

УДК 661.961.6

<https://doi.org/10.24412/2310-8266-2020-3-4-21-23>

«Зеленый» и/или «голубой» водород

М.Х. Сосна, М.В. Масленникова, М.В. Крючков, М.В. Пустовалов

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-1055>,E-mail: dr.michael.sosna@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-2757>,E-mail: marymaslen@yandex.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1312-2886>, E-mail: mail-mk@mail.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0509-5606>,E-mail: sir.mxp@yandex.ru

Резюме: В статье проанализирована роль водородной энергетики и ее состояние на сегодняшний день. Рассматриваются такие понятия как «зеленый», «серый» и «голубой» водород. Приводится сравнение основных методов производства водорода как по энергопотреблению, так и по себестоимости полученного продукта. В заключение предложен вариант получения водорода и сопутствующих продуктов с помощью технологии «Тандем» с учетом жестких требований по выбросу парниковых газов.

Ключевые слова: «зеленый», «голубой», «серый» водород, парниковые газы, альтернативная энергетика, водородная энергетика, производство водорода, конверсия природного газа, «Тандем», синтез-газ.

Для цитирования: Сосна М.Х., Крючков М.В., Масленникова М.В., Пустовалов М.В. «Зеленый» и/или «голубой» водород // НефтеГазоХимия. 2020. № 3-4. С. 21–23.

DOI:10.24412/2310-8266-2020-3-4-21-23

«GREEN» AND/OR «BLUE» HYDROGEN

Michael KH. Sosna, Maria V. Maslennikova, Maxim V. Kryuchkov, Maxim V. Pustovalov

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-1055>,E-mail: dr.michael.sosna@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-2757>,E-mail: marymaslen@yandex.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1312-2886>, E-mail: mail-mk@mail.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0509-5606>,E-mail: sir.mxp@yandex.ru

Abstract: The role of hydrogen energy and its current state is analyzed in the article. Such concepts as «green», «gray» and «blue» hydrogen are considered. The comparison of the main methods of hydrogen production in terms of energy consumption and the cost of the resulting product is given. In conclusion, a variant of producing hydrogen and related products using the «Tandem» technology was proposed taking into account stringent requirements for greenhouse gas emissions.

Keywords: «green», «blue», «gray» hydrogen, greenhouse gases, alternative energy, «hydrogen» energy, hydrogen production, natural gas conversion, «Tandem» process, synthesis gas.

For citation: Sosna M.KH., Kryuchkov M. V., Maslennikova M.V., Pustovalov M.V. «GREEN» AND/OR «BLUE» HYDROGEN. Oil & Gas Chemistry. 2020, no. 3-4, pp. 21–23.

DOI:10.24412/2310-8266-2020-3-4-21-23

Проблемы водородной энергетики нашли свое отражение в научных публикациях в 80-х годах XX века. Повышенный интерес к этой теме был связан с развитием в атомной промышленности высокотемпературных ядерных реакторов с гелиевым теплоносителем и, как следствие, с возможностью использования природного газа в качестве сырья для получения технического водорода, а тепла атомного реактора – в качестве топлива [1, 2].

Вплоть до принятия Киотского (1997) и Парижского (2015) соглашений по климату вопрос выброса парниковых газов – и в первую очередь CO₂ – не был настолько актуальным, как это стало в 20-х годах XXI века.

В конце XX века альтернативные методы производства электроэнергии находились в стадии научно-исследовательских разработок. Однако в связи с необходимостью снижения вредных выбросов в XXI веке началось интенсивное развитие возобновляемых методов производства электроэнергии (ветер, морские приливы, солнечная энергия и т.д.). Уже в 2019 году альтернативные методы производства электроэнергии по объему прироста установленной мощности опередили атомную энергетику [3]. Более острым стал вопрос о выбросах CO₂ в атмосферу из-за предполагаемого потепления климата.

