

Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации

В.А. Яковлев, А.И. Таранов, Е.А. Ильин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Аннотация: В статье представлен обзор основных возможностей использования водорода, как перспективы «топлива будущего». Опираясь на основные подходы развития водородной энергетики в зарубежных странах, описываются перспективы её применения в Российской Федерации. Представлен анализ накопленного опыта работающих в сфере водородной энергетики отечественных и зарубежных компаний, рассматривающих внедрение механизмов реализации водородной политики. Представлена оценка возможности российской энергетики по производству и внедрению водорода, актуальности разработок их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: водород, водородная энергетика, перспективы использования водорода, комбинированная энергоустановка, перспективы развития, рейтинг, выбросы, технология производства, низкоуглеродный водород, паровая конверсия.

Вопросы, связанные с возможностью использования водорода в целях перспективы развития энергетики будущего, рассматривались ещё в 70-е годы прошлого века. Это в основном было связано с возникшим в тот момент нефтяным кризисом. Ближе к 90-м годам XX и началу XXI века, интерес к использованию водорода в качестве энергетического ресурса начал аргументироваться процессами изменения климата вследствие человеческой деятельности. Данные вопросы в настоящее время активно поднимаются как за рубежом, так и в России.

Целесообразность использования того или иного энергетического ресурса и принятие решения к разработке эффективных технологий потребления зависит от его конкурентоспособности в сравнении с другими видами энергоресурсов. Основной задачей перехода служит не только снижение техногенного выброса CO₂, но и повышение рентабельности данного выбора, в том числе снижение стоимости и обеспечение доступности энергетического ресурса для потребления.

При рассмотрении перспектив использования водорода в России, следует отметить, что использование водорода в будущем не станет активно

вытеснять иные источники энергии из отраслей использования энергии. На начальном этапе водород станет внедряться в новые технологические решения, постепенно заменяя менее совершенные технологические решения. Расширение сферы использования водорода в сочетании с возможностями применения возобновляемой энергетики в перспективе позволит сократить техногенные выбросы CO₂ в атмосферу, что особенно актуально для крупных городов страны.

В настоящее время существует шесть основных технологий производства водорода:

1. «Зелёный» водород – производится методом электролиза от возобновляемых источников энергии (ВИЭ): малая гидроэнергетика, энергия солнца и ветра;
2. «Серый» водород – производится методом парогазовой конверсии;
3. «Голубой» водород – производится методом парогазовой конверсии с утилизацией углекислого газа;
4. «Оранжевый» водород – производится методом электролиза от атомной энергии;
5. «Бурый» водород – производится методом газификации угля;
6. «Бирюзовый» водород – производится методом пиролиза/крекинга природного газа.

Рассмотрев опыт использования «Серого» водорода в зарубежных государствах, следует отметить, что наилучшие результаты были достигнуты в развитии программ использования газоохлаждаемых реакторов, где теплоносителем являются инертный газ (гелий). Такое техническое решение исключает непредсказуемость поведения теплоносителя в условиях его фазового перехода. Такие реакторы успешно эксплуатируются в Китае, Японии и Южной Корее.

В 2019 году в Австралии начато строительство специального водородного терминала для экспорта сжиженного водорода в Японию, где на Олимпийских играх в Токио он уже весьма активно использовался в автомобильном транспорте, а также для выработки электрической и тепловой энергии [1].

Актуальность расширения сферы водородной энергетики обуславливается тем, что при горении водород образует водяные пары и не образует диоксида углерода, являющегося неконденсирующимся парниковым газом. При полном сгорании водорода выделяется 140 МДж/м^3 тепловой энергии, что, в сравнении с природным газом, выше на 25 %. Выработка водорода является весьма энергозатратным производством, что будет являться выгодным только в случае низкой стоимости энергетического ресурса-преобразователя, энергия которого будет использоваться для производства водорода.

Использование водорода как энергоресурса в будущем является серьёзным шагом в улучшении экологической обстановки на начальном этапе в крупных городах (мегаполисах), а далее, при расширении потребления, и на всей территории страны.

По состоянию на 2021 год развитие водородной энергетики сталкивается с высокой стоимостью производства особенно низкоуглеродного «зеленого» водорода, а также с непростыми технологиями его транспортирования. Однако, несмотря на высокую стоимость производства в сравнении с другими энергетическими ресурсами, по прогнозам Международного энергетического агентства мировое производство и потребление водорода будет расти. Факт и прогноз производства низкоуглеродного водорода в мире представлены на рис. 1.

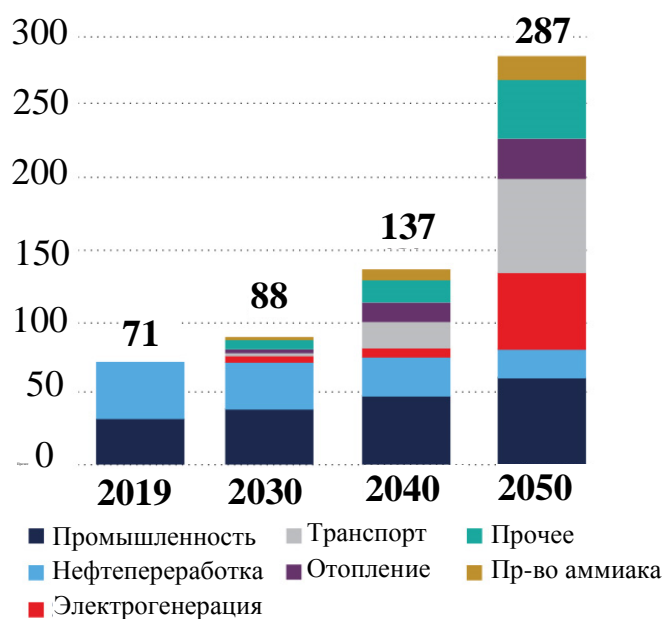


Рис. 1. Производство низкоуглеродного водорода в мире (факт и прогноз) [2]

Опираясь на динамику мирового производства водорода, можно выявить, что в ближайшей перспективе производство больше будет носить локальный характер производства и потребления, нежели глобальный. При успешном развитии технологий производства и транспортировки водорода себестоимость водорода будет снижаться, а география и объем потребления – увеличиваться.

По оценке международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) (2019 год), стоимость «Зеленого» водорода, полученного на базе ветровой энергии, составляет в среднем около 4 \$/кг, солнечной – 7 \$/кг, тогда как производство «Бурого» водорода из угля или «Бирюзового» водорода методом пиролиза природного газа обходится в 1,5–2,5 \$/кг. Даже с учетом улавливания и хранения углерода (CSS), и с развитием технологий эта разница исчезнет не ранее 2030 года, хотя в отдельных случаях сопоставимость издержек может быть достигнута и в настоящее время [3].

Стоит также отметить, что в середине 2021 года ЕС начал закупать уголь для снабжения и поддержания работы существующих электростанций, что повлекло за собой увеличение цены топлива с 70 до 170 \$/т [4]. Росту способствовал низкий запас угля в ЕС.

В докладе Bloomberg «Перспективы водородной экономики» было отмечено, что потребление водорода будет расти, а стоимость производства снижаться, образуя таким образом пропорциональную зависимость, и к 2050 году 24 % мировых потребностей в энергии будет покрывать водородная энергетика, а с учётом развития технологий производства цена снизится до уровня цен на газ актуальных в настоящее время [5].

На территории России при рассмотрении использования водорода в качестве топлива для транспортных средств Центр компетенций НТИ по технологиям новых и мобильных источников энергии отметил, что наиболее приемлемой ценой водорода на российском рынке будет стоимость в 3 \$/кг [6], при этом полноценный рынок водородного топлива в РФ ещё не создан [7].

Однако, в настоящее время ведется работа по развитию водородной энергетики в России. Так, в соответствии с поручением президента РФ «о создании к 2023 году городского автобуса, работающего на водороде» [8], «Камаз» запланировал создать водородный грузовик и автобус [9], а в Минпроторге в 2021 году создан прототип автобуса на водородном топливе, и к концу 2024 года планируется выпуск автобусов в массовое производство [10].

Также к механизмам реализации водородной политики приступили профильные компании, такие, как: «РОСНАНО», «НОВАТЭК», «Н₂ Чистая Энергетика» и т. д. В 2021 году было подписано соглашение о совместном развитии проектов по производству «зеленого» водорода «РОСНАНО» и «Н₂ Чистая Энергетика» в целях его экспорта в зарубежные страны, развития

технологий по использованию водорода в различных отраслях экономики и др [11]. В этом же году было подписано соглашение «Н₂ Чистая Энергетика» с корпорацией развития Камчатского края в рамках разработки проекта строительства Пенжинской приливной электростанции (ПЭС) с целью создания крупнейшего источника для производства водорода в мире с мощностью до 100 ГВт [12].

Для производства водорода и развития водородной энергетической политики в Российской Федерации преимущество получили две основные технологии [13]:

- высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы;
- паровая конверсия метана.

Указанные технологии соответствуют стратегии развития энергетической политики в Российской Федерации особенностью и преимуществом данных технологий является, что Российская Федерация мировой лидер по разработке, добыче, производству сырья, а также производству оборудования лежащего в основе данных технологий [14].

По результатам исследований высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов получены следующие выводы:

- водо-водяной реактор и кипящий водо-водяной реактор, реактор с органическим теплоносителем на данной технологической ступени не в состоянии полностью обеспечить достаточно высокой температурой;
- основополагающей технологией, требующей дополнительных проработок, является охлаждение реакторов щелочными металлами;
- необходима существенная модернизация реакторов с жидкой активной зоной.

Одним из наиболее продуктивных и успешных проектов применения водорода в возобновляемой энергетике реализован в России. Он носит название «Комбинированная энергоустановка» и представлен на рис. 2 [15].

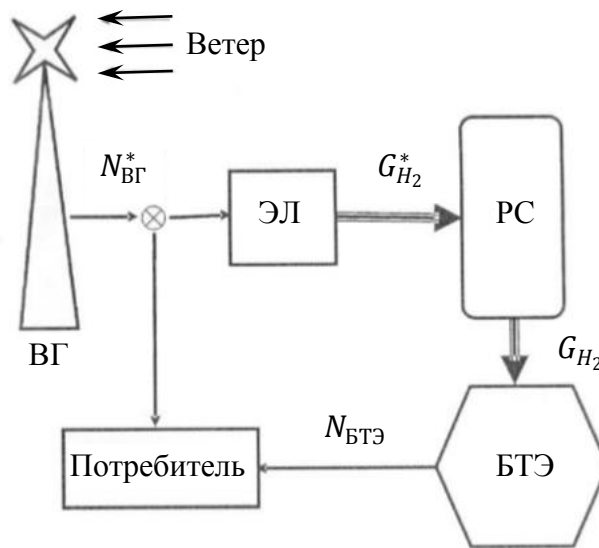


Рис. 2. Структура комбинированной энергоустановки $N_{ВГ}^*$ - электрический ветрогенератор (ВГ) (меняется в зависимости от скорости ветра); $G_{H_2}^*$ - поток водорода от электролизёра (ЭЛ) (меняется в зависимости от мощности ВГ); G_{H_2} - объемный расход водорода из емкости ресивера (РС) (определяется электрической мощностью батареи топливных элементов (БТЭ)); $N_{БТЭ}$ - выходная электрическая мощность БТЭ.

Эксплуатация установки подтвердила её принципиальную работоспособность, а именно:

- постоянная работа БТЭ с генерацией необходимого количества электрической и тепловой энергии для потребителя;
- потребная мощность ВГ и, соответственно, стоимость установки.

Однако главным недостатком был признан:

- необходимость частого включения-выключения БТЭ, что снижает её ресурс.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что экономический эффект от развития накопления электроэнергии в виде водородного топлива определяется в большей степени ожидаемой экспортной выручкой российских компаний от продаж этого топлива за рубежом. Формирование цепочек поставки водородного топлива в страны-импортеры этого нового энергоресурса и системы распределения водородного топлива внутри этих стран является одним из драйверов распространения децентрализованной электроэнергетической системы, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических трансакций между пользователями. (Интернет энергии). Технологии водородной энергетики, использующие водород в качестве топлива, в ближайшей перспективе наиболее массовое распространение получат в частном и общественном транспорте, а также в децентрализованном энергоснабжении частных домохозяйств и коммерческой недвижимости [16 – 17].

Чтобы эффективно противостоять «угрозам» российской энергетике на основе ВИЭ нужно активно стимулировать снижение цен водородного энергоресурса ниже стоимости традиционных энергоресурсов, повышение КПД энергоустановок, разработку недорогих аккумуляторов электрической энергии высокой плотности и создание собственных производств [18].

Литература

1. Энергетическая бюллетень. Водородная энергетика URL: ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/energo_oct_2020.pdf. (Дата обращения: 10.03.2022)
2. Развитие водородной энергетики в России: новая энергополитика URL: delprof.ru/press-center/open-analytics/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-rossii-novaya-energopolitika/. (Дата обращения: 10.03.2022)

3. Barreto L, Makihira A, Riahi K. The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario // Int J Hydrogen Energy, 2003, № 28 URL: doi.org/10.1016/S0360-3199 (02)00074-5.
4. Челябин В.Ф. Водородная энергетика – энергетика будущего // Биржа интеллектуальной собственности, 2010, № 6 (9) URL: elibrary.ru/title_about.asp?id=27953.
5. Abe J, Popoola A, Ajenifuja E, Popoola O. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation // Int J Hydrogen Energy, 2019, №44 URL: doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70143-2.6.
6. Везироглу Т.Н., Шахин С. Энергетика XXI века: водородная энергетическая система. Альтернативная энергетика и экология // ISJAEЕ, 2019, № 4-6 URL: isjaee.com/jour/article/view/1606.
7. Путин поручил к 2023 году сделать городской автобус на водородном топливе URL: tass.ru/ekonomika/10387369. (Дата обращения: 10.03.2022)
8. Воробьев С.А., Разумов П.А. Алгоритм применения водородного топлива на колесных транспортных средствах // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5. С. 168-172.
9. Минпромторг: автобусы на водороде выйдут на улицы России в 2024 году URL: kommersant.ru/doc/4783094. (Дата обращения: 10.03.2022)
10. Водородная энергетика: атомно-водородная реакция URL: zen.yandex.ru/media/dbk/vodorodnaia-energetika-atomnovodorodnaia-tehnologiiia-5eb4655095fafa3409328742. (Дата обращения: 10.03.2022)
11. Бабкин, И.А., Гайдаш М.С., Никитина С.Д., Михайлов Е.Д. Водородная энергетика и экология, получение водорода, стоимость водородного топлива // 3-я Всесоюзная научно-практическая конференция (issue 3). М.: СарГТУ им. Ю.А.Гагарина, 2007. С. 18-22.

12. Яштулов Н.А., Лебедева М.В. Водородная энергетика возобновляемых источников тока // Российский технологический журнал, 2017, № 5 (3) URL: doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-58-73.

13. Анимица И.Е., Кочетова Н.А., Нейман А.Я. Материалы для водородной энергетике. Екатеринбург: Урфу, 2009. 125 с.

14. Григорьева М.В. Развитие водородной энергетике в России и в мире // Машиностроитель. 2012. № 2. С. 19-22.

15. Прохоров В.А. Комбинированный регулятор для систем электроснабжения АТС с комбинированными энергоустановками // Автомобильная промышленность. 2013. № 6. С. 10-12.

