, а солнечная энергетика уже доказала свою экономическую эффективность в отдаленных районах. Но пока доля прерывистых ВИЭ в энергобалансе незначительна (0,1% от выработки в ЕЭС России, 2019 г.) – в 200 раз ниже уровней, при которых начинается существенное ограничение их работы в единой энергетической системе. В то же время, существует проблема недозагрузки крупных АЭС или ГЭС – вокруг них можно размещать предприятия по производству водорода.

Анализировать фактор энергобезопасности в России еще проще – наша страна занимает лидирующие места в мире, как по экспорту энергоресурсов, так и по их запасам. В масштабах страны источники энергии диверсифицированы. Проблема энергобезопасности в целом решена, но в отдельных удаленных районах водородные технологии могут стать одной из альтернатив пока что почти безальтернативным решениям на основе дизельного топлива.

Наконец, раскрытие потенциала водородной экономики через развитие и экспорт российских технологий, несомненно, может стать привлекательным фактором. В области водорода стартовые позиции смотрятся достаточно оптимистичнее – Россия имеет достаточный опыт по применению водорода и интересные проекты. Например, строительство гигантских приливных электростанций в Пенжинской губе Охотского моря. К этой же категории можно отнести и экспорт товарного водорода – если покупатели просят вместо газа водород, почему бы не родиться предложению?

Таким образом, в России работают только два с половиной драйвера из пяти, и то скорее частично, а главный – декарбонизация – пока работает мало, но быстро набирает силу в последние два года. Внутренний спрос на водород в таких рамках, вероятно, будет ограничен отдельными демонстрационными проектами в удаленных районах или крупных городах с загрязненным воздухом. Поэтому широкое развитие водородной энергетики в нашей стране будет зависеть от того, насколько далеко этот процесс зайдет в мире. Как и большинство процессов в мире, это, в конечном счете, зависит от экономики.

*Вопрос 2. Насколько водородная энергетика способствует удовлетворению растущей потребности общества в энергии?*

Водород очень широко распространен в природе, он входит в состав многих органических и неорганических соединений и встречается в свободном, несвязанном состоянии. Содержание водорода в земной коре (литосфере и гидросфере) 1% по массе, или 16 ат. %. Лишь в очень незначительном количестве водород в виде простого вещества содержится в атмосфере:  $5 \cdot 10^{-5}$  % по объёму или  $1 \cdot 10^{-4}$  ат. % [1]. В атмосфере молекулярный водород непрерывно образуется солнечным излучением (31-67 Гт/год), в результате разложения формальдегида, образующегося в цепочке окисления метана или другой органики, неполного сгорания различных топлив и биомасс (по 5-25 Гт/год), в процессе фиксации микроорганизмами азота из воздуха (3-22 Гт/год).

В природе водород входит в состав всех растительных и животных организмов, нефти, природного газа, воды, ископаемых углей, ряда минералов и пород. В свободном состоянии водород встречается очень редко – в небольших количествах в вулканических газах и продуктах разложения органических остатков. Содержание свободного водорода в метановых газах угольных бассейнов СНГ не превышает девяти процентов (в среднем 2-4 процента). Высокая концентрация водорода установлена в вулка-



нических камерах и трубках взрыва (до 50 процентов от общей суммы газов). Повышенные содержания и струи дегазации водорода наблюдаются в рифтовых зонах океанов – в рифте острова Исландия вынос водорода составляет до 1 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В кимберлитовой трубке «Удачная» (в скважине 42), дебит водорода достигал 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут [2]. Концентрация водорода в биогазе, выделяющемся из твердых бытовых отходов на городских свалках, находится в диапазоне 0-3,6 % об., при обезвреживании отходов сельскохозяйственных предприятий в биореакторах (метантенках) - 0,01-0,02 % об.

Площадной атмогеохимической (газовой) съемкой, использующей спектр газов на глубине около 10 м от поверхности в покровных рыхлых отложениях над месторождением урана Учкудук, залегающем на глубине 100 м и более, была установлена обширная аномалия с содержанием водорода до 90 % в поровом газе. В воде имеющихся поблизости скважин и даже в колодце концентрация растворенного водорода достигала  $(30-100) \cdot 10^{-3}$  мл/л на фоне нулевых концентраций по периферии. Повышенные концентрации водорода в подземных водах месторождения Газли достигают более  $(10-300) \cdot 10^{-3}$  мл/л на нулевом фоне [3].

В последние годы в научных геологических кругах существенный отклик нашла гипотеза изначально гидридного строения Земли В.Н. Ларина (1980) [4]. Предложенная гипотеза обосновывает наличие концентрации водорода в атмосфере наличием гидридов металлов в ядре Земли и постепенной дегазацией водорода из мантии через земную кору в атмосферу. Имеющиеся данные прикладных геохимических исследований В.Н. Ларина по выявлению проявлений водорода вблизи поверхности относятся, в основном, к территории Русской платформы, на которой размещаются центральные области России. На равнинных просторах многих районов отмечено образование округлых провалов грунтов, обусловленных глубинными залежами водорода, зафиксировано высокое содержание водорода в подпочвенном воздухе (до 1-1,6 %) и даже предлагается провести раз-

ведочные работы на водород как экологически безопасный высококалорийный источник энергии.

