

ПЕРСПЕКТИВЫ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ И В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.С. Яруллин¹, И.З. Салихов¹, Д.С. Черезов¹, А.Р. Нурисламова²

¹ОАО «Татнефтехиминвест-холдинг», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

jarullin@tnhi.mi.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Проанализировать применение водородных технологий в энергетической промышленности. Общий объем производства водорода в России составляет около 5 млн тонн при мировом потреблении 72 млн тонн. Однако в случае ужесточения углеродного регулирования импортерами российской продукции производство водорода в России может удвоиться. Дорожная карта «Развитие водородной энергетики в России» предусматривает, что первыми производителями водорода в стране станут «Газпром» и «Росатом» – к 2024 году должны быть запущены пилотные водородные установки, в том числе на атомных электростанциях. МЕТОДЫ. Для реализации имеющихся в стране возможностей и достижения целей, связанных с Энергетической стратегией, ведомства подготовили специальный план мероприятий (дорожную карту) по развитию водородной энергетики в России до 2024 г, который утвержден российским правительством 12 октября 2020 года. Основной целью этого плана была названа организация приоритетных работ по формированию в России высокоэффективной экспортно-ориентированной водородной энергии, которая развивается на основе современных технологий и обеспечивается высококвалифицированным персоналом. РЕЗУЛЬТАТЫ. Одной из основных проблем в водородной энергетике является его транспортировка и безопасное хранение. Сложность этой проблемы определяется тем фактом, что водород в свободном состоянии является одним из самых низкокипящих газов, в жидком и твердом состояниях он легче воды и легче бензина. Молекулы вещества достаточно малы, чтобы проникать в атомную структуру металлического сосуда при температурах выше минус 253°С. Поддерживать такую температуру в течение длительного времени в большом объеме энергозатратно. Другая проблема заключается в охрупчивании и разрушении металлов под действием атомарного водорода. Ему подвергаются высокопрочные стали, а также титановые и никелевые сплавы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Спрос на водород растет при переходе на потребление более чистых и легких нефтяных видов топлива, в то время как нефтяное сырье становится все тяжелее. Но с этим потенциал природного газа, который уже способствует низкоуглеродному развитию экономики, еще не исчерпан. Скептицизм в отношении водородных технологий исчезнет только тогда, когда любой из них получит относительно широкое применение. Однако, без сомнения, водород имеет решающее значение для создания генераторов химического тока. Это имеет очень важное значение для транспорта и распределенной энергетики, и некоторых других областей.

Ключевые слова: водородная энергетика; дорожная карта; водородная стратегия; экономическая эффективность.

Для цитирования: Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 70-83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83.

PROSPECTS OF HYDROGEN TECHNOLOGIES IN POWER AND CHEMICAL INDUSTRIES

RS. Yarullin¹, IZ. Salikhov¹, DS. Cherezov¹, AR. Nurislamova²

¹JSC Tatneftekhiminvest Holding, Kazan, Russia

²Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

jarullin@tnhi.mi.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the use of hydrogen technologies in energy. The total production of hydrogen in Russia is about 5 million tons with a global consumption of 72 million tons. However, in the case of toughening of carbon regulation by importers of Russian products, the production of hydrogen in the Russian Federation may double. The roadmap «Development of hydrogen energy in Russia» stipulates that Gazprom and Rosatom will become the first hydrogen producers in the country - in 2024 they should launch pilot hydrogen plants, including at nuclear power plants. *METHODS.* To realize the potential in the country and achieve the goals laid down in the Energy Strategy, the departments have prepared a special action plan (roadmap) for the development of hydrogen energy in Russia until 2024, which was approved by Russian government on October 12, 2020. The main goal of this plan is called the organization of priority work on the formation in Russia of a high-performance export-oriented hydrogen energy, developing on the basis of modern technologies and provided with highly qualified personnel. *RESULTS.* Transportation and safe storage remains one of the key issues in hydrogen energy. The complexity of this problem is determined by the fact that in the free state hydrogen is one of the low-boiling gases, in liquid and solid state more than an order of magnitude lighter than water and an order of magnitude lighter than gasoline. The molecules of the substance are so small that they can seep through the atomic structure of a metal container at temperatures above minus 253 ° C. Maintaining such a temperature in a large volume for a long time is energy-intensive. Another problem is hydrogen embrittlement and destruction of metals by atomic hydrogen. Even high-strength steels, as well as titanium and nickel alloys, are susceptible to it. *CONCLUSION.* The demand for hydrogen is growing due to the shift to the consumption of cleaner and lighter fuel oils, while the petroleum feedstock is getting heavier. But at the same time, the potential of natural gas has not yet been exhausted, which already now contributes to the low-carbon development of the economy. Skepticism about hydrogen technologies will disappear only when one of them gains relatively widespread use. At the same time, there is no doubt that hydrogen is very relevant for the creation of chemical current generators. This is of great importance for transport, and for distributed energy, and for a number of other areas.

Keywords: hydrogen energy, road map, hydrogen strategy, economic efficiency.

For citation: Yarullin RS, Salikhov IZ, Cherezov DS, Nurislamova AR. Prospects of hydrogen technologies in power and chemical industries. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23 (2): 70-83. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83.

Введение и литературный обзор

Выбросы парниковых газов считаются основной причиной глобального потепления. Главным виновником антропогенных выбросов является энергетика на органическом топливе. Парижское соглашение, подписанное в 2016 году, направленное для противодействия глобальному потеплению, требует выполнения изменения структуры мировой энергетики. Одним из направлений движения энергетики к «зеленой» экономике является переход на новые источники энергии, в первую очередь это относится к использованию водорода [1].

Водород – наиболее экологически чистый энергоноситель из всех существующих химических веществ. При сжигании этого газа не образуется CO₂, единственным продуктом реакции при выработке энергии с использованием водорода является вода, при этом теплота сгорания водорода составляет около 142 МДж/кг, в то время как природного газа – 28-50 МДж/кг [2].

Несмотря на то, что водород является вторичным энергоносителем, то есть стоит дороже, чем природные топлива, его использование в ряде всевозможных случаев экономически выгодно уже в сегодняшнее время. Поэтому работы по водородной энергетике во многих промышленно развитых странах относятся к приоритетным

направлениям развития науки и техники и находят все большую экономическую поддержку, как со стороны государства, так и со стороны частного капитала.

В мире создано уже 23 международных консорциума водородной тематики. В Германии, Нидерландах, Японии возникли «Водородные долины» [3].

Направления разрабатываемых водородных технологий гражданского назначения в разных странах различаются. Это связано как с разной обеспеченностью природными энергоресурсами [4], так и с особенностями технологического развития государств.

Например, в проектах новых водородных технологий, осуществляемых в США, Германии и России, используется опыт ракетной техники, атомной и химической промышленности, специальной металлургии, криогенной и оборонной промышленности, в Японии – опыт высоких технологий электронной, электротехнической, металлургической и металлообрабатывающей промышленности и зарубежный опыт криогенной и авиационно-космической техники.

На данный момент наиболее активно водородные технологии вводятся в Японии, которая еще в 2014 году приняла дорожную карту по построению «общества, базирующегося на водороде». Важным событием, подтвердившим интерес крупного бизнеса к развитию водородных технологий, явилось создание в 2017 г. Водородного Совета (*Hydrogen Council*), участники которого в настоящее время являются руководителями 94 компаний из различных секторов мировой экономики [5].

Крупнейшим мировым рынком производства и использования водорода планирует стать Евросоюз. Для достижения климатической нейтральности к 2050 г. Евросоюз планирует инвестировать до 470 миллиардов евро в сегмент возобновляемого водорода.

Канада, вырабатывая примерно 3 млн тонн водорода в год, уже сегодня входит в десятку крупнейших производителей водорода, обеспечивая растущий спрос на рынке.

США разрабатывают крупнейший в мире водородно-электрический карьерный самосвал.

Автомобильная компания *General Motors* объявила, что к 2035 году она станет углеродно-нейтральной. Это означает не только отказ от автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, но и то, что все заводы автомобильного гиганта будут использовать только возобновляемые источники «зеленой» энергии [6].

Япония подписала соглашение об импорте водорода из России в 2019 году, а также и с ОАО РЖД, ОАО «Трансмашхолдинг» и региональными властями о запуске железнодорожных перевозок на Сахалине с использованием поездов на водородных топливных элементах. Япония запретит продажу машин с двигателями внутреннего сгорания к 2035 году. Фукусима открыла крупнейший в мире завод по производству водорода, который сможет заправлять до 560 автомобилей на топливных элементах в день [6].

Уже сегодня в стране действуют 100 водородных заправочных станций и еще планируют построить 900 к 2030 году. Компания Кавасаки спустила на воду первый в мире корабль для транспортировки жидкого водорода. В сентябре 2020 года японский консорциум *NYK Line* объявил о планах по разработке туристического катера на топливных элементах на 100 пассажиров [6].

Корея. *Hyundai Motor* собирается предоставить водородные электромобили на российский рынок и ведет переговоры с «Росатомом» о создании необходимой инфраструктуры.

Судостроительная компания *Samsung Heavy Industries* и *Bloom Energy* объявили о разработке судов на основе масштабируемых твердых оксидных топливных элементов (SOFC) [6].

Китай запустил свой первый водородный автомобиль *Grove Obsidian* с запасом хода 1 000 км. К 2025 году он планирует увеличить количество таких автомобилей до 50 000, а к 2030 году – до 1 000 000. В перспективе строительство 350 водородных заправочных станций к 2025 году и 1000 заправок к 2030 году [6].

Австралия планирует производить аммиак (перевозка водорода), работающий на солнечной и ветровой энергии мощностью 1,5 ГВт.

Саудовская Аравия. *ACWA Power* совместно с *American Air Products* планирует запустить завод по производству «зеленого» водорода и аммиака мощностью 4 ГВт. ешилов, а также завод по производству зеленого водорода и аммиака [6].

Великобритания собирается наложить запрет на производство автомобилей с двигателями внутреннего сгорания к 2030 году, и планирует полностью перейти на «безуглеродную» энергию к 2050 году. *Shearwater Energy* работает над гибридной

электростанцией в Северном Уэльсе, который будет сочетать ветровую установку, американский модульный ядерный реактор *NuScale* и производство водорода [6].

Норвегия планирует построить завод по производству водорода в Гейрангер-фьорде для заправки паромов и круизных судов. Первый водородный паром планируется использовать в 2021 году [6].

Голландия. Оператор газовых сетей *Gasunie* и порт Гронинген создали консорциум *NorthH2*. В проекте производство «Европейской Водородной долины» с выделенной энергетической мощностью от морских ВЭС до 10 ГВт к 2040 году [6].

Германия презентовала водородную доктрину по переводу на водород к 2050 году всех сфер экономики, которая включает тяжёлую промышленность и нефтехимическое производство. При этом их водородная стратегия фактически нацелена на Россию, как на «соседнее государство», способное решить водородный вопрос Германии [6].

Франция. Крупнейший оператор АЭС, компания *EDF*, объявила о создании дочерней компании *Hynamics*, которая будет заниматься развитием водородной энергетики.

Авиастроительная компания *Airbus* презентовала три концепта водородных самолетов: «классический» с турбореактивным двигателем, турбовинтовой самолет и самолет со встроенным фюзеляжем (летающее крыло) [6].

Италия. Судостроительная компания *Fincantieri SpA* с целью декарбонизации судов обратилась к ЦЦ *PowerCell*, которая протестирует свои топливные элементы MS-30 для выработки энергии на морских судах и яхтах компании [6].

Российская Федерация презентовала собственные разработки водородного транспорта, включая автомобили, автобусы, грузовики КамАЗ, трамваи, самолёты и поезда. Но помимо этого большое количество уникальных разработок и технологий производства и хранения водорода, указывающих на стратегически правильное развитие страны в нужном направлении [6].

Возможности водородных технологий в России связаны с тем, что в стране много сравнительно дешевого углеводородного сырья. В России довольно невысокая стоимость газа, а на его долю приходится 45-70% затрат на производство водорода. Кроме того, в РФ дешевая электроэнергия. Далее все находится в зависимости от взаимодействия науки, бизнеса и государства. Формируя технологические цепочки переработки сырья с получением высокомаржинальных продуктов и обязательной утилизацией CO₂, Россия сможет получать большую прибыль. Так что в России водородные технологии все равно будут экономически выгоднее чем в Европе [7].

Общее производство водорода в России составляет приблизительно 5 млн тонн при мировом потреблении в 72 млн тонн.

Однако, в случае ужесточения углеродного регулирования импортерами российской продукции, производство водорода в РФ может удвоиться. Дорожная карта «Развитие водородной энергетики в России» учитывает, что основными производителями водорода в стране станут «Газпром» и «Росатом» – в 2024 году они должны запустить пилотные водородные установки, в том числе на атомных электростанциях. В то же время «Росатом» собирается ввести в эксплуатацию опытный полигон для железнодорожного транспорта, работающего на водородных топливных элементах. Этот совместный проект намерены осуществить на Сахалине «Российские железные дороги», «Росатом» и «Трансмашинхолдинг». В соответствии с принятой энергостратегией до 2035 года, Россия планирует экспортировать к 2024 году 0,2 млн тонн водорода, а к 2035 году – 2 млн тонн.

Россия также начала заниматься формированием консорциума водородных технологий. Консорциум «Технологическая водородная долина» нацелен на совместные изучение и исследование технологий для получения водорода, его транспортировки, безопасного хранения и использования в энергетике.

Туда входят Томский политехнический университет, Институт катализа СО РАН, Институт проблем химической физики РАН, Институт нефтехимического синтеза РАН, Самарский государственный технический университет, Сахалинский государственный университет, Казанский государственный энергетический университет. Предполагается, что в дальнейшем будут приобщаться и другие высшие учебные заведения [8].

С целью осуществления имеющегося в стране потенциала и достижения заложенных в Энергетической стратегии целей, ведомства подготовили специальный план мероприятий (дорожную карту) по развитию водородной энергетики [9] в Российской Федерации до 2024 года, который 12 октября 2020 г. был утверждён правительством России [9]. Главной целью этого плана названа организация первоочередных работ по созданию в России

высокопроизводительной экспортно ориентированной водородной энергетики, формирующейся на базе современных технологий и обеспеченной высококвалифицированными кадрами. Результат данной цели собираются реализовать путем совершенствования нормативно-правовой базы [9], развития и осуществления мер государственной поддержки проектов по производству, хранению, транспортировке и использованию водорода, укрепления позиций отечественных компаний на рынках сбыта готовой продукции, а также проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по критически важным направлениям развития науки, техники и технологий. В плане мероприятий восемь целевых разделов:

- стратегическое планирование и мониторинг развития водородной энергетики;
- мероприятия по стимулированию и государственной поддержке развития водородной энергетики;
- формирование производственного потенциала;
- реализация приоритетных пилотных проектов в области водородной энергетики;
- научно-техническое развитие и разработка высокотехнологичных решений;
- совершенствование нормативной правовой базы и системы национальной стандартизации;
- развитие кадрового потенциала;
- развитие международного сотрудничества [9].

Первостепенной задачей на 2020–2021 годы в рамках осуществления плана мероприятий является разработка концепции развития водородной энергетики в России, которая должна быть завершена в I квартале 2021 г. В качестве системы управления осуществлением стратегических задач будут созданы межведомственная рабочая группа по развитию водородной энергетики под председательством министра энергетики РФ и проектный офис на базе Российского энергетического агентства, который должен будет обеспечить информационно-аналитическую поддержку реализации плана. Отдельное внимание намечено уделить подготовке высококвалифицированных сотрудников для новой сферы, включая организацию программ стажировок для аспирантов и ученых в мировых центрах компетенций, ведущих исследования в области водородной энергетики [9].

Материалы и методы

Существует много различных способов производства водорода: паровая конверсия метана и природного газа; газификация угля; электролиз воды; пиролиз; частичное окисление; биотехнологии.

В настоящее время водород H_2 производят, как правило (до 95 % от всего объема), путем традиционной конверсии природного газа (метан CH_4 под давлением в присутствии катализатора и температуре в (700-1000) °C смешивают с водяным паром). Себестоимость такой схемы получения водорода H_2 – до 5 \$ USA/кг. Газификация угля является старейшим и дорогостоящим способом получения водорода H_2 , при котором уголь нагревают с водяным паром при температуре (800-1300) °C без доступа воздуха. Электролиз воды, основанный на протекании химической реакции $2H_2O + \text{энергия} \rightarrow 2H_2 + O_2$, характеризуется себестоимостью процесса производства водорода H_2 до 7 \$ USA/кг. Нагрев биомассы (отходов из древесины) без доступа кислорода при температуре (500-800)°C приводит к получению водорода H_2 , окиси углерода CO и метана CH_4 . При всем при этом себестоимость производства водорода H_2 составляет около 7 \$ USA/кг. Прямой термолитиз воды в концентраторах солнечной энергии (при температуре свыше 2500°C вода разлагается на водород H_2 и кислород O_2) обеспечивает получение водорода при его себестоимости более 10 \$ USA/кг [10].

С целью реализации существующего потенциала в стране и достижения целей в Энергетической стратегии ведомства подготовили специальный план мероприятий (дорожная карта) развития водородной энергетики [9] в Российской Федерации до 2024 года, утвержденный Правительством России 12 октября 2020 года [9]. Главной целью этого плана является организация приоритетных работ по созданию в России высокопроизводительной экспортно-ориентированной водородной энергетики, возникающей на основе современных технологий и наличием высококвалифицированного персонала. Результат данной цели собираются реализовать путем улучшения нормативной базы [9], разработки и реализации мер государственной поддержки производства, хранения, транспортировки и использования водорода, укрепление позиций отечественных компаний на рынках сбыта готовой продукции, а также по важным направлениям науки, техники и технологий. В плане мероприятий есть восемь целевых разделов:

- стратегическое планирование и мониторинг развития водородной энергии;

- деятельность по содействию развитию и государственной поддержке водородной энергетики;
- формирование производственного потенциала;-
- реализация приоритетных пилотных проектов в области водородной энергетики;
- научно-техническое развитие и развитие высокотехнологичных решений;
- совершенствование нормативной правовой базы и национальной системы стандартизации;
- развитие потенциала кадров;
- развитие международного сотрудничества [9].

Важнейшая задача на 2020-2021 годы в рамках реализации плана – разработка в первом квартале 2021 года концепции развития водородной энергетики в России. Будет создана межведомственная рабочая группа по реализации стратегических задач по развитию водородной энергетики под председательством Министра энергетики РФ и проектного офиса на базе Российского энергетического агентства, который обеспечит информационную и аналитическую поддержку реализации плана. Кроме того, внимание планируется уделить подготовке высококвалифицированных кадров для новых областей, включая организацию программ стажировок для аспирантов и ученых по всему миру в центрах компетенций, занимающихся исследованиями в области водородной энергетики [9].

Также существует «голубой» водород – производимый из метана, но с обязательным улавливанием и хранением CO_2 [12]. Перспективна и методика пиролиза метана, которая позволяет получать водород и чистый углерод (сажу), который не поступает в атмосферу, но она находится на стадии лабораторных испытаний. Выпуск «голубого» водорода сейчас значительно экономичнее, нежели «зеленого».

S&P Global Platts оценило приведенные затраты на производство «серого» водорода (включая CAPEX и плату за выбросы CO_2) в 1,24 €/кг, «голубого» – в 1,31 €/кг, а «зеленого» (электролиз PEM, включая CAPEX) – в 3,43 €/кг. По прогнозу Aurora Energy Research, затраты на «голубой» и «зеленый» водород сблизятся только к 2045 году (рис. 1).

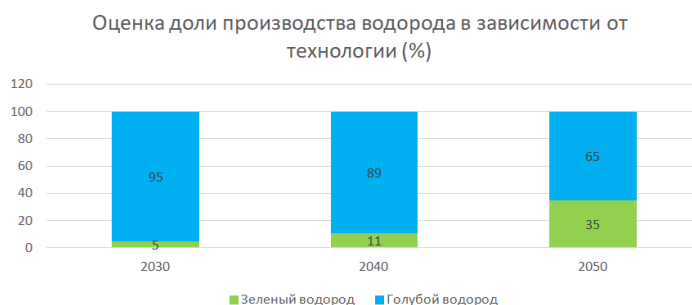


Рис 1. Оценка доли производства водорода в зависимости от технологии (%)
Fig 1. Estimation of the share of hydrogen production depending on the technology (%)

Водородная стратегия ЕС призывает европейские страны установить минимум 6 ГВт электролизеров, производящих до 1 млн тонн возобновляемого «зеленого» водорода, уже к 2024 году (рис. 2) [12]. Долгосрочная цель стратегии – не менее 40 ГВт электролизеров к 2030 году, производящих до 10 млн тонн «зеленого» водорода [12].



Рис. 2. Типы методов производства водорода
Fig.2. Types of hydrogen production methods

Отметим, что в настоящее время в РФ самыми новыми технологиями промышленного производства водорода активно занимается РНЦ «Курчатовский институт».

Половину водорода, применяемого в химической индустрии, получают за счет парового риформинга природного газа, 30 % – способом окисления сырой нефти, 18 % – путем газификации угля, и порядка 4 % – электролизом воды. Проводятся исследования по высокотемпературному паровому электролизу, солнечному термохимическому расщеплению воды (искусственный фотосинтез) и по производству водорода из биологического сырья.

Перспективным методом производства «кэптивного» водорода с низким углеводородным следом является пиролиз метана. Для пиролитического разложения метана могут быть применены различные технологические процессы: разложение метана с помощью высокотемпературной (горячей) и низкотемпературной (холодной) плазмы, пропускание метана через слой нагретого до высокой температуры жидкого металла (Cu, Pb, Sn, сплав Ni, Bi), газовые реакторы с неподвижным или псевдоожиженным слоем. Несмотря на то, что эти процессы достаточно хорошо исследованы, в практике осуществлено лишь несколько проектов, направленных в основном на получение высокочистого твердого углерода. В настоящее время в Германии компания *BASF* с привлечением нескольких университетов и научных организаций создает пилотную установку с целью производства водорода на основе разложения метана в реакторе с жидким металлом.

Ряд авторов рассматривают пиролиз метана как настоящую альтернативу получению водорода способом электролиза воды, в первую очередь в странах, обладающих внушительными ресурсами природного газа (собственного или экспортируемого), к примеру, в России и ряде стран ЕС. Прогнозируют, что в ЕС уже к 2030 г. количество водорода, получаемого пиролизом метана, может превысить производство водорода паровой конверсией метана. Но необходимо принимать во внимание то, что при масштабном осуществлении проектов пиролиза метана появляется вопрос утилизации большого количества образующегося твердого углерода.

При общероссийском производстве водорода примерно 5 млн тонн, Республика Татарстан производит для нужд химической индустрии около 225 тыс. тонн. Крупными предприятиями – производителями водорода являются АО «Танеко», АО «Таиф НК».

АО «Танеко» для получения водорода из природного газа использует технологию с предварительной гидроочисткой исходного сырья. Расчетная мощность по продуктовому водороду чистотой 99,9 % об. составляет 30000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ или 22 тыс. тонн в год. Лицензиар технологии – *HALDOR TOPSOE*.

В составе комплекса гидрокрекинга АО «Танеко» имеется установка производства водорода проектной мощностью по продуктовому водороду 135000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ или 99,77 тыс. тонн в год.

На апрель 2021 года запланирован пуск еще одной установки производства водорода мощностью 100 тыс. тонн в год. Водород, полученный на этой установке, будет использоваться на технологические нужды предприятия – для обеспечения установок гидроочистки.

На комплексе гидроочистки средних дистиллятов АО «Таиф НК» водород производят методом паровой каталитической конверсии природных газов. Проект установки производительностью 16,2 тыс. тонн год по продукту разработан фирмой «*Howe-Baker*» по заказу фирмы «*ABB Lummus Global*». Установка введена в эксплуатацию в 2002 году, но в результате проведенной в 2013 году реконструкции, ее мощность увеличена до 19,2 тыс. тонн водорода в год.

Производство рентабельного водорода с использованием зеленых технологий является серьезным препятствием для развития системы.

Даже при том, что сам по себе водород не отвечает фундаментальным требованиям для мгновенного балансирования энергетической системы, он может обеспечить альтернативный вариант на пути к более глубокой декарбонизации за счет водородных хранилищ. Многочисленные способы производства, распределения и потребления водорода представляют собой сложный компромисс между стоимостью, выбросами, масштабируемостью и требованиями к чистоте водорода, но также предоставляют множество вариантов, которые можно использовать в зависимости от конкретных обстоятельств (рис 3).



Рис. 3. Стоимость производства водорода из природного газа с учетом затрат на улавливание, хранение и утилизацию углекислого газа (CCUS), долл./кг [9]

Fig.3. On natural gas, taking into account the cost of carbon dioxide capture, storage and utilization (CUS), USD/kg [9]

Использование водородных технологий в химической промышленности. Водород широко применяется не только в энергетике, но и в химической индустрии (рис.4).

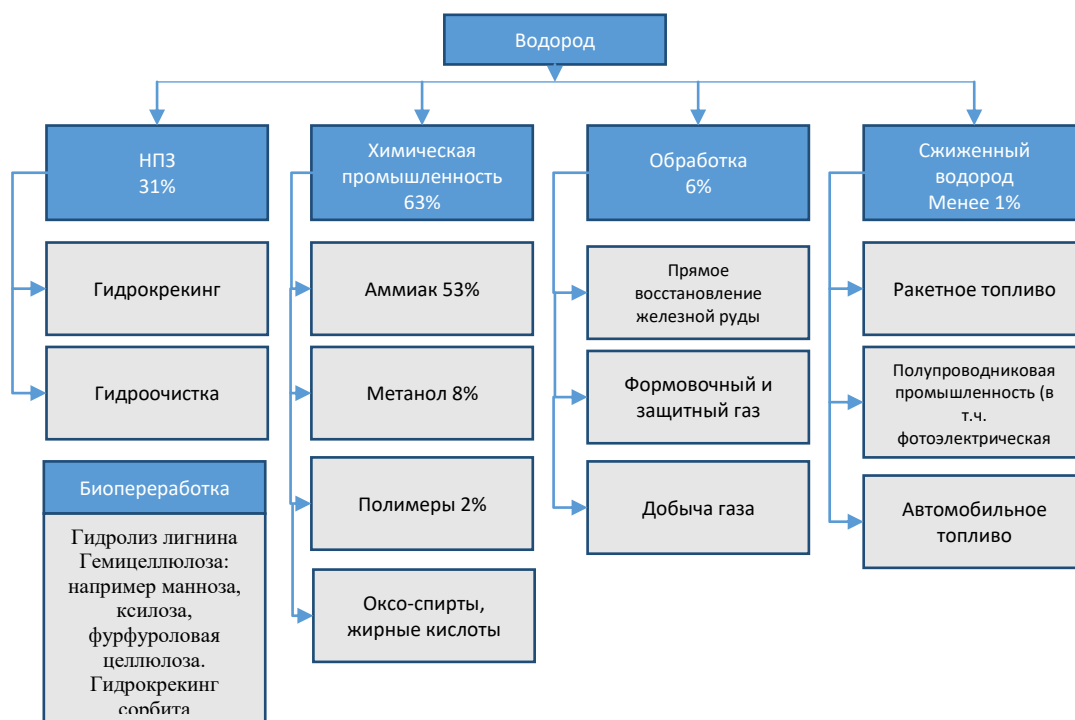


Рис. 4. Использование водородных технологий

Fig. 4. Use of hydrogen technologies

В цветной металлургии восстановлением водородом получают особо чистые металлы из оксидов. Кислородно-водородные горелки используют для сварки и резки металлов. Смесь монооксида углерода и водорода (так называемый синтез-газ) используется при синтезе аммиака, метилового спирта, получении парафинов и олефинов (синтез Фишера-Тропша), оксосинтезе. В пищевой промышленности водород используют для превращения жидких жиров в твердые, их гидрогенизации.

Водород используется для производства светлых нефтепродуктов, снижения токсичности, удаления серы и других загрязняющих примесей. По мере истощения запасов легкой нефти с высоким водород-углеродным коэффициентом и увеличения добычи имеющейся в больших количествах тяжелой нефти возрастает спрос на водород.

В химической промышленности России высокая доля водорода используется при производстве аммиака и метанола. В 2018 г. в России было произведено 17,8 млн т аммиака, из которых 70% в виде первичного продукта и аммиачных удобрений экспортировали в страны ЕС, Турцию, Марокко, Бразилию, США. В настоящее время на долю России приходится 16% мирового рынка аммиака и от 13 до 39% мирового рынка различных видов азотных удобрений. В ближайшие годы в России планируют реализовать 9 крупных проектов по строительству предприятий по производству аммиака и карбамида.

Прогнозируют, что к 2025–2030 гг. производство аммиака в стране достигнет 23,7 млн т. Соответственно возрастет и производство водорода, используемого на эти цели. К 2030 г. оно может составить около 4 млн т в год. Менее однозначен прогноз по развитию производства метанола. В 2017 г. в РФ было произведено 4,1 млн т метанола, из которых лишь около 60% (2,4 млн т) используется для внутреннего потребления. Прогнозируют, что внутренний спрос на метанол будет расти не более чем на 2% в год и достигнет к 2030 г. лишь 3,1 млн т. Однако, мировое потребление метанола растет быстрыми темпами. В связи с этим, к 2030 г. в РФ планируют построить 14 крупных заводов, в совокупности производящих 19 млн т метанола.

Рост потребления водорода в нефтепереработке будет связан с преодолением отставания от мировых лидеров (США, страны ЕС) по глубине переработки нефти и выходу светлых нефтепродуктов из-за недостаточного развития вторичных процессов переработки углеводородного сырья, прежде всего гидрокрекинга. Как отмечают авторы работы, «в развитии процессов, углубляющих переработку нефти, Россия отстает от среднемирового и европейского уровня в 2 раза, от уровня США – более чем в 3 раза, а в развитии важнейших из этих процессов, каталитического крекинга и гидрокрекинга в 4–7 раз. На ликвидацию этого отставания направлена программа модернизации нефтеперерабатывающей промышленности России. Уже на первом этапе реализации программы были достигнуты впечатляющие результаты. За период с 2010 по 2017 г., мощность установок по гидроочистке дизельного топлива и бензина каталитического крекинга увеличилась на 20%, по гидрокрекингу – почти на 70%. Это привело к увеличению глубины переработки нефти с 71,4 до 83,4% и повышению выхода светлых нефтепродуктов с 56 до 62,2%. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г. предусматривает дальнейшее увеличение выхода светлых нефтепродуктов до 70%. Для этого планируется к 2035 г. ввести в эксплуатацию 50 новых установок вторичной переработки нефти. Оценка роста потребности в водороде нефтеперерабатывающей промышленности может быть произведена на основе соотношения текущего уровня потребления водорода и объема переработки нефти. В 2013 г. на начальном этапе модернизации нефтеперерабатывающей промышленности РФ при объеме переработки 274,5 млн т для реализации вторичных процессов было израсходовано около 1 млн т водорода, что составило 3,6 кг H_2 /т нефти. Если принять, что удельный расход водорода в процессах нефтепереработки повышается с увеличением выхода светлых нефтепродуктов, то можно ожидать, что к 2030–2035 гг. удельный расход водорода достигнет 4,6 кг H_2 /т нефти, что сопоставимо со средним значением (5,3 кг H_2 /т нефти) в мировой нефтеперерабатывающей промышленности в 2019 г. Поэтому при планируемом уровне нефтепереработки в стране в 2030–2035 гг. годовое производство водорода на предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности может достигнуть 1,4 млн т. (рис.5).

Практически на всех современных НПЗ есть установки производства водорода (УПВ), которые предназначены для обеспечения техническим водородом установок изомеризации, гидроочистки, гидрокрекинга, каталитического риформинга. На российских НПЗ наиболее распространенным методом получения водорода является паровая конверсия углеводородов (природного газа, СУГ, нефти). Продуктами являются чистый водород с концентрацией >99% об., а также отдувочный газ, который чаще всего используется в качестве топлива. Наиболее часто используемыми в промышленности катализаторами для процесса паровой конверсии являются катализаторы на основе никеля, однако в ряде специфических процессов допускается использование благородных металлов платиновой группы.

Что касается долгосрочной стратегии перехода на водородные технологии, то темпы производства водорода для нужд химической промышленности будут складываться из снижения потребления в секторе автомобильного топлива, но на остальные процессы гидрогенизации в химической промышленности это не повлияет, т.к. установки производства водорода предназначены для обеспечения таких процессов как: изомеризация, гидроочистка, гидрокрекинг, каталитический риформинг, и не все эти процессы должны быть связаны с получением топлива, могут быть и другие, более маржинальные направления переработки углеводородного сырья.

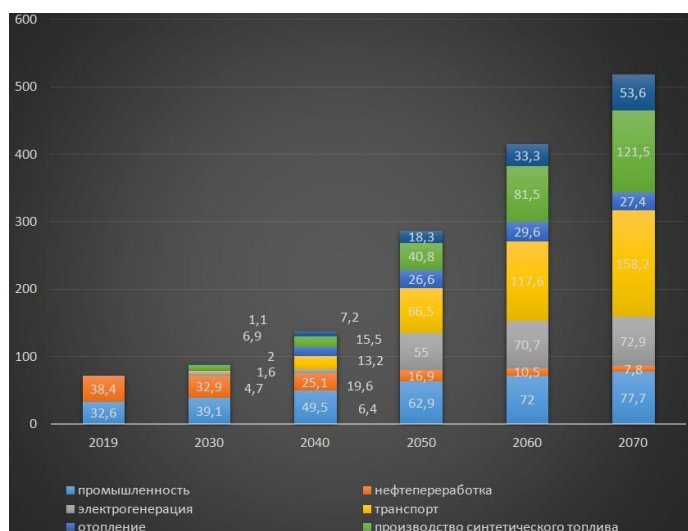


Рис. 5. Прогноз потребления водорода по сегментам (млн. метрических тонн в год)

Figure 5. Forecast of hydrogen consumption by segment (million metric tons per year)

Результаты

Одной из наиболее важных проблем в водородной энергетике является его транспортировка и безопасное хранение. Сложность этой задачи определяется тем, что водород в свободном состоянии является одним из самых низкокипящих газов, в жидком и твердом состояниях он легче воды и легче бензина. Молекулы вещества достаточно малы, что могут проникать в атомную структуру металлического контейнера при температуре выше минус 253°C.

Такую температуру поддерживать довольно энергозатратно. Еще одна проблема – водородное охрупчивание и распад металлов под воздействием атомарного водорода. Он подвергает воздействию высокопрочные стали, а также титановые и никелевые сплавы [6].

Сегодня экономически невыгодно хранить большие объемы водорода [6]. Водород обычно производится в областях прямого потребления («кэптивный» водород - *captive hydrogen*) (в основном на объектах газовой химии, Металлургия и нефтепереработка). В России, как и в мире в целом, более 95 % водорода – это «кэптивный» водород. Его транспортировка сведена к минимуму.

Самый известный метод хранения водорода - хранить его в сжатом состоянии.

По своим массогабаритным характеристикам и по характеристикам взрывопожаробезопасности он не полностью удовлетворяет условиям использования в наземном транспорте и в морских условиях, особенно на подводных кораблях и аппаратах.

Взрывопожарным является вариант хранения водорода в криогенной форме. При этом параметры взрывопожаробезопасности в значительной степени определяются объемом накопленного газа [14].

Таблица 1

Способы хранения водорода

Способ хранения	Удельное потребление энергии кВт*ч/кг H ₂	Удельный объем хранения дм ³ /кг H ₂	Удельная масса хранения, кг/кг H ₂
Газообразный водород при низком давлении	0,39	1020	-
Газообразный водород при высоком давлении	0,93	81	16,0
Водород в гидридах	1,16	22	76,9
Жидкий водород	10,50	14	7,0
Криогенная адсорбция	3,20	59	20,0

С точки зрения безопасности наиболее предпочтительный способ хранения водорода для транспортных средств является связанное хранение (Табл. 1).

Возможность хранения и получения водорода в химически связанном состоянии определяется следующими характеристиками этого метода:

– декомпозиция водорода в составе гидридов, используемых в качестве промежуточного продукта при транспортировке и хранении;

- производство водорода вместо прямого потребления, особенно на транспортном средстве разрушает гидриды одним из известных путей. Этот процесс может быть включен в рабочий цикл установки, что устраняет необходимость предварительного накопления водорода перед использованием;

- применением принципа аккумулятора с возможностью многократной зарядки и разрядки без замены сорбентов;

- относительно низкое давление и температура в процессе эксплуатации. Основными недостатками этого метода являются большой удельный вес системы хранения и относительно высокая стоимость.

В результате исследования выявлено, что одно из перспективных систем хранения и транспортировки водорода – это разработка института *Fraunhofer* на основе гидрида магния.

Исследователи *Fraunhofer* представили «*Powerpaste*» — пасту на основе магния, которая хранит водородную энергию плотностью в 10 раз больше, чем литиевая батарея. Водородные топливные элементы позволяют автомобилям путешествовать больше, чем бензиновые автомобили, и заправляться всего за несколько минут.

Обычно автомобили с водородными топливными элементами транспортируют водородное топливо в газообразном состоянии, и хранится оно в резервуарах при давлении около 700 бар. Эти резервуары довольно габаритные и тяжелые, что переопределяет одно из основных преимуществ водорода по сравнению с литиевыми батареями — более высокую плотность энергии. Высокое давление также делает водород непрактичным вариантом для двухколесных транспортных средств, таких как мотоциклы или скутеры.

Также следует обратить внимание, что команда из Института производственных технологий и передовых материалов им. Фраунгофера *IFAM* (Дрезден) предложила новый способ хранения и переноса водородной энергии на основе гидрида магния, которая сохраняет водород и позволяет выпускать его когда это необходимо, даже при атмосферном давлении.

Для производства пасты магний смешивают с водородом при температуре около 350 °С и давлении, в пять-шесть раз выше атмосферного, в результате чего образуется гидрид магния. Затем в смесь добавляют сложный эфир и соли металлов, чтобы получить вязкую серую массу, которая может быть загружена в картриджи.

Powerpaste полностью стабильна при температурах до 250°C и несет в 10 раз больше энергии, чем литиевые батареи, и значительно больше, чем 700 бар водородного резервуара, если сравнивать по весу. Исследователи утверждают, что автомобили, работающие на *Powerpaste* могут полагаться на запас хода, который «сопоставим с бензином или превышает его» [15].

Для высвобождения энергии, плунжерный механизм выдавливает пасту в камеру, где она вступает в реакцию с водой выделяя водород с динамически контролируемой скоростью [15]. Водород питает топливный элемент для выработки электроэнергии или другое устройство. Частично, впечатляющая плотность энергии пасты обусловлена тем фактом, что половина выделяемого водорода поступает из воды, с которой он вступает в реакцию.

Например, для заправки скутера *Powerpaste* нужно вынуть картридж и заменить его на заправленный [15]. Таким образом, эта технология может стать легко заменяемым вариантом использования чистой энергии в различных устройствах [15]. Предполагается адаптировать технологию для больших дронов, тем самым увеличив время и дальность их полета, а также для портативных электроприборов [15].

Некоторым устройствам может быть удобнее просто закачать материал в резервуар, а не пользоваться картриджами [15]. К таким можно отнести автомобили или грузовики на топливных элементах, самолеты [15], а также более крупные виды техники. Предполагается, что пасту можно подавать через стандартные линии розлива с относительно недорогим оборудованием [15].

Схожая технология получения водорода на основе гидрида магния, как у немецких коллег, разработана и в России. Российской компанией - резидентом Ульяновского центра трансфера технологий «ХитЛаб» разработана технология и оборудование для производства MgH_2 - твердого и безопасного источника водорода. Технология находится в высокой степени готовности.

Российскими учёными также разработаны результативные способы хранения водорода [6] - «интерметаллидное». За основу взята неповторимая способность твердых обратимо гидрирующихся металлов и сплавов на основе $LaNi_5$ удерживать водород [6] в

своей структуре, при этом плотность упаковки его атомов выше плотности атомов в жидком водороде. Этот способ именуется «интерметаллидное» хранение водорода. Уже изготовлены и испытаны интерметаллидные накопители (ИМН), доказавшие свою эффективность и надёжность [6]. Для извлечения водорода из такого компактного хранилища потребителю потребуется просто его нагреть [6].

Обсуждение

Спрос на водород растёт при переходе на потребление более чистых и легких нефтяных видов топлива, в то время как нефтяное сырьё становится все тяжелее.

Водород является вторичным энергоносителем и требует дополнительной энергии для производства.

В соответствии с Парижским соглашением об изменении климата, ратифицированным Россией в сентябре 2019 года, наша страна должна сократить выбросы парниковых газов до 30% от уровня 1990 года к 2030 году.

Но с этим потенциал природного газа, который уже способствует низкоуглеродному развитию экономики, ещё не исчерпан. Скептицизм в отношении водородных технологий исчезнет только при относительно распространённом использовании любого из них [16]. Однако, без сомнения, водород очень важен для создания химических генераторов тока. Это очень важно для транспорта и распределённой энергии и некоторых других областей.

Водород привлекает высокой энергоёмкостью – в 3-4 раза больше, чем у природного газа. Европа делает все возможное, чтобы отказаться от углеводородного сырья, но перестройка существующей энергетической инфраструктуры займёт десятилетия.

По оценкам Международного энергетического агентства, даже к 2070 году на долю энергетики, будет приходиться всего 14 процентов от общего потребления водорода в мире.

Если мы не изменим нашу энергетику, мы не войдем в водородную экономику Европы. Необходимо иметь в виду, что, поставляя меньше газа и нефти, мы можем заменить их поставкой водорода или аммиака.

Литература.

1. Смоленцев А.А., Щербаков А.Н. Создание новейших водородных технологий для наземных транспортных средств: современное состояние и прогноз на будущее // Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 4 (69). С. 39-41.
2. Balzamor D.S., Akhmetova I.G., Balzamova E.Yu., et al. Options for organizing own sources of energy supply at the facilities of generating companies based on steam screw machines // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. pp. 55018.
3. Корзун В.А. "Глобальное потепление" - реальность или политизированный миф? (Перспективы создания в России "зеленой экономики") М.: Институт мировой экономики и международных отношений РАН, 2009. 191 с.
4. Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р. Актуальные вопросы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №11-12. С. 108-113.
5. Белов В.Б. Европейский альянс чистого водорода // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. 2020. № 5(17). С. 52-59.
6. Энергетика 2.0 и «Водородная долина России» - URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.html>. Дата обращения 18.03.2020.
7. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Ахметов Т.Р. Проблемы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Энергетика Татарстана. 2016. № 1 (41). С. 52-56.
8. Мастепанов А.М., Хирофуми А. Основные проекты водородной стратегии Японии и их потенциальное влияние на перспективы развития нефтегазовой отрасли России // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 12(192). С. 45-54.
9. Мастепанов А.М. Водородная энергетика России: состояние и перспективы // Энергетическая политика. 2020. № 12 (154). С. 54-65.
10. Беляев С.В., Давыдов Г.А., Селиверстов А.А., et al. Водород как топливо // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2015. № 21. С. 79-82.

11. Parkinson B., Balcombe P., Speirs J. F., et al. Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes // *Energy Environ. Sci.* 2019. V.12. P.19–40. <https://doi.org/10.1039/c8ee02079e>.
12. Водород у ворот. Доступно по: URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4521376?query=водород%20у%20ворот>. Ссылка активна на: 10.03.2021.
13. Солодова Н.Л., Черкасова Е.И., Салахов И.И., Тутубалина В.П. Водород - энергоноситель и реагент. Технологии его получения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. №11-12. С. 39-50.
14. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 4. С. 33-40.
15. Новое водородное топливо в виде пасты: дешево и удобно. Доступно по URL: <https://www.popmech.ru/technologies/669643-sozdano-universalnoe-vodorodnoe-toplivo-v-vide-pasty-deshevo-i-udobno/>. Ссылка активна на: 18.03.2021.
16. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Доступно по: URL: <http://static.government.ru/media/files/7b9bstNfV640nCkAzCRJ9N8k7uhW8mY.pdf>. Ссылка активна на: 10.03.2021.

Авторы публикации

Яруллин Рафинат Саматович – д-р хим. наук, генеральный директор ОАО «Татнефтехиминвест-холдинг».

Салихов Ильфат Зилбирович – заместитель генерального директора ОАО «Татнефтехиминвест-холдинг».

Черезов Денис Сергеевич – главный специалист отдела маркетинга ОАО «Татнефтехиминвест-холдинг».

Нурисламова Аделя Раилевна – магистрант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Smolentsev AA, Shcherbakov AN. Creation of the latest hydrogen technologies for land vehicles: current state and forecast for the future. *Journal of automotive engineers*. 2011;4(69):39-41.
2. Balzamov DS, Akhmetova IG, Balzamova EYu, Et al. Options for organizing own sources of energy supply at the facilities of generating companies based on steam screw machines. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019"*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. pp. 55018. doi: 10.1088 / 1742-6596 / 1399/5/055018
3. Korzun VA. «Global Warming» Reality or Politicized Myth? (Prospects for the creation of a "green economy" in Russia) М.: Institute of World Economy and International Relations of the Russian Academy of Sciences, 2009.
4. Akhmetova IG, Mukhametova LR. Topical issues of improving the energy efficiency of heat supply organizations. *Energy problems*. 2015;11-12:108-113.
5. Belov VB. European Alliance of Pure Hydrogen. *Scientific Analytical Bulletin of the Institute of Europe RAS*. 202;5(17);52-59.
6. *Energy 2.0 and «Hydrogen Valley of Russia»* - URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.html>. Accessed: 18.03.2021.
7. Mukhametova LR, Akhmetova IG, Akhmetov TR. Problems of increasing the energy efficiency of heat supply organizations. *Energetika Tatarstana*. 2016;1(41):52-56.
8. Mastepanov AM, Hirofumi A. The main projects of the hydrogen strategy of Japan and their potential impact on the prospects for the development of the oil and gas industry in Russia. *Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex*. 2020;12(192);45-54.

9. Mastepanov AM. Hydrogen energy in Russia: state and prospects. *Energy policy*. 2020;12(154):54-65.
10. Belyaev SV, Davydkov GA, Seliverstov AA, et al. Hydrogen as fuel. *New materials and technologies in mechanical engineering*. 2015;21:79-82.
11. Parkinson B, Balcombe P, Speirs JF, et al. Levelized cost of CO2 mitigation from hydrogen production routes. *Energy Environ. Sci.* 2019;12:19-40. <https://doi.org/10.1039/c8ee02079e>
12. *Hydrogen at the gates*. Available at: URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4521376?query=hydrogen%20y%20vorot>. Accessed: 10.03.2021.
13. Solodova NL, Cherkasova EI., Salakhov II., et al. Hydrogen is an energy carrier and a reagent. Technologies for its production. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2017;19(11-12):39-50.
14. Mukhametova LR, Akhmetova IG, Strielkovski V. Innovations in the field of energy storage. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;21(4):33-40.
15. *New hydrogen fuel in the form of a paste: cheap and convenient*. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/669643-sozdano-universalnoe-vodorodnoe-toplivo-v-vide-pasty-deshevo-i-udobno/>. Accessed: 18.03.2021.
16. *Action plan «Development of hydrogen energy in the Russian Federation until 2024»*. URL: <http://static.government.ru/media/files/7b9bstNfV640nCkkAzCRJ9N8k7uhW8mY.pdf>. Accessed: 10.03.2021.

Authors of the publication

Rafinat S. Yarullin – JSC Tatneftekhiminvest-holding.

Ilfat Z. Salikhov – JSC Tatneftekhiminvest-holding.

Denis S. Cherezov – JSC Tatneftekhiminvest-holding.

Adelya R. Nurislamova – Kazan state power engineering university.

Получено

09 марта 2021г.

Отредактировано

30 марта 2021г.

Принято

05 апреля 2021г.