

Потенциал водородной энергетики и возможные следствия ее реализации

В.С. Арутюнов^{1,2,3}, Л.Н. Стрекова¹

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, 11991, Москва, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9987-5963>, E-mail: strekova@chph.ras.ru

² Институт проблем химической физики Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

³ Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

Резюме: Продолжающееся уже несколько десятилетий повышение средней температуры земной поверхности, которое связывают с антропогенной эмиссией в атмосферу парниковых газов, прежде всего CO₂, стимулирует интерес к более широкому использованию «безуглеродных» источников энергии, в частности водорода. Однако водород не является первичным источником энергии, а всего лишь энергоносителем, и переход к водородной энергетике связан не только с высокими капитальными и операционными затратами на его получение, но и существенным дополнительным потреблением ископаемых ресурсов и, соответственно, дополнительной эмиссией CO₂ в атмосферу. Поэтому глобальный экологический и экономический эффект такого перехода неочевиден.

Ключевые слова: изменение климата, водород, водородная энергетика, технологии производства водорода.

Для цитирования: Арутюнов В.С., Стрекова Л.Н. Потенциал водородной энергетики и возможные следствия ее реализации // НефтеГазоХимия. 2021. № 1-2. С. 8–11.

DOI:10.24412/2310-8266-2021-1-2-8-11

Благодарность: Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук, тема ФИЦ ХФ РАН 0082-2019-0014, номер госрегистрации AAAA-A20-120020590084-9 и тема ИПХФ РАН 0089-2019-0018, номер госрегистрации AAAA-A19-119022690098-3.

THE POTENTIAL OF HYDROGEN ENERGY AND POSSIBLE CONSEQUENCES OF ITS IMPLEMENTATION

Vladimir S. Arutyunov^{1,2,3}, Ludmila N. Strekova¹

¹ N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9987-5963>, E-mail: strekova@chph.ras.ru

² Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 142432, Moscow region, Chernogolovka, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

³ Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 119991, Moscow, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0339-0297>, E-mail: arutyunov@chph.ras.ru

Abstract: The decades-long increase in the average temperature of the Earth's surface, which is associated with anthropogenic emissions of greenhouse gases, primarily CO₂, into the atmosphere, is stimulating interest in the wider use of "carbon-free" energy sources, in particular, hydrogen. However, hydrogen is not a primary source of energy, but only an energy carrier, and the transition to "hydrogen energy" is associated not only with high capital and operating costs for its production, but also with significant additional consumption of fossil resources and, accordingly, additional CO₂ emissions into the atmosphere. Therefore, the global environmental and economic impact of such a transition is not obvious.

Keywords: climate change, hydrogen, hydrogen energy, hydrogen production technologies.

For citation: Arutyunov V.S., Strekova L.N. THE POTENTIAL OF HYDROGEN ENERGY AND POSSIBLE CONSEQUENCES OF ITS IMPLEMENTATION. Oil & Gas Chemistry. 2021, no. 1-2, pp. 8–11.

DOI:10.24412/2310-8266-2021-1-2-8-11

Acknowledgments: This work was performed within the framework of the Program of Fundamental Research of the Russian Academy of Sciences on the research issue of FRCCP RAS № 0082-2019-0014 (State reg. AAAA-A20-120020590084-9) and the research issue of IPCP RAS № 0089-2019-0018 (State reg. AAAA-A19-119022690098-3).

Введение

Одна из глобальных проблем, с которой столкнулось мировое сообщество в конце прошлого века – быстрое повышение средней температуры земной поверхности. Особое беспокойство вызывает то, что скорость изменения температуры значительно превышает скорость тех изменений, которые наблюдались в преиндустриальную эпоху. По данным The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), к 2017 году это повышение достигло 1 °С по сравнению с преиндустриальным периодом и в настоящее время продолжается со скоростью примерно 0,2 °С за декаду [1].

Сам факт изменения температуры не вызывает сомнений, хотя дискуссия о его причинах продолжается, и по-прежнему существуют различные точки зрения на его причины. Несмотря на наличие объективных свидетельств естественных причин наблюдаемых климатических изменений [2], преобладающей точкой зрения на причины повышения средней температуры земной поверхности, отраженной в материалах IPCC, является антропогенное воздействие на состав атмосферы, выраженное в быстром повышении в ней концентрации парниковых газов, прежде всего CO₂, которая в 2019 году достигла почти 410 ppm по сравнению с 296 ppm в 1900 году [3].