В районе Тункинской впадины глубинное электромагнитное зондирование выявило на глубине 5–6 км обширную зону с аномально высокой электропроводностью, вещественная природа которой не была выяснена. По мнению В. Н. Ларина эта зона заполнена бескислородными соединениями и сплавами на основе кремния, магния и железа (в пропорции 3:2:1). И если это предположение подтвердится бурением, то тогда получим возможность качать из Земли «горячий» водород, ведь кремний и магний при взаимодействии с водой выделяют водород и тепло. Для этого достаточно пробурить две скважины – по одной закачивать воду, а по другой – отводить водород. Таким способом можно будет производить водород, не только затрачивая минимум энергии, но еще и получать ее попутно и в больших количествах [5-6].

По предварительным оценкам, если прогноз о наличии бескислородных сплавов на доступных глубинах подтвердится, то с 10 км<sup>2</sup> территории можно будет получать по 100–200 млн т. условного топлива в год, и что в перспективе ожидаемый энергоноситель может оказаться конкурентоспособным на энергетическом рынке [4].

Безусловно, теория Ларина В.Н. представляет большой интерес, как с точки зрения науки, так и практического применения. Пока с точки зрения науки считается, что гипотеза не доказана. Если оставить в стороне чисто научные аспекты, то добыча водорода с небольших глубин требует подтверждения экономической эффективности процесса вследствие его низких концентраций, а бурение скважин на большие глубины к тому же несет существенные риски.

А какова энергетика производства водорода?

В наиболее «чистом» виде водородная энергетика предполагает получение водорода из воды в соответствии с реакцией:



Энергетика этой реакции при стандартных условиях ( $T=298$  К,  $p=0,1013$  МПа) характеризуется следующими термодинамическими величинами в зависимости от того, находится вода в виде жидкости или пара (Табл. 1).

Таблица 1

*Энергетические характеристики разложения воды на водород  
и кислород при  $T = 298$  К и  $p=0,1013$  МПа*

Состояние воды	$\Delta G$ , кДж/моль	$\Delta H$ , кДж/моль	$\Delta S$ , кДж/моль
H <sub>2</sub> O (ж)	237,36	285,97	0,163
H <sub>2</sub> O (пар)	228,99	241,93	0,434

Если реакцию разложения, например, жидкой воды, при стандартных условиях осуществлять обратимо, то теоретически необходимо затратить  $\Delta G = 237,36$  кДж/моль в виде работы (электроэнергии) и  $Q = T\Delta S = 48,6$  кДж/моль в виде тепла. С ростом температуры  $T$ , при которой осуществляется реакция разложения, соотношение между работой и теплом, необходимыми для обратимого осуществления реакции, изменяется [7].

Для получения водорода разложением воды возможны два пути разложения:

- путем электролиза, для чего первичная энергия вначале должна быть превращена в электроэнергию;
- путем термического разложения с затратами тепла от первичного источника энергии.

Возможна также комбинация этих двух путей.

Для электролиза воды необходимо затрачивать электроэнергию и тепло теоретически в количествах, указанных в табл. 1. Однако, в действительности, за счет различных потерь при протекании тока через электролитическую ячейку необходимые напряжение на ячейке и затраты энергии выше. Эти потери существенно возрастают при увеличении плотности тока, протекающего через ячейку.

КПД лучших современных электролизеров с твердополимерными

мембранами превосходит 80%. При КПД, например, 80 % для получения 1 моля водорода надо затратить 296,25 кДж электроэнергии. Разность (59,75 кДж) между действительным и теоретическим количеством электроэнергии выделится в электролитической ячейке в виде тепла, что больше теоретически необходимого для электролиза (48,6 кДж). Это означает, что к ячейке не только не надо подводить тепло, а некоторое количество тепла надо отводить.

По мере роста температуры разложение воды требует все меньшего количества электроэнергии и большего количества тепла. Существует температура (более 3000 К), при которой  $\Delta G$  обращается в ноль, и, следовательно, разложение воды требует только затрат тепла. Однако эта температура слишком высока для практического использования.

Разложение воды без затрат электроэнергии, а только с затратами тепла, при более низких температурах можно осуществить с помощью так называемых термохимических циклов. В таких циклах кроме воды участвует большее или меньшее количество промежуточных реагентов. Они вступают в эндо- и экзотермические реакции, в результате которых вода разлагается на водород и кислород, а все прочие реагенты возвращаются в первоначальное состояние. В результате использования полученного водорода мы получаем снова воду, поэтому в соответствии с первым законом термодинамики мы не можем получить дополнительной энергии. А с учетом коэффициента полезного действия процессов во всей цепочке количество получаемой энергии будет существенно меньшей затраченной на производство водорода.

Получение водорода из природных органических топлив в настоящее время является наиболее широко освоенным методом. Основной технологией является паровая конверсия метана [8, 9]. Основные реакции процесса:



При последующем применении энергетический водород переходит в воду. Точно такие продукты получаются при сжигании метана, т.е. никакого выигрыша в энергии получение водорода по реакциям (2) и (3) не может дать.

Основные недостатки получения водорода из природных топлив – выброс  $\text{CO}_2$ , утилизация которого требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов, существенно повышая стоимость конечного продукта. Следует отметить, что с точки зрения влияния на климат стратегия производства водородного топлива из ископаемых углеводородов мало чем отличается от непосредственного сжигания природных топлив. Если в последнем случае выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосфере появляются на стадии использования топлива, то в первом имеются практически те же выбросы на стадии его получения. Поэтому основными компонентами новых технологий производства водорода из органики являются процессы улавливания сопутствующих выбросов в атмосферу, включая  $\text{CO}_2$ . При этом только выделение  $\text{CO}_2$  из дымовых газов абсорбцией специальными аминами требует затрат энергии на уровне 2,5 Мдж/кг  $\text{CO}_2$ , что, например, при современном состоянии генерации энергии в России дает углеродный след 0,35 кг  $\text{CO}_2$ /кг  $\text{CO}_2$ .