16. Родионов В.В., Денисов Н.В., Горшков Н.В. Водородная энергетика на автомобильном транспорте // М-во образования и науки Российской Федерации, Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2011. С. 159.

17. Беяев С.В., Давыдков Г.А. Проблемы и перспективы применения водорода в тепловых двигателях // Инженерный вестник Дона, 2019, №8 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123.

18. Бугаев А.Л., Гуда А.А., Дмитриев В.П., Ломаченко К.А., Панкин И.А. Динамика наноразмерной атомной и электронной структуры материалов водородной энергетике при реалистичных технологических условиях // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (1). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1269.

References

1. Energeticheskaya byullyuten'. Vodorodnaya energetika [Energy Bulletin. Hydrogen energy] URL: ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/energo_oct_2020.pdf. (Date accessed: 10.03.2022)

2. Razvitie vodorodnoj energetiki v Rossii: novaya energopolitika [Development of hydrogen energy in Russia: new energy policy] URL:



delprof.ru/press-center/open-analytics/razvitie-vodorodnoy-energetiki-v-rossii-novaya-energopolitika/. (Date accessed: 10.03.2022)

3. Barreto L, Makihira A, Riahi K. Int J Hydrogen Energy, 2003, № 28 URL: doi.org/10.1016/S0360-3199 (02)00074-5.

4. CHelyaev V.F. Birzha intellektual'noj sobstvennosti, 2010, № 6 (9) URL: elibrary.ru/title_about.asp?id=27953.

5. Abe J, Popoola A, Ajenifuja E, Popoola O. Int J Hydrogen Energy, 2019, №44 URL: doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70143-2.6.

6. Veziroglu T.N., SHahin S. ISJAE, 2019, № 4-6 URL: isjaee.com/jour/article/view/1606.

7. Putin poruchil k 2023 godu sdelat' gorodskoj avtobus na vodorodnom toplive [Putin instructed to make a city bus on hydrogen fuel by 2023] URL: tass.ru/ekonomika/10387369. (Date accessed: 10.03.2022)

8. Vorob'ev S.A., Razumov P.A. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2020. № 5. pp. 168-172.

9. Minpromtorg: avtobusy na vodorode vyjdut na ulicy Rossii v 2024 godu [Ministry of Industry and Trade: hydrogen-powered buses will hit the streets of Russia in 2024] URL: kommersant.ru/doc/4783094. (Date accessed: 10.03.2022)

10. Vodorodnaya energetika: atomno-vodorodnaya reakciya [Hydrogen energy: atomic-hydrogen reaction]. URL:zen.yandex.ru/media/dbk/vodorodnaia-energetika-atomnovodorodnaia-tehnologiiia-5eb4655095fafa3409328742. (Date accessed: 10.03.2022)

11. Babkin, I.A., Gajdash M.S., Nikitina S.D., Mihajlov E.D. 3-ya Vsesoyuznaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. M.: SarGTU im. YU.A. Gagarina, 2007. pp. 18-22.

12. YAshtulov N.A., Lebedeva M.V. Rossijskij tekhnologicheskij zhurnal, 2017, № 5 (3). URL: doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-58-73.



13. Animica I.E., Kochetova N.A., Nejman A.YA. Materialy dlya vodorodnoj energetiki [Materials for hydrogen energy]. Ekaterinburg: Urfu, 2009. 125 p.
14. Grigor'eva M.V. Mashinostroitel'. 2012. № 2. pp. 19-22.
15. Prohorov V.A. Avtomobil'naya promyshlennost'. 2013. № 6. pp. 10-12.
16. Rodionov V.V., Denisov N.V., Gorshkov N.V. Vodorodnaya energetika na avtomobil'nom transporte [Hydrogen energy in road transport]. M-vo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, Saratov: Saratovskij gos. tekhnicheskij un-t 2011. pp. 159.
17. Belyaev S.V., Davydkov G.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123.
18. Bugaev A.L., Guda A.A., Dmitriev V.P., Lomachenko K.A., Pankin I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4 (1). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1269.