Критическая величина повышения температуры, превышение которой приведет к необратимым изменениям ледникового покрова планеты, уровня Мирового океана и характера циркуляции потоков в атмосфере и океане оценивается примерно в 2 °С [4]. Реакцией международного сообщества на сложившуюся ситуацию в попытке предотвратить повышение температуры до критического значения стало принятие 12 декабря 2015 года представителями 196 стран Парижского соглашения по климату. Целью соглашения, которое вступило в силу 4 ноября 2016 года, является разработка и реализация стратегии снижения эмиссии парниковых газов, прежде всего CO₂.

Поскольку основным источником антропогенной эмиссии CO_2 в атмосферу (более 75%) является современная энергетика, которая с середины XIX века и по настоящее время более чем на 80% базируется на углеводородных источниках энергии, основной целью усилий по реализации Парижского соглашения заявлено снижение доли углеводородных источников в мировом энергобалансе, в основном за счет перехода на возобновляемые источники энергии. Однако реальный потенциал возобновляемых источников энергии значительно ниже даже текущих потребностей мировой энергетике [5], поэтому все серьезные прогнозы на обозримый период отводят ей долю всего в несколько процентов мирового энергобаланса [6].

В этой связи неудивительно, что в последнее время основным направлением усилий по снижению углеродного следа энергетики провозглашена необходимость ускоренного перехода на водородную энергетику, то есть более широкое использование водорода в качестве энергоносителя в производстве энергии, коммунальном секторе и на транспорте. Россия также активно присоединяется к этим усилиям, в частности распоряжением правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р утвержден план мероприятий (дорожная карта) по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года [7]. План направлен на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, а также на вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Такой интерес к повышению роли водорода в мировой энергетике делает необходимым экономический анализ цены вопроса и анализ влияния последствий реализации предлагаемых мер на общий баланс и скорость истощения ископаемых энергоресурсов, остающихся пока фундаментом мировой энергетике.

Энергетическая цена водородной энергетики

Прежде всего необходимо напомнить, что, хотя водород является самым распространенным элементом во Вселенной, в земной коре нет сколько-нибудь значительных его источников. Водород – вторичный энергоноситель, который может быть получен только на основе использования первичных источников энергии. Его промышленное потребление, выросшее с 1975 года в три раза, продолжает быстро увеличиваться, но практически полностью за счет использования ископаемых источников. На это уже сейчас расходуется примерно 6% мировой добычи природного газа и 2% мировой добычи угля, что приводит к эмиссии около 830 млн т CO_2 в год [8].

Исходя из объема CO_2 , образующегося в процессе получения водорода, его принято делить на «серый» (получаемый путем конверсии ископаемых углеводородов), «голубой» (то же самое, но со сбором и захоронением образующегося при этом CO_2) и «зеленый», получаемый с использованием только возобновляемых источников сырья и энергии.

Наиболее эффективная современная технология получения водорода, на которую приходится около 80% его производства, – паровой риформинг природного газа (Steam Reforming of Methane – SRM) [9, 10]. С учетом последующей паровой конверсии образующегося монооксида углерода из одной молекулы метана можно получить четыре молекулы водорода. С точки зрения общего энергосодержания это примерно эквивалентно энергии исходной молекулы метана (низшая теплота сгорания водорода при нормальных условиях 10 800 кДж/м³, метана – 35 840 кДж/м³). Но

с учетом большого дополнительного расхода энергии – в данном случае того же природного газа – на нагрев сырья и производство большого объема пара реальный расход природного газа в этой сложной капиталоемкой технологии примерно в два раза выше. Так, при объеме мирового производства водорода в 2019 году около 75 млн т (в основном на производство аммиака и нефтехимические процессы) расход природного газа на его производство составил примерно 205 млрд м³.