С экологической точки зрения представляет интерес производство водорода из метана или других углеводородов путем термического разложения — пиролиза:



В результате пиролиза углерод получается как товарный продукт в твердом состоянии (в виде сажи или пироуглерода) и может быть использован в различных отраслях промышленности [10]. Тепловой эффект сгорания метана до воды и углекислого газа равен 890 кдж/моль. Тепловой эффект реакции (4) равен – 74,9 кдж/моль, сгорания 2 молей  $\text{H}_2$  571,7 кдж/моль. Таким образом тепловой эффект реакции (4) с последующим сжиганием водорода равен 496,8 кдж/моль, что на 44 % мень-

ше эффекта от прямого сжигания метана. Это и понятно – мы решили проблему выброса в атмосферу  $\text{CO}_2$ , но потеряли энергию, выделяющуюся при сгорании углерода.

Таким образом термодинамика процессов получения водорода подтверждает тезис о водороде как искусственном промежуточном переносчике энергии. Следует обратить внимание на частую ошибку средств массовой информации и неквалифицированных публикаций, называющих водород новым источником энергии, способным решить энергетические и экологические проблемы человечества. Пока водород никак нельзя назвать источником энергии. Источником энергии водород может стать при обнаружении его в природе и разработке метода его добычи (концентрирования, хранения, транспортирования, использования) с затратами энергии, меньшими его энергетического потенциала. Т.е. пока ответ на второй вопрос – никак, только приводит к дополнительным затратам энергии!

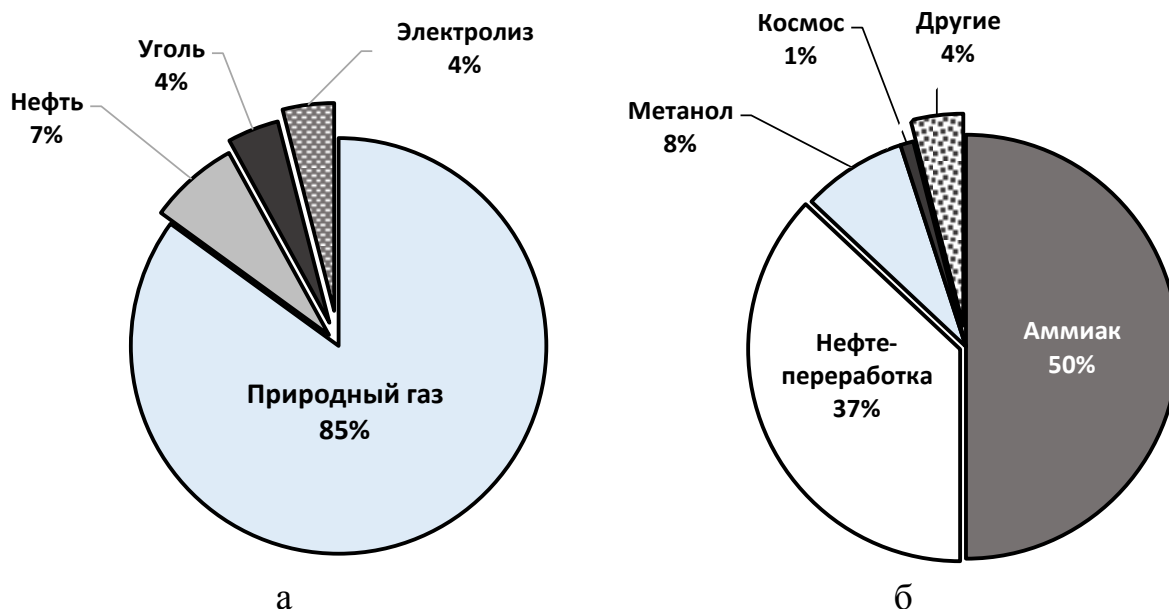
*Вопрос 3. Какова ситуация с производством и использованием водорода в настоящее время?*

Разнообразие методов получения водорода является одним из преимуществ водородной энергетики, так как повышает энергетическую безопасность и снижает зависимость от отдельных видов сырья. К ним относятся: паровая конверсия метана и природного газа, газификация угля, электролиз воды, пиролиз, частичное окисление, биотехнологии.

К настоящему времени технологии крупномасштабного получения и переработки водорода являются хорошо освоенными (Рис. 1, а). Производство водорода составляет 75 млн. т (2019 г.), увеличиваясь ежегодно на 10 %, причем более 3/4 производится из природного газа, для чего расходуется более 205 млрд.  $\text{м}^3$  газа. При производстве водорода в атмосферу поступает ~830 млн. тонн  $\text{CO}_2$ .

Следует отметить, что только часть водорода производят как целевой продукт, практически третья часть является побочным продуктом других

производств (нефтепереработка, коксохимия и т. п.). К последним также относится почти весь водород, получаемый в настоящее время электролизом (производство хлора, хлоратов, перекиси водорода и каустической соды).