Появилось направление водородной энергетики, предполагающее получение водорода как топлива методом электролиза за счет электрической энергии, производимой из возобновляемых источников энергии. Производимый таким методом водород получил название «зеленый». Германия, согласно Национальной водородной стратегии, планирует производить до 17 млрд м³/год водорода или ~ 2 млн м³/час к 2030 году, что составляет 5 ГВт в энергетическом эквиваленте.

В отличие от получения водорода за счет альтернативной энергетики паровая конверсия метана приводит к эмиссии углекислого газа – 10 кг CO₂/кг H₂. Производимый этим методом водород называют «серым». В связи с обязательствами стран по сокращению выбросов в атмосферу парниковых газов «серый» водород не может быть частью водородной

экономики будущего. Одна из альтернатив – производство «серого» водорода только в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа. Полученный таким образом водород называют «голубым».

Преимуществом в получении «зеленого» водорода является отсутствие расхода первичной энергии. Однако необходимо отметить, что вся производимая в любой стране электроэнергия традиционно включена в общую энергоси-

стему, и как следствие в ней уже нет отличия по ее происхождению.

Кроме того, сравнивая различные методы производства водорода (табл. 1) можно сделать вывод, что электролиз воды является одним из наименее энергетически эффективных методов производства, уступая по эффективности использования первичной энергии из природного газа в 2–2,5 раза. Помимо энергетической эффективности, «зеленый» водород значительно уступает «голубому» и по экономическим показателям.

Снижение цены водорода возможно при строительстве инфраструктуры по доставке и хранению. В США действуют 750 км, а в Европе – 1500 км водородных трубопроводных систем, состоящих из стальных труб диаметром 25–30 см, которые работают при давлении 10–20 бар. Старейший водородный трубопровод действует в районе германского Рура, осуществляя перекачку водорода без аварий более 50 лет. Около 210 км трубопровода соединяют 18 производителей и потребителей водорода. Самый длинный трубопровод длиной 400 км проложен между Францией и Бельгией. После небольших изменений водород может передаваться по существующим газопроводам природного газа [6].

Существенным недостатком производства «голубого» водорода из природного газа является наличие выбросов CO_2 . Учитывая, что в настоящее время основным сырьем для конверсии при производстве «голубого» водорода является природный газ, сравним основные показатели различных методов конверсии с учетом потенциальных выбросов CO_2 .

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод, что наименьший удельный расход природного газа и удельный выход CO_2 достигаются путем использования технологии «Тандем». При этом характерным показателем этого процесса конверсии является величина функционала $f = (\text{H}_2 - \text{CO}_2) / (\text{CO} + \text{CO}_2) = 2$ [7].

Особенность использования процесса «Тандем» для производства водорода без выбросов CO_2 заключается в наличии двух связанных друг с другом установок, одна из которых используется только для получения водорода, а другая – для производства химических продуктов, который требует применять в качестве сырья синтез-газ с соотношением $\text{H}_2/\text{CO} = 1$. В этом случае CO_2 , являющийся вредным выбросом при производстве водорода, используется как полезное сырье для получения синтез-газа, который в дальнейшем поступает на синтез бутиловых спиртов и масляного ангидрида (рис. 1).

Кроме того, диоксид углерода, получаемый в процессе конверсии природного газа, можно использовать для получения сухого льда, карбамида и соды. Кальцинированная сода широко применяется в химической, пищевой, кожевенной, целлюлозно-бумажной, стекольной промышленности и в народном хозяйстве. В настоящее время Россия

Таблица 1
Сравнение методов получения водорода [4, 5]

Способ получения водорода	Потребляемая энергия, кВт/нм ³		Себестоимость водорода, \$/кг	
	теоретическая	фактическая	в настоящее время	прогноз
Конверсия природного газа	0,78	2–2,5	2–5	2–2,5
Газификация угля	1,01	8,6	2–2,5	1,5
Электролиз воды при использовании электричества:	3,54	4,9	–	–
– промышленной сети			6–7	3
– ветрогенераторов	–	–	7–10	3
– солнечной энергии			10–30	3–4
Водород из биомассы (термохимический или биохимический способ)	– *	–	5–7	1–3
Использование атомной энергетики	–	–	2,33	–