Поскольку получение водорода путем парового риформинга сопровождается образованием CO_2 (примерно 10 кг CO_2 /кг H_2), такой водород по принятой «экологической» градации рассматривается, как «серый», то есть экологически непривлекательный и не решающий поставленную задачу снижения эмиссии CO_2 в атмосферу.

Для того чтобы получаемый водород можно было считать экологически более чистым и повысить его привлекательность с точки зрения решения экологических и климатических проблем, необходимо секвестировать как CO_2 , содержащийся в дымовых газах, образующихся при нагреве реагентов и производстве пара, так и CO_2 , образующийся при паровой конверсии монооксида углерода, то есть дополнить процесс SRM технологией сбора и захоронения углерода (Carbon Capture and Storage – CCS). Получаемый в таком совмещенном процессе водород уже можно квалифицировать как «голубой». Однако для этого требуются дополнительные затраты энергии и дополнительный расход природного газа. То есть, помимо немалых капитальных затрат и сложного процессинга, получение «голубого» водорода на основе совмещения технологий SRM+CCS потребует почти утроения общего потребления природного газа и, соответственно, скорости истощения его природных ресурсов.

В 2018 году в мире насчитывалось лишь 18 крупных проектов с технологией улавливания CO_2 , еще 5 было в стадии строительства и 20 – в различных стадиях разработки. Добавление технологии CCS повышает капитальные затраты (CAPEX) технологии SRM на величину до 87%, а операционные затраты (OPEX) – на величину до 33%. Приведенная стоимость получаемого при этом водорода возрастает почти в полтора раза – до 1,8 евро за кг, а цена утилизации CO_2 достигает 70 евро за тонну CO_2 [11].

В принципе «голубой» водород можно получать путем пиролиза природного газа, продуктами которого являются водород и твердый углерод [12]. Такие процессы сейчас в небольшом объеме используют для производства технического углерода (сажи). Из термодинамики процесса следует, что затраты энергии непосредственно на пиролиз потребуют дополнительного расхода примерно 20% полученного водорода. Но для реальной оценки дополнительных затрат природного газа на получение такого водорода необходимо принять более высокое значение в ~50%. Тогда на пиролиз 1 м³ CH_4 будет затрачено 2 м³ CH_4 с суммарной низшей теплотой сгорания примерно 71 700 кДж. При этом будет получено 2 м³ водорода с суммарной низшей теплотой сгорания 21 600 кДж. Полный энергетический КПД этой операции составит всего 30%. Таким образом, чтобы обеспечить получение такого же количества энергии, которое обеспечивает использование природного газа, за счет водорода, получаемого пиролизом метана, придется увеличить мировое потребление метана примерно в три раза, с нынешних ~4 трлн м³/год до ~12 трлн м³/год. Это примерно эквивалентно всему суммарному мировому потреблению газа, нефти и угля. Для выхода на такой уровень добычи газа мировой экономике потребуются десятилетия и колоссальные инвестиции, а ресурсы газа будут убывать

в три раза быстрее. Кроме того, ежегодно будет образовываться примерно 9 млрд т/год никому не нужного в таких количествах мелкодисперсного угля (мировое потребление техуглерода всего около 40 млн т/год). Чтобы полученный водород мог считаться «голубым», этот углерод нельзя использовать в качестве топлива, и возникнет дополнительная проблема его захоронения.

Что касается получения «зеленого» водорода электролизом на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), то это остается самой дорогой технологией его производства. Стоимость такого водорода в три раз выше стоимости водорода, получаемого путем паровой конверсии метана, поэтому, несмотря на все усилия, доля «зеленого» водорода в его мировом производстве много меньше 1%. И до сих пор в мире нет сколько-нибудь масштабных осуществленных проектов получения водорода с использованием ВИЭ. Наиболее реальные планы получения безуглеродного водорода пока предлагает только атомная энергетика при КПД электролиза около 40% [12]. Но доля самой атомной энергетике в мировом энергобалансе всего около 4% [13] и по ресурсным соображениям принципиально не может сколько-нибудь значительно превысить эту величину. Поэтому глобальные потребности в водороде этот источник обеспечить не может.

Необходимо также учитывать, что в настоящее время более 90% водорода производят непосредственно на месте его потребления (как так называемый «кэптивный продукт») и лишь менее 10% поставляют специализированные компании, работающие на рынке промышленных газов (Air Liquide, Linde, Praxair Inc. и др.). Переход к более широкому использованию водорода в различных секторах энергетики и на транспорте невозможен без практического решения отдельной и не менее сложной проблемы, чем его получение, – проблемы его хранения, транспортировки и распределения. И пока эта проблема еще очень далека от практического решения не только в промышленных масштабах, но и на уровне коммунального сектора и транспорта. Кроме того, широкое использование водорода, имеющего значительно более широкие пределы воспламенения и примерно в пять раз более высокую скорость горения, чем метан, невозможно без разработки мер, гарантирующих его безопасную эксплуатацию в быту и на транспорте.

О перспективных направлениях развития водородной энергетики в РФ

С учетом растущего интереса за рубежом к низкоуглеродному топливу, и прежде всего, водороду, 12 октября 2020 года распоряжением правительства РФ был утвержден план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Задачей плана является организация работ по формированию в РФ высокопроизводительной экспортно ориентированной области производства водорода и развития водородной энергетики. Серьезный ресурсный потенциал РФ (запасы природного газа, нефти и угля) и наличие незагруженных мощностей в электроэнергетике при наличии спроса, гарантируемого Парижским соглашением по климату и ожидаемым введением углеродного налога, делают экспорт низкоуглеродного топлива (водорода или его смеси с природным газом) достаточно перспективным направлением.

Оно вполне может компенсировать прогнозируемые для РФ потери от введения углеродного налога на импорт в страны Евросоюза. Новый налог, введение которого запланировано на 2022 год, предполагает, что поставщики товаров на европейский рынок, которые в процессе их производства сжигают много ископаемого топлива, будут платить около 30 евро за каждую тонну углекислого газа, попавшего в атмосферу.

Выполнение собственных планов стран Европейского союза по развитию водородной энергетики вряд ли реально без масштабных поставок водорода из РФ [14]. Поэтому развитие ориентированного на экспорт производства водорода в РФ представляется вполне целесообразным. С учетом наличия нерешенных проблем хранения и транспортировки больших объемов водорода наиболее разумным способом экспорта низкоуглеродного топлива могла бы быть поставка смеси природного газа с водородом (до 40–50% об.) по уже существующим газопроводам. Как показывают исследования, пределы воспламенения и скорость горения таких смесей еще не сильно отличаются от пределов воспламенения и скорости горения природного газа [15, 16], что позволяет эксплуатировать их на том же оборудовании и при соблюдении тех же мер безопасности, которые давно отработаны для работы с природным газом.

Менее очевидна целесообразность перехода на водород для самой отечественной энергетики. Конечно, большинство типов газовых турбин может работать на водороде или его смеси с природным газом. Например, компании НОВАТЭК и Nuovo Pignone заключили недавно соглашение о сотрудничестве в области электрических и газотурбинных решений по добыче и сжижению газа, а также сокращения выбросов CO₂, в рамках которого приступят к реализации проекта по переводу турбин на работу на водородсодержащих смесях [17]. Но как показывают исследования, переход на использование в энергетике метановодородных смесей с содержанием водорода менее 50% не дает дополнительных экологических преимуществ, кроме соответствующего снижения эмиссии CO₂ из-за более высокой доли водорода, причем только непосредственно в месте потребления. Но при этом, как было показано выше, вырастут глобальная эмиссия CO₂ в атмосферу, стоимость получаемой энергии, расход первичных энергоресурсов. Поскольку энергетический КПД экологически чистого преобразования природного газа в водород, как было показано выше, около 30%, при КПД современных газовых турбин также на уровне 30% суммарный энергетический КПД использования природного газа по такой схеме составит всего около 10%.