*Рис. 1. Структура мирового производства (а) и потребления (б) водорода*

Из природного газа получают около 85 % производимого в мире водорода, что обусловлено достаточно высокой (более 80 %) эффективностью процесса, его реализацией на уровне крупномасштабного производства, сравнительно невысокой (на настоящий момент) стоимостью и отлаженной инфраструктурой транспортировки исходного сырья. В результате стоимость водорода по данной технологии оказывается самой низкой по сравнению со стоимостью водорода, получаемого другими методами. При этом она существенно снижается по мере увеличения производительности. Паровая конверсия метана (ПКМ) в настоящее время является наиболее рентабельным способом производства водорода.

По-видимому, в ближайшем будущем методы получения водорода с использованием углеродного сырья будут основными. Однако сырьевые и экологические ограничения процесса паровой конверсии метана стимулируют разработку процессов производства водорода из воды. Среди спосо-

бов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики [11-13] представляют электролиз, термохимические и термоэлектрохимические циклы.

Прогнозируется, что наиболее востребованной технологией получения водорода в будущем станет электролиз воды, хотя в настоящее время из-за высокой стоимости доля этого метода в мировом производстве водорода не превышает 4 % (Рис. 1, б). Наиболее привлекательными особенностями электролизной технологии являются экологическая чистота (при условии, что производство первичной энергии не сопряжено с загрязнением окружающей среды), возможность создания установок с широким диапазоном производительности (от нескольких литров до сотен м<sup>3</sup> водорода в час), простота эксплуатации и удобство в работе, высокая чистота производимого водорода и наличие ценного побочного продукта – газообразного кислорода.

Из различных методов разложения воды (электрохимический, термический, термохимический, биохимический, фотохимический и др.) технически наиболее разработан электролитический метод, который позволяет производить водород с полезным использованием затрачиваемой электрической энергии (КПД) примерно 70 %. При дальнейшем усовершенствовании процесса теоретически возможно увеличение этого показателя до 80 %, а при высокотемпературном электролизе и до 80–90 %.

Следует отметить, что из значительного объема производимого водорода только 5 % в настоящее время является коммерческим продуктом, продаваемым от производителей потребителям. Как правило, крупные потребители водорода сами производят его для собственных нужд, что вызвано экономическими факторами (высокие цены на товарный водород), а также техническими трудностями обеспечения, хранения и транспортировки больших количеств водорода. Мировая торговля водородом ведется в ограниченных масштабах. Она наиболее активна в Западной Европе, где имеется небольшая, но развитая сеть трубопроводов по перекачке водорода



между предприятиями по его производству и потреблению. Водород не является биржевым товаром, и говорить о его мировых ценах трудно, поскольку цены при поставках являются контрактными и зависят от многих условий, в том числе от требуемой чистоты водорода как продукта.

Создание глобального рынка водорода наряду с производством требует эффективного решения проблем его транспортирования, хранения и использования на основе масштабирования существующих решений и создания более эффективных направлений. Низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его ожижения, а также высокая взрывоопасность в сочетании с негативным воздействием на свойства конструкционных материалов ставят на первый план проблемы разработки технологически, экологически и экономически эффективных и безопасных систем хранения водорода, транспортирования и использования. Опыт работы замкнутого цикла водородной энергетики, выстроенного в технологически передовых странах к концу 80-ых годов 20 столетия, дает серьезную технологическую основу для решения вопросов, требующих решения для дальнейшего развития данного направления.

*Вопрос 4. Что определяет перспективы развития водородной энергетики?*

1. Как было уже отмечено, перспективы развития водородной энергетики в мире в первую очередь будут определяться фактором декарбонизации экономики. А перспективы самой декарбонизации, не смотря на принятые решения на самом высоком уровне, туманны вследствие нескольких причин. Нет единого мнения по вопросу необходимости проведения декарбонизации. Фактически это уже новая бизнес-ниша, которая формируется под лозунгами борьбы за сохранение климата. Сумма дохода от торговли квотами на вредные выбросы уже превысила 200 млрд долларов США. При этом стоимость квот постоянно увеличивается. Если в 2019 году в ЕС стоимость квоты была 28 долларов США за эквивалент

тонны CO<sub>2</sub>, то в 2021 году – уже 54 доллара, то есть больше почти в два раза. Конечно, основная часть этого дохода идёт от «грязных» предприятий промышленности, которых в одной только России, как известно, очень много – Россия на пятом месте по углеродным выбросам (после Китая, США, ЕС, Индии). И наживаться на этом, заставив нас платить углеродный налог за нашу продукцию в ту же Европу – это очень большой соблазн.

Наиболее ярким сторонником декарбонизации выступает Европа. Базовым инструментом достижения минимального выброса CO<sub>2</sub> является доклад «Таксономия». По этому документу будет оцениваться экологичность инвестиций. Так в нем указано, что природный газ и атомная энергетика являются проблематичными [14]. Здесь явно видно лоббистское влияние производителей солнечных и ветровых источников энергии. И только в апреле 2021 г., видимо учитывая уроки прошедшей зимы, атомная генерация по степени влияния на климат была приравнена к ВИЭ.

При этом апологеты декарбонизации никак не отвечают (и не могут ответить) на простые вопросы, например:

- всей энергетикой мира вырабатывается энергии в 10000 раз меньше, чем поступает на Землю от Солнца; причем активность последнего имеет заметные колебания; почему мы должны верить, что 0,01% энергии определяет развитие климата на Земле;
- известны периодически происходящие колебания температуры на Земле; например, в начале второго тысячелетия было потепление, потом похолодание, а с 14 века опять потепление, при этом в то время не наблюдались значительные антропогенные выбросы углекислого газа;
- почему упор делается только на выработку электроэнергии, которая составляет 10% от общего потребления энергии;
- почему не опровергаются последние результаты исследований двух международных групп, которые указали на ошибки в модели расчета перспектив температуры и т.д.