* – нет данных

Таблица 2
Сравнение процессов конверсии при получении водорода из природного газа

Процесс	Выход H_2 на 1000 м ³ входящего CH_4	Выход CO_2 на 1000 м ³ входящего CH_4
Высокотемпературная конверсия метана	2584	977
Шахтная конверсия метана	2843	1048
Процесс «Тандем»	3145	1044
Трубчатая паровая конверсия	2214	970
Крекинг метана	2000	–

* углерод (536 кг с 1000 м³ входящего CH_4)

производит более 3,4 млн т соды в год, обеспечивая 95% собственного рынка и экспортируя еще примерно 0,8 млн т за рубеж. Карбамид используется в промышленности (изготовление смол, клеев, лекарственных средств и косметических препаратов) и сельском хозяйстве (удобрение).

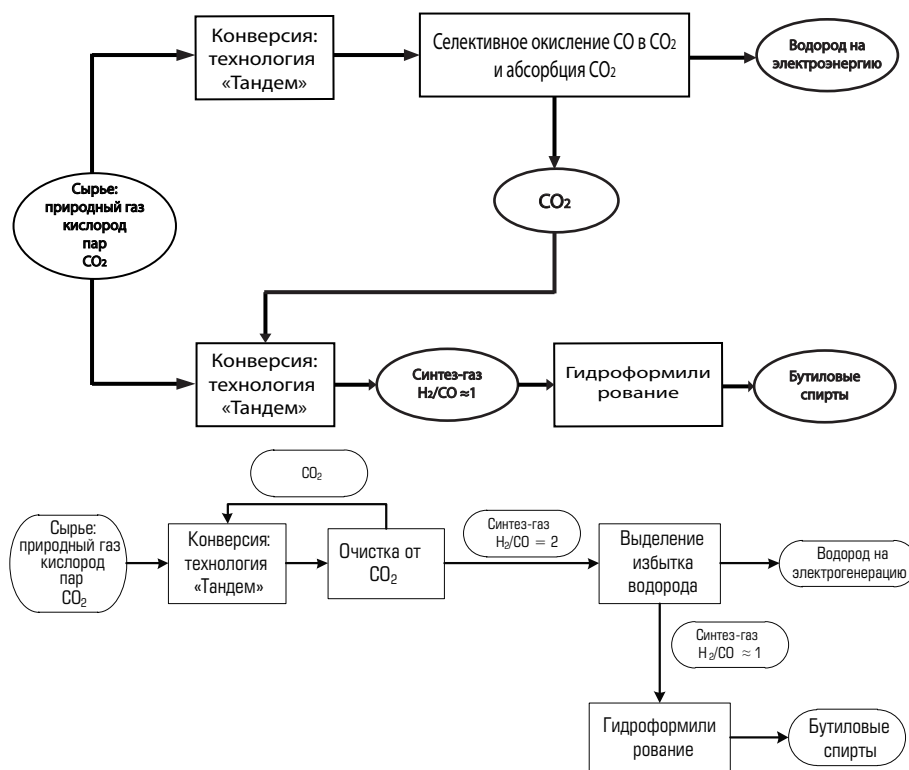
Перспективным источником получения водорода с существенным его содержанием могут быть «продувочные газы» многотоннажных химических производств, в настоящее время используемые как топливо.

К таким производствам относятся синтезы аммиака, метанола, СЖТ и т.д. Концентрация водорода в этих продувочных газах колеблется от 40 до 85%.

Важным фактором является малое количество или полное отсутствие в составе продувочных газов оксидов углерода. Поэтому данный метод получения водорода неизбежно сопряжен с применением способов удаления оксидов углерода, наиболее эффективным из которых является способ их каталитического гидрирования – метанирование. Данный метод позволяет в итоге получить метано-водородную смесь высокой степени чистоты, состоящую, в основном из 85–90% водорода и 15–10% метана. Остаточное содержание оксидов углерода колеблется в пределах 5–20 ppm. Полученная метано-водородная смесь может быть использована как в качестве экологичного вида топлива



Рис. 1

Схема получения H_2 и утилизации CO_2 

для автомобилей, силовых агрегатов, для энерго- и ресурсосберегающей теплогенерации, так и для выделения чистого водорода известными методами.