Поскольку глобальные выбросы CO₂ при этом неизбежно возрастут, вряд ли столь неэффективное использование природных ресурсов можно оправдать ссылкой на локальные экологические проблемы и повышением чистоты воздуха на Ямале и даже снижением выплат по углеродному налогу. Поэтому в отечественной модели развития водородной энергетики, помимо экспортно ориентированного производства водорода, имеет смысл ограничиться его использованием в транспортном секторе крупных мегаполисов для решения действительно серьезных локальных экологических проблем на основе низкотемпературных топливных элементов, имеющих вдвое более высокий по сравнению с газовыми турбинами КПД, достигающий 60%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата обращения 25.01.2021).
2. Шполянская Н.А. Климат и его динамика в плейстоцене–голоцене как основа для возникновения разнообразных рисков при освоении районов криолитозоны // Геориск, 2019. № 1. С. 6–24. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-1-2019/ (дата обращения 25.01.2021).
3. Lindsey R., 2020. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=The%20global%20average%20atmospheric%20carbon,least%20the%20past%20800%2C000%20years> (дата обращения 09.01.2021).
4. Randalls, S., 2010. History of the 2°C Climate Target. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1(4), 598–605. <https://doi.org/10.1002/wcc.62>
5. 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. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4723/pdf> (дата обращения 09.01.2021).
6. BP Energy Outlook 2035: February 2015. URL: <http://www.bp.com/energyoutlook> (дата обращения 09.01.2021).
7. Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года. План мероприятий URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/document-126275%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/document-126275%20(1).pdf) (дата обращения 09.01.2021).
8. IEA. Fuels and technologies, 2021. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies> (дата обращения 10.01.2021).
9. Арутюнов В.С., Голубева И.А., Елисейев О.Л., Жагфаров Ф.Г. Технология переработки углеводородных газов: учеб. для вузов. М.: Юрайт. 2020. 723 с.
10. Макарян И.А., Седов И.В., Никитин А.В., Арутюнов В.С. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья. Научный журнал ПГО. 2020. № 1 (24), С. 50–68.
11. Mitrova, N., Melnikov, Y., Chugunov, D., 2019. The hydrogen economy – a path towards low carbon development. Skolkovo Energy Centre, Moscow School of Management, Skolkovo. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Eng.pdf (дата обращения 09.01.2021).
12. Amin A.M., Croiset E., Epling W., 2011. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen En.* 36, 2904–2935, doi:10.1016/j.ijhydene. 2010.11.035
13. BP Statistical Review of World Energy. 2020. 69th edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.%2013>. (дата обращения 09.01.2021).
14. Кочетков А. Россия будет развивать водородную энергетику, окончательно и бесповоротно... URL: <https://zen.yandex.ru/media/dbk/rossiia-budet-razvivat-vodorodnuiu-energetiku-okonchatelno-i-besporotno-5ff0a0b4fe4e686f6ac32417> (дата обращения 01.02.2021).
15. Арутюнов В.С., Беляев А.А., Арутюнов А.В. и др. Об использовании метан-водородных смесей в двигателях внутреннего сгорания // НефтеГазоХимия, 2019. № 3–4. С. 5–17. DOI: 10.24411/2310-8266-2019-10401. URL: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2019-10401> (дата обращения 02.02.2021).
16. Арутюнов А.В., Беляев А.А., Иновенков И.Н., Арутюнов В.С. Влияние водорода на нормальную скорость горения метан-воздушных смесей при повышенных температурах // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 4. С. 4–10. DOI: 10.30826/CE19120401
17. НОВАТЭК и Nuovo Pignone (входит в состав Baker Hughes) заключили соглашение о стратегическом сотрудничестве в области сокращения выбросов CO₂. URL: <https://globuc.com/ru/news/novatek-i-nuovo-pignone-podpisali-soglashenie/> (дата обращения 02.02.2021).

REFERENCES

1. *The intergovernmental panel on climate change* Available at: <https://www.ipcc.ch/> (accessed 25 January 2021).
2. Shpolyanskaya N.A. Climate and its dynamics in the Pleistocene – Holocene as a basis for the emergence of various risks in the development of permafrost areas. *Georisk*, 2019, no. 1, pp. 6–24 (In Russian). Available at: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-1-2019/ (accessed 25 January 2021).
3. Lindsey R. *Climate change: atmospheric carbon dioxide* Available at: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=The%20global%20average%20atmospheric%20carbon,least%20the%20past%20800%2C000%20years> (accessed 09 January 2021).
4. Randalls, S. History of the 2°C Climate Target. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, no. 1(4), pp. 598–605. Available at: <https://doi.org/10.1002/wcc.62>
5. Arutyunov V.S., Lisichkin G.V. Energy resources of the XXI century: problems and forecasts. Can renewables replace fossil fuels? *Uspexhi khimii*, 2017, vol. 86, no. 8, pp. 777–804 (In Russian). Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4723/pdf> (accessed 09 January 2021).
6. *BP Energy Outlook 2035: February 2015* Available at: <http://www.bp.com/energyoutlook> (accessed 09 January 2021).
7. *Plan meropriyatiy «Razvitiye vodorodnoy energetiki v Rossiyskoy Federatsii do 2024 goda»* (“Development of hydrogen energy in the Russian Federation until 2024” action plan) Available at: [file:///C:/Users/admin/Downloads/document-126275%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/document-126275%20(1).pdf) (accessed 09 January 2021).
8. *IEA. Fuels and technologies, 2021* Available at: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies> (accessed 10 January 2021).
9. Arutyunov V.S., Golubeva I.A., Yeliseyev O.L., Zhagfarov F.G. *Tekhnologiya pererabotki uglevodородnykh gazov* [Hydrocarbon gas processing technology]. Moscow, Yurayt Publ., 2020. 723 p.
10. Makaryan I.A., Sedov I.V., Nikitin A.V., Arutyunov V.S. Modern approaches to the production of hydrogen from hydrocarbon raw materials. *Nauchnyy zhurnal RGO*, 2020, no. 1(24), pp. 50–68 (In Russian).
11. Mitrova, N., Melnikov, Y., Chugunov, D. *The hydrogen economy – a path towards low carbon development*. Skolkovo Energy Centre, Moscow School of Management, Skolkovo Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Eng.pdf (accessed 09 January 2021).
12. Amin A.M., Croiset E., Epling W. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen En.*, 2011, vol. 36, pp. 2904–2935. doi:10.1016/j.ijhydene. 2010.11.035
13. *BP Statistical Review of World Energy. 2020. 69th edition* Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.%2013>. (accessed 09 January 2021).
14. Kochetkov A. *Rossiia budet razvivat' vodorodnuyu energetiku, okonchatel'no i besporotno...* (Russia will develop hydrogen energy, finally and irrevocably ...) Available at: <https://zen.yandex.ru/media/dbk/rossiia-budet-razvivat-vodorodnuiu-energetiku-okonchatelno-i-besporotno-5ff0a0b4fe4e686f6ac32417> (accessed 01 February 2021).
15. Arutyunov V.S., Belyayev A.A., Arutyunov A.V., Troshin K.YA., Tsarenko A.A., Nikitin A.V. On the use of methane-hydrogen mixtures in internal combustion engines. *NefteGazoKhimiya*, 2019, no. 3–4, pp. 5–17 (In Russian). doi: 10.24411/2310-8266-2019-10401. URL: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2019-10401> (accessed 02 February 2021).
16. Arutyunov A.V., Belyayev A.A., Inovenkov I.N., Arutyunov V.S. Effect of hydrogen on the normal combustion rate of methane-air mixtures at elevated temperatures. *Goreniye i vzryv*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 4–10 (In Russian). doi: 10.30826/CE19120401
17. *NOVATEK i Nuovo Pignone (vkhodit v sostav Baker Hughes) zaklyuchili soglasheniye o strategicheskoy sotrudnichestve v oblasti sokrashcheniya vybrosov CO2* (NOVATEK and Nuovo Pignone (part of Baker Hughes) have entered into a strategic cooperation agreement to reduce CO₂ emissions) Available at: <https://globuc.com/ru/news/novatek-i-nuovo-pignone-podpisali-soglashenie/> (accessed 02 February 2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Арутюнов Владимир Сергеевич, д.х.н., проф., завлабораторией окисления углеводородов, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН. Иностраннный член Национальной академии наук Республики Армения.

Стрекова Людмила Николаевна, к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

Vladimir S. Arutyunov, Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of Laboratory of Hydrocarbon Oxidation, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (RAS). Foreign member of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia.

Ludmila N. Strekova, Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof., Leading Researcher, N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (RAS).