2. Наличие минеральных ресурсов для развития возобновляемой энергетики. Технологии, которые требуются для эффективного перехода на энергию солнца и ветра, требуют в 10 раз больше минеральных ресурсов на 1 кВт установленной мощности по сравнению с традиционной энергетикой. Это является очень весомым вкладом в загрязнение экологии на нашей планете. Получается, чтобы получить генерацию энергии в виде прерывистого и ненадёжного источника энергии, нужно сначала добыть в десять раз больше полезных ископаемых. В 2019 году компания «Tesla» объявила, что ей уже критически не хватает редкоземельных металлов для выпуска аккумуляторных батарей, даже медь вошла в этот список. В земной коре нет необходимого количества индия и теллура для масштабного производства наиболее эффективных солнечных батарей.

Насколько быстро будут истощены земные недра природных минеральных элементов при осуществлении перехода на ветровую и солнечную энергетику? Вопрос риторический.

3. Как ни странно, влияние на экологию. Мы привыкли слышать, что ВИЭ благоприятно влияют на экологию. Да, это верно, когда мы говорим о непосредственных выбросах загрязняющих веществ в воздух. Но при этом остаются много других нерешенных экологических вопросов. Сторонники зеленой энергетики умалчивают об огромном отрицательном воздействии энергетических нововведений на природу. Огромные площади, занятые «зелёными» мощностями, в сто раз превышают аналогичные (в расчёте на 1 кВт) мощности традиционной энергетики – всё это не может положительно влиять на биоразнообразие жизни.

Неясны и проблемы утилизации отработанных солнечных и ветряных электростанций. Даже сегодня использовать энергию ископаемого топлива с высоким коэффициентом энергетической рентабельности (EROEI) для переработки солнечных батарей слишком невыгодно, проще их «утилизировать» по старинке – методом захоронения. Пока не лучшим образом выглядит и ветроэнергетика – интернет полон фотогра-

фиями утилизации отработанных агрегатов ветротурбин с США, их просто закапывают в землю. Пока утилизация отходов настолько энергетически затратный процесс, что при его применении энергетический коэффициент ветроэнергетики снижается практически до нуля. Производство и утилизация литиевых батарей является грязнейшим производством и потребляет колоссальное количество электроэнергии.

Международное агентство по возобновляемым источникам энергии прогнозирует, что к 2050 году утилизации и переработке будут подлежать 78 миллионов метрических тонн солнечных панелей и десятки миллионов тонн старых турбинных лопастей. Радует, что за решение этой задачи берутся многие компании и стартапы. Примерно 85 % компонентов турбины, включая сталь, медную проволоку, электронику, могут быть переработаны или повторно использованы. Но вот с лопастями, изготовленными из стекловолокна, есть проблема. Учёные пытаются найти лучшие способы отделить смолу от волокна, и дать материалам бывших лопастей «новую жизнь», в основном в виде гранул или плит для дорожного покрытия.

4. Низкая надежность ВИЭ. Энергетика, построенная на возобновляемых источниках, таких как солнце и ветер, показала свою низкую надёжность ещё до начала энергетического кризиса 2021 года. В исследовании европейских учёных от 2013 года ("Energy intensities, EROEIs, and energy payback times of electricity generating power plants") были отмечены низкие энергетические характеристики возобновляемой энергетики, особенно учитывая её прерывистость. И угрозы, которые были только теоретически предсказаны, полностью подтвердились в январе-феврале 2021 года, когда из-за аномальной для Германии (и ЕС в целом) холодной погоды перестали работать почти все мощности солнечной и ветровой энергетики в стране. Для Японии и США это обернулось трагично – погибли люди. Германию спасла российская газовая труба и ещё не выведенные из состава эксплуатации угольные электростанции, которые смогли совокупно за-

менить вышедшие из строя энергетические мощности возобновляемой энергетики.

Подобный результат был вполне предсказуемым, однако повысить надёжность ВИЭ можно как раз с помощью применения водородных технологий и собственно водорода как энергоносителя.

5. Низкая энергетическая эффективность ВИЭ. Еще в 70-80-х годах прошлого века была доказана неэффективность любых возобновляемых источников, даже гидроэлектростанций по сравнению с традиционными источниками - нефтью, газом, мазутом, углем, атомом. Например, авторитетный исследователь и известная в научных кругах леди Гейл Тверберг обосновала деградацию нашего общества по энергопотреблению на душу населения до уровня 1900 года уже через 30 лет.

Ветроэлектрические установки (ВЭС) практически достигли предела своего КПД, и больше не могут быть существенно улучшены. Если ВЭС производить из той энергии, которую способны вырабатывать они сами, то каждую новую ВЭС, скажем, мощностью в 5 МВт, можно будет строить не раньше, чем через полтора года. Именно столько времени требуется ВЭС установочной мощностью в 5 МВт, чтобы выработать достаточно энергии для производства и строительства ещё одной 5-мегаваттной ВЭС.

Для солнечной электростанции (СЭС), расположенной в пустыне Сахара требуется 4 года, чтобы выработать достаточно электроэнергии для строительства ещё одной подобной СЭС. В то же время, газовая ТЭС уже через 2 недели выработает необходимое для постройки ещё одной аналогичной ТЭС количество энергии; для угольной ТЭС потребуется 1 месяц работы; для АЭС – 2 месяца; для ГЭС – 2 года.

Таким образом, расширение применения ВИЭ ведет к **снижению энергетической эффективности!** Этот фактор является важнейшим, который будет влиять на развитие процесса декарбонизации, а через него водородной энергетики. В условиях нехватки энергии в мире, прямой зависимости уровня жизни от объема потребляемой энергии заведомо идти на

понижение эффективности энергетической системы в угоду туманных целей – это авантюра!

6. Экономика – самое главное. Хотя с 2011 по 2018 год на альтернативную энергетику было потрачено 2 триллиона долларов США, она заменила лишь 3 % от общей электрогенерации в мире. Глобальные инвестиции в энергопереход в 2021 году составили 755 миллиардов долларов США, что является абсолютным рекордом, рост составил 27 %! Такие затраты несовместимы с разумным экономическим подходом, однако «страх» необратимого изменения климата приводит к подобным затратным проектам с малой отдачей и эффективностью.

В 2013 году экономисты из США рассчитали современные потребности нашей цивилизации в энергии (Energy, EROEI and quality of life) и пришли к выводу, что альтернативные источники энергии уже не могут обеспечивать и поддерживать должный уровень жизни в развитых странах.

Цены на электроэнергию в базовом тарифе поднялись в Германии до нового исторического максимума в 33,77 евроцента за киловатт-час электроэнергии. По данным Евростата, в первой половине 2020 года средняя цена в европейских странах составляла 18 евроцентов. А «дополнительные» 15 евроцентов для немцев можно считать «зеленой нагрузкой».

Если брать за основу исследования европейских учёных об энергетической эффективности различных источников электрогенерации, то можно просчитать наиболее эффективные гибридные решения при использовании альтернативной энергетики по их «EROEI» – отношению полученной энергии в результате их работы к затраченной энергии, которая понадобилась на создание и запуск генерации:

- отдельные ветропарки имеют «EROEI» 16 единиц;
- отдельные солнечные электростанции – 4 единицы;
- ветро-атомные комплексы имеют эффективный «EROEI» 48 единиц (в перспективе, при замыкании топливного ядерного цикла данный показатель должен увеличиться до 80 единиц);

- атомно-солнечные комплексы – 40 единиц;
- ветро-газовые комплексы имеют эффективный «EROEI» 22 единицы;
- солнечно-газовые комплексы – 16 единиц;
- ветро-солнечные комплексы имеют эффективный «EROEI» 10 единиц, но, учитывая буферизацию, которая необходима для выравнивания прерывистой генерации сторонними источниками электроэнергии, совокупный эффективный «EROEI» падает до 3 единиц.

В отмеченном ранее исследовании американские экономисты определили необходимые энергетические потребности для поддержания и дальнейшего развития уровня жизни человечества:

- современная сельскохозяйственная деятельность возможна при «EROEI» не менее 5 единиц;
- для современного образования в обществе требуется «EROEI» не менее 7;
- услуги современного здравоохранения возможны при «EROEI» не менее 12;
- для поддержания среднемирового уровня качества общественной жизни требуется «EROEI» не менее 14 единиц;
- для научно-технического и промышленного развития человечества требуется минимальный «EROEI» в 20 единиц;
- для поддержания качества жизни, сложившегося в развитых странах, EROEI должен быть около 30 единиц.

Если учесть выработку электроэнергии в Германии в 2019 году, то средний «EROEI» источников электроэнергии лежит в диапазоне от 19 до 25 единиц.

На сегодняшний день расходы на переход на нулевой баланс выбросов углерода понятны не до конца. В докладе Института мировой экономики Питерсона утверждается, что процветание в долгосрочной перспек-

тиве зависит от декарбонизации, однако авторы доклада скромно добавляют, что в течение ближайших 5-10 лет **«декарбонизация неизбежно снизит экономический потенциал»** [14]. Учитывая низкую эффективность, почему только в ближайшие годы?

Сейчас в полный рост встаёт другой вопрос, который может замедлить «зелёное» развитие Германии. Как говорят некоторые эксперты, это вопрос «гринфляции». В понятии гринфляция объединены два смысла – новая зелёная экономика и инфляция. Сейчас, в момент переходного периода от углеводородной экономики к зелёной, экономические законы начали оказывать сильнейшее влияние на темпы энергетического перехода. В частности, мы наблюдаем рост цен на энергоносители и сырьё, необходимые для производств электромобилей и оборудования возобновляемой энергетики. Литий - ключевой элемент автомобильных аккумуляторов, в 2021 году  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (карбонат лития) подорожал на 240 %, поликристаллический кремний на 20 %, даже цена на производимую в больших масштабах медь резко выросла. О росте цен на электроэнергию в странах Европы сказано выше.

Таким образом, учитывая **низкую энергетическую эффективность ВИЭ**, дальнейшее **увеличение объемов производства энергии на их основе приведет к стагнации развития общества**. Поэтому, когда возникнет угроза снижения уровня жизни населения (тем более, если это начнет явно проявляться), то политики могут прозреть и ограничить свои планы по развитию ВИЭ, декарбонизации, что лишит водородную энергетику ее основной движущей силы.

### **Выводы.**

1. Водород очень широко распространен в природе – он самый распространенный элемент Вселенной, содержание водорода в земной коре (литосфере и гидросфере) 16 ат. %. Водород входит в состав многих органических и неорганических соединений и встречается в очень не-



значительном количестве в свободном состоянии в атмосфере, вулканических газах и продуктах разложения органических остатков. Как энергоноситель и топливо молекулярный водород обладает рядом уникальных характеристик: наивысшей теплотой сгорания на единицу массы (по низшей теплоте сгорания 1 т  $H_2$  эквивалентна в пересчете на условное топливо 4,1 т), широким диапазоном воспламенения, высокой температурой сгорания.

2. Учитывая очень незначительные количества водорода в виде простого вещества в природе, он не может быть назван новым источником энергии, способным решить энергетические и экологические проблемы человечества. В природе в основном он находится в связанном виде, входя в состав воды, природных углеводородов, биомассы, различных органических отходов. Получение водорода из этих химических соединений требует затрат энергии. Поэтому водород следует рассматривать всего лишь как искусственный промежуточный переносчик энергии и для его широкого применения, прежде всего, должна быть решена проблема его достаточно дешевого и экологически чистого производства.
3. В настоящее время технологии крупномасштабного получения и переработки водорода являются хорошо освоенными. Производство водорода составляет 75 млн. т (2019 г.), причем более 3/4 производится из природного газа, для чего расходуется более 205 млрд.  $m^3$  газа. С точки зрения влияния на климат стратегия производства водородного топлива из ископаемых углеводородов мало чем отличается от непосредственного сжигания природных топлив. Если в последнем случае выбросы  $CO_2$  в атмосфере появляются на стадии использования топлива, то в первом имеются практически те же выбросы на стадии его получения. Поэтому основными компонентами новых технологий производства водорода из органики являются процессы улавливания сопутствующих выбросов в атмосферу, включая  $CO_2$ .
4. Альтернативой производству водорода из углеводородов и угля является

ся электролиз воды. Ведутся интенсивные исследования по совершенствованию технологии и оборудования. Наиболее перспективным представляется электролиз при высокой температуре, особенно в связке с атомными реакторами.

5. Опыт работы замкнутого цикла водородной энергетики, выстроенного в технологически передовых странах к концу 80-ых годов 20 столетия, дает серьезную технологическую основу для решения вопросов, требующих решения для дальнейшего развития данного направления. Из значительного объема производимого водорода только 5 % в настоящее время является коммерческим продуктом. Создание глобального рынка водорода наряду с производством требует эффективного решения проблем его транспортирования, хранения и использования на основе масштабирования существующих решений и создания более эффективных направлений.
6. Можно выделить пять базовых факторов развития водородной энергетики: декарбонизация, охрана атмосферного воздуха, развитие ВИЭ, энергетическая безопасность, поиск новых точек экономического роста. При этом учитывая количество вовлеченных стран, наибольшее влияние на рост рынка водорода окажет первый фактор.

Перспективы самой декарбонизации, несмотря на принятые решения на самом высоком уровне, туманны вследствие нескольких причин:

- отсутствие общепризнанной теории причин повышения температуры планеты;
- ограниченность ресурсов, в первую очередь металлов;
- экологические проблемы ВИЭ;
- низкая надежность ВИЭ;
- низкая энергетическая эффективность ВИЭ;
- экономика.

Последняя причина наиболее значимая – широкое распространение ВИЭ вследствие их низкой эффективности приведет к снижению жизнен-

ного уровня населения развитых стран, что заставит политиков пересмотреть планы по декарбонизации, а затем и по водородной энергетике.

### Список литературы

1. Химическая энциклопедия: в 5 т. Т. 1 : А – Дарзана / ред. кол.: Кнунянц И.Л. (гл. ред.) [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1988. – 623 с.
2. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. К вопросу водородоносности угольных бассейнов Дальнего Востока // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 1 (15). – С. 19-32.
3. Перевозчиков Г.В. Поле водорода на месторождении Газли по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 1. – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/1/5\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/5_2012.pdf).
4. Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). – М. : Агар, 2005. – 242 с.
5. Полеванов В.П., Глазьев С.Ю. Поиски месторождений природного водорода в России как основа встраивания в новый технологический уклад // Недропользование XXI век. – 2020. – № 4. – С. 12-23.
6. Патент № 2244817 Российская Федерация, МПК E21B 43/295 (2000.01), C01B 3/06 (2000.01). Способ использования вещества мантии Земли для получения водорода : № 2003130407/03 : заявлено 15.10.2003 : опубликовано 20.01.2005 / Ларин В.Н. ; патентообладатели: Ларин Владимир Николаевич, Ларин Николай Владимирович. – 6 с. : ил.
7. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. – М. : Интеллект, 2011. – 168 с.
8. Зайченко В.М., Штеренберг В.А., Шпильрайт Э.Э. Получение жидких моторных топлив из природного газа в обоснование концепции энергетике, свободной от CO<sub>2</sub> // Ведомости МТЭА. – 2000. – № 28 : Доклады 2-й Московской Междунар. конф. «Энергетика и общество». – С. 143.
9. Кислов В.Р. Углекислотная конверсия метана с использованием мембранных катализаторов на основе двойных карбидов : специальность 05.17.07 «Химическая технология топлив и высокоэнергетических веществ» : дис. ... канд. хим. наук. – М., 2017. – 135 с.
10. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья / И.А. Макарян, И.В. Седов, А.В. Никитин, В.С. Арутюнов // Научный журнал Российского газового общества. – 2020. – № 1. – С. 50-68.
11. Долгополов С.Ю., Ломов И.В., Шаманин И.В. Введение в ядерно-водородную энергетику : учеб. пособие. – Томск : Томский политехнический университет, 2008. – 168 с.
12. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. – М. : Наука, 2017. – 254 с.
13. Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергетика и ее будущее // Энергетика России. Проблемы и перспективы : труды Научной сессии Российской Академии наук. – М. : Наука, 2006. – С. 273-283.
14. Ергин Д. Новая карта мира. Энергетические ресурсы, меняющийся климат и столкновение наций : пер.с англ. – М. : Альпина Паблишер, 2021. – 444 с.

## References

1. Chemical encyclopedia: in 5 volumes. Vol. 1: A – Darzana/Khunyants (Ed.in.Ch). Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988. 623 p. (in Russian)
2. Gresov A. I., Obzhairov A. I., Yatsuk A. V. K voprosu vodorodonosnosti ugol'nykh basseynov Dal'nego Vostoka [Hydrogen potential of coal basins in the Far East revisited]. Nauki o Zemle [Earth Sciences], 2010, No. 1 (15), pp. 19—32. (in Russian)
3. Perevozchikov G.V. Pole vodoroda na mestorozhdenii Gazli po dannym geokhimicheskikh issledovaniy v neftegazonosnom regione Sredney Azii [Geochemical research on hydrogen accumulation in the Gazli gas field]. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Petroleum Geology - Theoretical and Applied Studies], 2012, vol. 7, No.1. Available at [http://www.ngtp.ru/rub/1/5\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/5_2012.pdf). (in Russian)
4. Larin V.N. Nasha Zemlya (proiskhozhdenie, sostav, stroenie i razvitie iznachal'no gidridnoy Zemli) [Our Earth: origin, composition, structure, and evolution of primordially hydridic Earth]. Moscow: Agar Publ., 2005. 242 p. (in Russian)
5. Polevanov V.P., Glazev S.Yu. Poiski mestorozhdeniy prirodnogo vodoroda v Rossii kak osnova vstraivaniya v novyy tekhnologicheskii uklad [Searches for natural hydrogen deposits in Russia as a basis for integration into a new technological order]. Nedropol'zovanie XXI vek [Subsoil Use XXI Century], 2020, No. 4, pp.12-23. (in Russian)
6. Larin V.N. Sposob ispol'zovaniya veshchestva mantii Zemli dlya polucheniya vodoroda [Hydrogen generation from Earth's mantle]. Inventor's Cert. 2244817, RF, Int. Cl. E21B 43/295 (2000.01), C01B 3/06 (2000.01), Appl. date: 15 October 2003, Pub. date: 20 January 2005. 6 p. (in Russian)
7. Fortov V.E., Popel' O.S. Energetika v sovremennom mire [Power engineering in modern world]. Moscow: Intellekt Publ., 2011. 168 p. (in Russian)
8. Zaychenko V.M., Shterenberg V.A., Shpil'rayt E.E. Poluchenie zhidkikh motornykh topliv iz prirodnogo gaza v obosnovanie kontseptsii energetiki, svobodnoy ot CO<sub>2</sub> [Production of liquid motor fuels from natural gas to justify the concept of CO<sub>2</sub>-free energy]. Bulletin of the International Fuel and Power Association, 2000, No. 28: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Moscow International Forum: Energy and Society, pp.143. (in Russian)
9. Kislov V.R. Uglekislotnaya konversiya metana s ispol'zovaniem kislotnykh katalizatorov na osnove karbidov [Carbon dioxide conversion of methane using carbide-based acid catalysts]. PhD thesis, Moscow, 2017. 135 p. (in Russian)
10. Makaryan I.A., Sedov I.V., Nikitin A.V., Arutyunov V.S. Sovremennye podkhody k polucheniyu vodoroda iz uglevodorodnogo syr'ya [Modern approaches to the production of hydrogen from hydrocarbon raw materials.]. Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva [Scientific Journal of Russian Gas Society], 2020, No. 1, pp. 50-68. (in Russian)
11. Dolgoplov S.Yu., Lomov I.V., Shamanin I.V. Vvedenie v yaderno-vodorodnuyu energetiku [Introduction to nuclear-hydrogen economy], Tomsk: Tomsk Polytechnical University, 2008. 168 p. (in Russian)
12. Aminov R.Z., Bayramov A.N. Kombinirovaniye vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami [Combination of hydrogen energy cycles with nuclear power plants], Moscow: Nauka Publ., 2017. 254 p. (in Russian)
13. Ponomarev-Stepnoy N.N. Atomnaya energetika i ee budushchee [Nuclear energy and its future]. Russian energy sector. Challenges and perspectives: Proc. of Scientific Session of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka Publ., 2006, pp. 273-283. (in Russian)
14. Ergin D. The new map: energy, climate, and the clash of nations. Moscow: Alpina Publ., 2021. 444 p. (translated from English)

### **Сведения об авторах**

*Сахабутдинов Рифхат Зиннурович*, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела исследования и промышленной подготовки нефти, газа и воды института «ТатНИПИнефть», ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина  
Россия, 423236, Бугульма, ул. М. Джалиля, 32  
E-mail: rifkat@tatnipi.ru

### **Authors**

*R.Z. Sakhabutdinov*, Dr.Sc., Professor, Chief Research Associate, Wellstream Treatment Department, TatNIPIneft Institute – PJSC TATNEFT  
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation  
E-mail: rifkat@tatnipi.ru

*Статья поступила в редакцию 16.02.2022*

*Принята к публикации 19.03.2022*

*Опубликована 30.03.2022*