Выводы

1. Получение «зеленого» водорода является перспективным с точки зрения экологии, однако требует высоких затрат электроэнергии.
2. Среди методов производства водорода наибольший показатель энергетической эффективности и минимальный удельный выброс CO_2 достигается при конверсии природного газа по технологии «Тандем».
3. Для удовлетворения жестких требований по выбросу парниковых газов предлагается направлять образовавшуюся в процессе конверсии углекислоту на получение синтез-газа с соотношением $CO/H_2 = 1/1$ и дальнейшего производства бутиловых спиртов.
4. Выделенный CO_2 можно также использовать для производства таких химических продуктов, как карбамид, сода, сухой лед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосна М.Х., Семенов В.П., Байчток Ю.К., Гольдина О.П. Эксергетическая оценка и расчетная проработка схем получения водорода и технологических газов для синтеза аммиака и метанола с использованием высокотемпературного гелиевого реактора // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. 1981. Вып. 2. с. 77-84.
2. Сосна М.Х., Бондарь Е.И., Чубуков В.К. Разработка и опытная проверка конструктивных узлов трубчатого конвертора углеводородов с гелиевым теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. 1981. Вып. 2. с. 92-95.
3. Статистический обзор мировой энергетики 2020. Изд. 69.
4. «Перепись водорода» // Газпром: корпоратив. журн., 2019. № 9. с. 42.
5. T-Raissi A, Block DL. Hydrogen: automotive fuel of the future // IEEE Power and Energy Society General Meeting, no. 2(6), november-december 2004, pp. 40-45.
6. Радченко Р.В. Водород в энергетике: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 229 с.
7. Сосна М.Х., Шовкопляс Н.Ю. Охлаждаемые газовые реакторы – опыт десятилетий подтверждает качество // Газохимия. 2011. № 3-4 (19-20). С. 38-40.

REFERENCES

1. Sosna M.KH., Semenov V.P., Baychtok YU.K., Gol'dina O.P. Exergetic evaluation and computational study of schemes for producing hydrogen and process gases for the synthesis of ammonia and methanol using a high-temperature helium reactor. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, seriya atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1981, no. 2, pp. 77-84 (In Russian).
2. Sosna M.KH., Bondar' YE.I., Chubukov V.K. Development and experimental testing of structural units of a tubular hydrocarbon converter with a helium coolant. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, seriya atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1981, no. 2, pp. 92-95 (In Russian).
3. *Statisticheskiy obzor mirovoy energetiki 2020*, 69-ye izdaniye [Statistical Review of World Energy 2020, 69th Edition].
4. "Census of Hydrogen". *Gazprom*, 2019, no. 9, pp. 42 (In Russian).
5. T-Raissi A, Block D.L. Hydrogen: automotive fuel of the future. *Proc. of IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2004, pp. 40-45.
6. Radchenko, R.V. *Vodorod v energetike* [Hydrogen in power engineering]. Yekaterinburg, Ural. un-ta Publ., 2014. 229 p.
7. Sosna M.KH., Shovkoplyas N.YU. Cooled gas reactors - the experience of decades confirms the quality. *Gazokhimiya*, 2011, no. 3-4 (19-20), pp. 38-40 (In Russian). *Spravochnik Azotchika* [Handbook of nitrogen worker]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 512 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Сосна Михаил Хаймович, д.т.н., проф. кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Масленникова Мария Витальевна, магистрант кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Крючков Максим Викторович, к.х.н., доцент кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Пустовалов Максим Вячеславович, магистрант кафедры газохимии, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

Michael KH. Sosna, Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Maria V. Maslennikova, Master of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Maxim V. Kryuchkov, Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

Maxim V. Pustovalov, Master of the Department of Gaschemistry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas.