

УДК 544.6.076, 620.92

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ И СССР

© 2020 г. В. Н. Фатеев^{1,*}, С. А. Григорьев¹, Е. А. Серегина¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: Fateev_vn@nrcki.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020 г.

После доработки 15.06.2020 г.

Принята к публикации 21.06.2020 г.

В обзоре рассмотрена история развития водородной энергетики в СССР и России, а также ее современное состояние. Обобщены основные отечественные достижения в области производства, хранения и транспортировки водорода, а также его применения в энергетике и других областях. Основное внимание уделено аспектам применения наноматериалов и нанотехнологий.

DOI: 10.1134/S1992722320030048

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Основные области применения водорода
2. Развитие водородной энергетики в СССР и России

Заключение

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение высоких темпов развития современной энергетики и транспорта может привести человечество к крупномасштабному экологическому кризису. Современные тенденции в области энергетики направлены на замещение традиционных видов топлива более экологичными и возобновляемыми. Одним из перспективных энергоносителей является водород. Переход к водородной энергетике и экономике – один из наиболее перспективных путей для сохранения экосистемы планеты Земля, пригодной для жизни.

В 70-х годах прошлого века мировой нефтяной кризис дал мощный импульс развитию научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области поиска альтернативных топлив, прежде всего для транспортных двигателей. Одним из таких экологически чистых топлив, которое может применяться в качестве горючего благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, является водород [1, 2].

Возможности для промышленного использования водорода известны давно, и интерес к ним периодически возрастал и в прошлом: в 1970-е годы – в связи с нефтяными кризисами, в 1990-е и 2000-е годы – в связи с ростом проблем с изменением климата, а затем и усилением климатической политики. Это стимулировало соответству-

ющие исследования и разработки (с заметным акцентом на транспорт), но масштабного практического внедрения за пределами ряда промышленных секторов пока не последовало. Теперь, кажется, ситуация может измениться – все больше стран в связи с переходом на “зеленую энергетику” начинают поддерживать водород на государственном уровне [3]. Так, в Европе, США, Японии, Китае и т.д. существуют масштабные программы государственного уровня [4, 5].

Россия, обладая значительным потенциалом в области водородной энергетики, пока к ним не относилась, хотя отдельные весьма успешные проекты были реализованы. Однако в настоящее время наблюдается резкое изменение ситуации. Президент РФ В.В. Путин сказал, что необходимо концентрировать ресурсы на развитии возобновляемых источников энергии (ВИЭ), водородных источников и других чистых источников, которые “сохранят природу на многие тысячелетия вперед для будущих поколений” [6]. Минэнерго РФ по поручению правительства подготовило Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 г. [7] и готовит программу работ в области водородной энергетики в РФ [8] с привлечением ведущих ученых и специалистов [9]. Крупнейшие российские и зарубежные компании проявляют интерес к сотрудничеству и инвестициям в данной области. С января 2020 г. в России началась реализация разработанной в Госкорпорации “Росатом” комплексной программы “Атомная наука, техника и технологии”, нацеленной, в том числе, на развитие водородной энергетики. Ее предполагаемое финансирование составит 88.5 млрд руб. до 2025 г.

ПАО “РусГидро” начиная с июня 2013 г. взаимодействует с Kawasaki Heavy Industries и Правительством Магаданской области по вопросу реализации проекта по промышленному производству сжиженного водорода на территории Дальнего Востока. А в сентябре 2019 г., как сообщил “Росатом”, компания “Русатом Оверсиз” и Агентство по природным ресурсам и энергетике Японии подписали соглашение о сотрудничестве на 2020–2021 гг., где речь, в частности, идет о пилотном проекте по экспорту водорода из России в Японию. В проекте рассматривается возможность производства водорода для японского рынка методом электролиза [10].

Следует отметить, что по оценкам международного Совета по водородным технологиям (Hydrogen Council) к 2050 г. за счет водородной энергетики будет покрываться 18% всех глобальных энергетических потребностей [11].

1. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА

Современную промышленность сложно представить без применения технических газов на различных этапах производства. На сегодняшний день водород входит в тройку наиболее востребованных промышленностью газов, уступая лишь кислороду и азоту.

Сфера применения водорода в России достаточно широка: в пищевой промышленности (гидрогенизация жиров); в химической промышленности (производство аммиака, хлороводорода и метанола, гидрогенизация масел); в нефтехимии (для превращения низкосортных видов топлив в высококачественные и для удаления серы); в металлургическом производстве (создание защитно-восстановительной атмосферы при высокотемпературных операциях, например при производстве нержавеющей стали; сварка и резка; получение молибдена и вольфрама, рафинирование хрома, получение твердых сплавов на основе вольфрама, молибдена, спекание спецпорошков); в стекольной промышленности (создание защитной атмосферы при производстве листового стекла float-методом); в энергетике (охлаждение турбинных генераторов и ядерных реакторов); в космической отрасли (ракетное топливо) и т.д. [12].

Предприятия нефтехимической и химической промышленности используют в основном водород, полученный паровой конверсией (особенно если имеется прямой доступ к природному газу). Предприятия полупроводниковой, стекольной, пищевой промышленности, металлургия и энергетика используют электролитический водород, учитывая простоту и надежность электролизеров воды, высокую чистоту генерируемых водорода и

кислорода, возможность получения указанных газов под высоким давлением непосредственно в электролизере, высокую степень автоматизации процесса и высокий ресурс установок.

Сейчас в мире потребляется около 75 млн т водорода, который затем используется в промышленности (в основном в нефтепереработке и производстве аммиака). Пока более трех четвертей этого объема производится из природного газа, для чего требуется более 205 млрд м³ газа [13]. В 2013 г. в структуре потребления водорода преобладало производство аммиака (55%), далее идет нефтепереработка (22%) и получение метанола (13%). К 2020 г. прогнозировался рост потребления во всех этих сферах до 2.8, 2.2 и 0.8 млн т соответственно [14].

В России основная область потребления водорода – производство химических продуктов, прежде всего аммиака и метанола. Лидерами по потреблению водорода являются предприятия, производящие аммиак NH₃. Сейчас на 28 предприятиях в России используется 2.46 млн т водорода в год. Потребление водорода при синтезе метанола (CH₃OH) в 2013 г. составило 0.6 млн т [15]. Потребление водорода в остальных сегментах химической промышленности не превышает 90 тыс. т – 3% от объема потребления [5].

Отметим, что в нефтеперерабатывающей промышленности также повышается потребность нефтеперерабатывающих заводов в водороде (гидрообессеривание, гидрокрекинг дистиллятов, гидроочистка и т.д.).

Важной областью применения водорода в металлургии является производство сырья методом прямого восстановления железной руды. Сейчас в этом процессе потребляется около 330 тыс. т водорода в год. Значительные объемы водорода расходуются в технологических процессах прокатного производства (при термической обработке холоднокатаного проката). Потребление водорода – около 15 тыс. т в год [15].

В энергетике водород используется пока в основном для охлаждения мощных турбогенераторов благодаря его высокой теплопроводности и коэффициенту диффузии, а также нетоксичности. По статистике в энергетике на ТЭЦ, АЭС потребляется около 4–5 тыс. т водорода в год [15].

В пищевой промышленности водород используется в процессах гидрогенизации масел и жиров при получении твердых жиров (маргарина). Объем потребления водорода масложировыми комбинатами оценивается на уровне 1.5 тыс. т в год [15].

Среди прочих потребителей водорода – стекольная промышленность, обогатительные комбинаты, заводы, занимающиеся производством ядерного топлива, предприятия электронной и

электротехнической промышленности, транспортные и газовые компании, фармацевтика [15].

В данном обзоре в первую очередь хотим рассмотреть производство и применение водорода для энергетических целей.

2. РАЗВИТИЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СССР И РОССИИ

Общий объем производства водорода в мире в настоящее время оценивается различными источниками в 55–65 млн т по сравнению с 18 млн т в 1970 г. и 40 млн т в год в 1980 г. [16]. Более 90% водорода производят на месте его потребления (так называемый кэптивный продукт) и менее 10% поставляют специализированные компании, работающие на рынке промышленных газов (Air Liquide, Linde, Praxair Inc. и др.) [17].

Доля России составляет примерно 8% [14]. Основное количество водорода (до 96%) производится путем паровой каталитической конверсии обычно природного газа, в результате которой получается технический водород с чистотой 96–97 об. %. Такой водород пригоден для гидроочистки и гидрокрекинга [18].

Однако конверсия углеводорода вызывает загрязнение атмосферы. Массовые выбросы CO_2 в атмосферу и последующее воздействие на окружающую среду требуют альтернативных решений.

Как уже отмечалось, энергетический кризис начала 1970-х годов, который во многом имел и политико-экономические причины, придал значительный импульс развитию исследований и разработок в области водородной энергетики. Тогда же работы в области водородной (атомно-водородной) энергетики в СССР были начаты в НИЦ “Курчатовский институт” (в то время – Институт атомной энергии имени И.В. Курчатова (ИАЭ)) по инициативе академика В.А. Легасова. Для их успешного развития в ИАЭ было создано специализированное подразделение – Институт водородной энергетики и плазменных технологий (ИВЭПТ), которым многие годы бессменно руководил академик В.Д. Русанов, которое внесло большой вклад в развитие этого направления не только в России, но и за рубежом [19]. Специалисты ИАЭ решали широкий круг вопросов, связанных с созданием плазмохимических и электрохимических методов получения водорода, водородной безопасностью ядерно-энергетических установок и др. [20, 21].

Результаты фундаментальных исследований, выполненных под руководством В.Д. Русанова, успешно прошли крупномасштабную апробацию на промышленном уровне. В частности, центробежный эффект во вращающейся плазме явился основой для создания технологии плаз-

менной переработки сероводородсодержащих газов и основой для опытно-промышленного производства на Оренбургском газоперерабатывающем заводе. Открытие явления плазменного катализа, развитие плазменных технологий конверсии углеводородного сырья и топлив, а также различных способов получения водорода явились важным вкладом в развитие технологий водородной энергетики [22, 23].

Интенсивно изучалась возможность применения ядерной энергии в процессах электролиза, термохимических и термоэлектрохимических процессах. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея (НИКИЭТ) и ИАЭ показали, что могут быть использованы отработавшие свой срок радиоактивные агрегаты для дешевого расщепления воды. Рассматривалось получение твердого водорода дросселированием водородно-гелиевой смеси в вакуум [24].

Упомянутые выше плазмохимические технологии вызвали большой интерес в России и за рубежом. В России, как пионеров в этой области водородной энергетики, можно также упомянуть Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Санкт-Петербургский политехнический университет, Институт электрофизики РАН и другие [25].

Основным достоинством плазменного метода конверсии углеводородов, помимо высокой удельной производительности, является практическая независимость работы конвертора от вида углеводорода (от метана до мазута, включая кислородсодержащую органику, отходы и различные виды биотоплива). На рис. 1 показан разработанный компанией “НИК НЭП” совместно с НИЦ “Курчатовский институт” плазменный конвертор с производительностью 7 м³ синтез-газа в час из бензина. Недостатком плазмохимических технологий следует признать дополнительный расход электроэнергии (0.10–0.15 кВт ч/м³ Н₂) [26].

Крайне привлекательным является производство синтетического газа и водорода из органических бытовых и промышленных отходов, так как это позволяет одновременно решить актуальную проблему переработки “мусора”. Разработанные в НИЦ “Курчатовский институт” высокоэффективные и экологически чистые плазменные и плазменно-расплавные технологии переработки отходов позволяют не только утилизировать практически любые виды отходов без их предварительной сортировки, но и одновременно производить до 3500 кВт ч электроэнергии на тонну органической составляющей за счет использования синтетического газа (водорода) [19].

Ядерные технологии обладают практически неограниченными ресурсами дешевой энергии для производства водорода, особенно в ночное

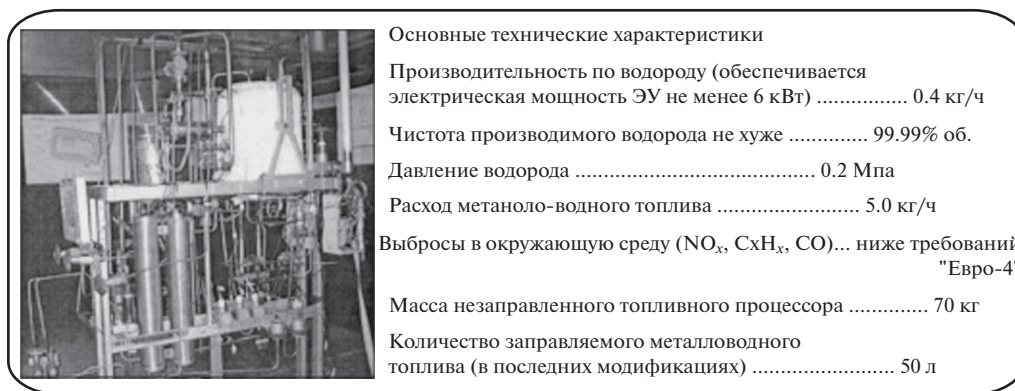


Рис. 1. Топливный процессор компании "НИК НЭП" [26].

время. Используя произведенную на АЭС электроэнергию, можно, применив электролиз, производить водород и кислород из воды [27]. Если электролиз проводить при высоких температурах, то полученная от ядерного реактора тепловая энергия может заменить часть электроэнергии, и практический КПД процесса существенно увеличится. В основу таких технологий, а также технологий конверсии природного газа с использованием отходящего тепла реакторов были положены разработки НИЦ "Курчатовский институт". При термохимических (и термоэлектрохимических) циклах разложения воды с использованием тепловой и электрической энергии реакторов можно получать водород с эффективностью до 50% [28].

Начиная с 70-х годов прошлого века в стране были выполнены и получили необходимое научно-техническое обоснование и экспериментальное подтверждение проекты высокотемпературных гелиевых реакторов (ВТГР) атомных энерго-технологических станций для химической промышленности и черной металлургии [29, 30]. Основой для проектов ВТГР послужили разработки ядерных ракетных двигателей на водороде [31]. Именно реакторы этого типа представляют наибольший интерес для производства водорода с использованием отходящего тепла и избыточной электроэнергии в ночное время и интерес к ним в настоящее время возрос.

Одним из наиболее инновационных в этой области был международный проект по разработке высокотемпературного модульного гелиевого реактора с газовой турбиной (ГТ-МГР), который разрабатывался совместными усилиями российских институтов (ОАО "ОКБМ Африкантов", НИЦ "Курчатовский институт", ОАО "ВНИИНМ", ОАО "ГИ "ВНИПИЭТ", ФГУП "НИИ НПО "Луч") и американской компании GA при управлении и финансировании со стороны Минатома РФ и Департамента энергетики США. С проектом сотрудничали также компании Фраматом и Фуджи электрик [31].

Водород весьма интересен для атомных электростанций как аккумулятор энергии и для сглаживания нагрузки. Получаемый при этом кислород мог бы стать основой производства озона, например, для очистки промышленных стоков Санкт-Петербурга [31].

Особый интерес представляют исследования и разработки водородно-кислородных парогенераторов, которые были инициированы в конце 70-х—начале 80-х годов прошлого столетия в СССР. Такие системы позволяют повысить температуру водяного пара для турбин и их КПД [32].

В этом случае в часы провала графика нагрузки водород и кислород производятся путем электролиза воды, направляются в хранилище и используются в часы пика для производства дополнительной мощности путем сжигания водорода в кислороде и дополнительного перегрева и увеличения расхода пара перед турбиной [33]. В Объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН) и Исследовательском центре им. М.В. Келдыша были созданы экспериментальные образцы водородно-кислородных парогенераторов высокого давления мегаваттного класса мощности [34–39].

Однако практическая реализация такой технологии была заторможена во многом благодаря авариям на АЭС.

Первое промышленное производство жидкого водорода в СССР началось в 1965 г. ФКП "НИЦ ракетно-космической промышленности" (ФКП "НИЦ РКП") в составе водородного испытательного комплекса КСВИ-106, который в настоящее время является единственным функционирующим крупнотоннажным производством жидкого водорода в России [40].

К 1980 г. в СССР производство жидкого водорода функционировало в Чирчике, Загорске и Днепродзержинске. Причем в Чирчике и Загорске действовали установки производства водорода электролизом воды.

Внедрение водородного топлива, например, в авиации сдерживалось из-за необходимости более уверенного решения вопроса эксплуатации водородных систем и их наземного обслуживания, а также снижения стоимости водорода. Однако в СССР 50 лет тому назад по инициативе С.П. Королёва были начаты широкомасштабные работы по созданию оборудования и технологий для использования в ракетно-космической технике эффективного водородно-кислородного ракетного топлива [41]. Для решения поставленной задачи следовало создать транспортные средства для перевозки жидкого водорода [42, 43].

Один из основных способов транспортировки жидкого водорода – транспортировка в железнодорожных цистернах. Первым агрегатом для транспортировки жидкого водорода была автоцистерна ТРЖВ-20, созданная в 1966 г. на предприятии АО “Уралкриомаш” в Нижнем Тагиле [44].

С тех пор несколько раз была проведена модернизация цистерны с целью повышения безопасности транспортировки жидкого водорода. Выпускаемая сейчас модель цистерны обладает рядом преимуществ по сравнению со своими предшественницами: увеличена перевозимая масса водорода, снижены потери при транспортировке [14].

Современные потребности в жидком водороде в России пока достаточно ограничены, хотя планируется создание новейших ракет-носителей и разрозненных блоков космических комплексов, использующих в качестве топлива жидкий водород.

Отметим, что ситуация с производством водорода в России развивается несколько по-иному, нежели за рубежом. Во-первых, в мире 40% водорода производится газификацией угля, в России СГТ-технология (получение жидкого топлива из угля) сейчас не применяется. Во-вторых, в мировой практике хорошо развит рынок товарного водорода, в России это направление только появляется. В-третьих, основную роль в структуре мирового потребления водорода занимает нефтепереработка, а в России – производство химических продуктов, прежде всего аммиака и метанола. Основным производителем водорода в России в 2014–2016 гг. являлось ОАО “Уралэлектромедь”. В 2016 г. доля этого производителя была равна 56% натурального объема производства. Второй по объему производитель в 2016 г. – ЗАО “КМЭЗ” с 23% натурального объема производства, на третьем месте ПАО “ГМК “Норильский никель” с 21% [45].

В России уже ведутся разработки по созданию комплексной инфраструктуры производства и поставок водорода. Здесь следует отметить активное участие компании “Линде Газ Рус” [14].

Для создания безуглеродной и экологически чистой экономики считается целесообразным

использовать электролиз воды для производства водорода, а также разрабатывать решения для распределенной генерации по требованию и на месте [46–48].

Однако водород, произведенный из природного газа, которым богата Россия, обходится в несколько раз дешевле электролизного водорода. Поэтому основным способом получения водорода в России в настоящее время является метод каталитической конверсии природного газа с водяным паром. Существенный вклад в развитие технологий конверсии природного газа и других видов органического топлива вносит Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН [49, 50].

Согласно расчетам аналитиков DISCOVERY Research Group объем рынка водорода в России в 2016 г. составил более 93 тыс. т, что эквивалентно \$6.81 млрд. Темп прироста объема рынка составил 4.9% натурального объема рынка и 7.6% стоимостного [45].

К сожалению, внешнеэкономическая деятельность РФ характеризуется незначительными операциями по экспорту-импорту водорода. Существуют лишь небольшие поставки газа в баллонах, не оказывающие заметного влияния на внутренний рынок. Объем импорта водорода в Россию в 2016 г. составил 1.97 т [45].

Объем экспорта водорода из России в 2016 г. составил 645 кг [45]. Основные покупатели отечественной продукции – страны СНГ (в первую очередь Казахстан). Однако вернемся к вопросам истории развития водородной энергетики в России (СССР) и ее современному состоянию.

В период с 1920-х до начала 1940-х годов весьма важные и обширные исследования реакции горения водорода в кислороде и воздухе в различных условиях были выполнены российскими учеными школы Н.Н. Семенова [51]. Открытие в 1928 г. разветвленных цепных реакций дало широкие перспективы для управления химическими процессами, важными для водородной энергетики [52].

В Советском Союзе работы по исследованию водорода в качестве моторного топлива начались в 1935 г. в Московском механико-машиностроительном институте им. М.В. Ломоносова (МММИ) (в настоящее время МГТУ им Н.Э. Баумана). Профессор В.И. Сороко-Новицкий с коллегами опубликовали научно-исследовательский отчет “Об использовании возможности работы двигателя на водороде”. В этой работе исследовалось влияние добавок водорода к бензину на двигателе ЗИС-5 [53]. Известны также работы по использованию в качестве топлива водорода, которые проводились Ф.Б. Перельманом [54].

Реальное практическое применение водорода в качестве моторного топлива началось в 1941 г. в блокадном Ленинграде в Великую Отечествен-



Рис. 2. Автомобиль ГАЗ-АА на водороде [58].



Рис. 3. Микроавтобус РАФ, работающий на водороде и бензине (1979 г.).

ную войну. Техник-лейтенант Б.И. Шелищ предложил использовать водород, “отработавший” в аэростатах, как моторное топливо для двигателей автомобиля ГАЗ-АА [55, 56]. В общей сложности в 1941–1942 гг. около 200 грузовиков были переведены на водород. Для опускания аэростатов, частично потерявших свою подъемную силу, требовалось большое усилие. Эта операция осуществлялась с использованием механической лебедки, установленной на автомобиль ГАЗ-АА. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) вращал лебедку для опускания аэростатов. В блокадном Ленинграде было оборудовано несколько сотен постов противовоздушной обороны, на которых использовались автомобили ГАЗ-АА, работающие на водороде [57].

На рис. 2 на заднем плане виден спущенный на землю водородный аэростат, из которого водород перекачивается в газгольдер, расположенный на переднем плане [54]. Отработанный водород из матерчатого газгольдера подводился к всасывающему коллектору двигателя ГАЗ-АА через техно-

логическую пробку. Минуя карбюратор, газ поступал в рабочие цилиндры. Дозировка водорода и воздуха обеспечивалась дроссельной заслонкой или педалью акселератора.

В области использования водорода в качестве топлива для ДВС следует отметить работы Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института (НАМИ), Института проблем машиностроения АН УССР (ИПМАШ АН УССР), НПО “КВАНТ”, Сектора механики неоднородных сред АН СССР (СМНС АН СССР), Завода-ВТУЗ при ЗИЛе и др.

Наряду с научными аспектами, связанными с изучением теории ДВС на водороде и его добавках к бензину, большое внимание уделялось исследованиям в области безопасности использования водорода в качестве топлива для транспортных средств, а также способов его хранения на борту автомобиля [54, 55].

Опытная эксплуатация бензоводородных автомобилей “Волга” была начата в Харькове в 1980 г. и показала перспективность перевода части го-



Рис. 4. Автомобиль НАВЭ на выставке “Инновационные достижения”, проходившей в рамках форума, 2006 г. [59].

родского автотранспорта на бензоводородные смеси. В 1986 г. в Минавтопром СССР было принято решение о выпуске и последующей эксплуатации в городах СССР опытной партии городских микроавтобусов РАФ (200 штук) (рис. 3), работающих на бензоводородных смесях. Однако это решение из-за начавшихся политических и экономических процессов не было выполнено [51].

В 2006 г. Национальной ассоциацией водородной энергетики (НАВЭ) был представлен автомобиль “Газель” с ДВС, работающим на бензоводородных топливных композициях. Автомобиль был разработан при участии НИУ “Московский энергетический институт” (МЭИ (ТУ)), ЗАО Автокомбинат № 41 (Москва), ООО “Аудит-Премьер”.

В 2007 г. НАВЭ в сотрудничестве с ОАО “АВЭКС”, МЭИ (ТУ) и ЗАО Автокомбинат № 41

представила еще один вариант водородного автомобиля (рис. 4). Полезная нагрузка автомобиля 2000 кг. Мощность электропривода 65–70 кВт, мощность ДВС 10 кВт. Запас хода автомобиля 200 км [60].

В начале 1980-х годов в конструкторском бюро Н.Д. Кузнецова были разработаны авиационные двигатели, предназначенные для пассажирских самолетов Туполева. Эти двигатели, работающие на водороде, прошли стендовые и летные испытания. ОКБ Туполева на базе серийного пассажирского самолета Ту-154 был создан экспериментальный водородный самолет Ту-155 (рис. 5). 15 апреля 1988 г. самолет ТУ-155 совершил первый полет. Самолет Ту-155 прошел обширный комплекс испытаний, в ходе которых установлено 14 мировых рекордов. На нем было выполнено около 100 продолжительных полетов на жидком водороде.

Работа над комплексом “Энергия-Буран” (рис. 6) велась около десяти лет. Головным разработчиком орбитального корабля “Буран” стало НПО “Молния”. В качестве двигателя на второй ступени ракеты-носителя “Энергия” был установлен жидкостный ракетный двигатель РД-0120, работающий на жидком водороде и жидком кислороде. Космический полет “Бурана” состоялся 15 ноября 1988 г. Автоматический полет “Бурана” был занесен в Книгу рекордов Гиннеса и является непревзойденным до сих пор [62].

В настоящее время одним из возможных способов обеспечения поэтапного перехода к водородной энергетике в транспортной отрасли является производство синтез-газа и/или хайтана (смеси водорода и окиси углерода или метана, от англ. *hythane*). Причем в случае синтез-газа его получение возможно непосредственно на борту транспортного средства с использованием части основного (газообразного или жидкого) углеводородного топлива. Применение синтез-газа и



Рис. 5. Самолет ТУ-155 с водородными двигателями и экипаж самолета Ту-155 [61].



Рис. 6. Многоэтажный космический корабль Энергия-Буран [63].

хайтана оказывает положительное влияние на параметры рабочих процессов ДВС. О плазма-химической конверсии топлива говорилось ранее, а в Сибирском государственном университете пу-

тей сообщения совместно с Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН были проведены экспериментальные исследования по использованию добавок водородсодержащего синтез-газа и на дизельных ДВС [64]. Одним из вариантов является бортовой генератор синтез-газа, состоящий из каталитического реактора воздушной конверсии углеводородного топлива в синтез-газ с использованием катализатора на основе метал-лосетчатого носителя с активным компонентом на основе наночастиц никеля [65]. В этом инсти-туте также выполнен большой ряд разработок по конверсии различных видов топлива с использо-ванием высокоэффективных наноструктурных катализаторов [49, 50].

В 2008 и 2009 г. в реальных условиях были про-ведены испытания эксплуатации: автомобили ГАЗ-2310 “Соболь” и “Баргузин”, оборудованные бортовыми генераторами синтез-газа, приняли участие в автопробегах “голубой коридор”, орга-низованных ОАО “Газпром” по маршрутам Санкт-Петербург–Москва и Москва–Сочи. Испытания показали, что добавки синтез-газа к ос-новному топливу значительно снижают эмиссию CO, CH, NO_x и обеспечивают суммарное умень-шение расхода топлива.

Проведенные исследования [66] показали, что воздушная конверсия природного газа является наиболее простым и дешевым способом получе-ния синтез-газа на борту транспортного средства. Однако применение синтез-газа требует соблю-дения определенного пропорционального соста-ва топливной смеси, так как превышение допу-стимого уровня содержания водорода в камере сгорания ДВС вызывает превышение допусти-мых пределов температуры горения и приводит к

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР «ВОЛНА-20»



Характеристики	
Мощность	1 кВт
Напряжение	27 В
Реагенты	водород кислород
Давление	0,4 МПа
Масса	65 кг
Ресурс	500 ч



Батарея топливных элементов



Уральский электрохимический комбинат

Рис. 7. Водородно-кислородный электрохимический генератор “Волна-20” [70].

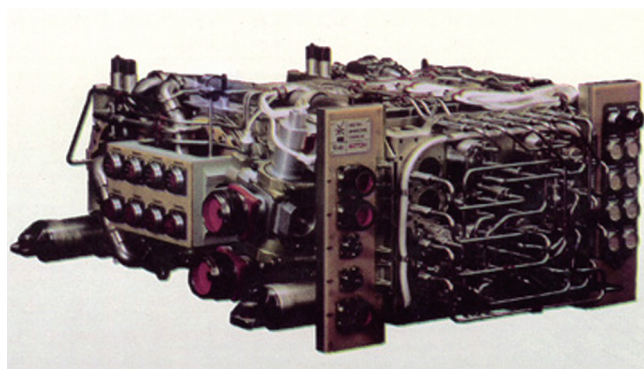


Рис. 8. Электрохимический генератор «Фотон».

изменению характера вибрационной нагрузки [64, 67].

В 70-е годы прошлого столетия в нескольких научно-исследовательских организациях СССР были начаты работы по использованию водорода в качестве топлива не только для ДВС, но и для электрохимических генераторов (ЭХГ) на основе топливных элементов (ТЭ) [68].

В СССР первые публикации о щелочных топливных элементах (ЩТЭ) появились в 1941 г., а первые практически значимые разработки были выполнены в 60-х годах на Уральском электрохимическом комбинате (УЭХК) и в Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва (РКК «Энергия») для космических кораблей.

В 1969–1975 гг. УЭХК для РКК «Энергия» разработаны ЭХГ «Волна-20» (рис. 7) с батареей ЩТЭ с циркулирующим электролитом и организовано их опытное производство [69].

В конце 80-х годов для корабля «Буран» на УЭХК был разработан ЩТЭ – электрохимический генератор «Фотон» (рис. 8) с номинальной мощностью 10 кВт с возможностью увеличения мощности за счет объединения нескольких модулей. КПД генератора составлял 60%, гарантиро-

ванный ресурс 2000 ч [71], которые, правда, не были задействованы во время полета «Бурана».

Наряду с разработками ЩТЭ для космических кораблей в СССР велись работы по созданию подводной лодки с энергетическими установками на ЩТЭ, которые были начаты в первой половине 70-х годов прошлого века (ЦКБ «Лазурит», НПО «Квант», СКБ Котлостроения, ЦКБ МТ «Рубин», а в дальнейшем к ним присоединились разработчики ЩТЭ для космических аппаратов).

Для подводной лодки «Катран» проекта 613Э была создана энергоустановка с ЩТЭ мощностью 280 кВт. Реагенты – жидкие кислород и водород – хранились в криогенных емкостях вне основного корпуса подлодки.

В 1988 г. подводная лодка «Катран» успешно прошла испытания и впервые в мире подтвердила принципиальную возможность создания и эффективного использования ТЭ для этого вида техники. К сожалению, работы по созданию энергоустановок для подводных лодок в СССР были приостановлены в отличие от аналогичных разработок за рубежом [71].

В 2001 и 2003 г. Уральский электрохимический комбинат, РКК «Энергия» и АвтоВАЗ на автосалонах в Москве демонстрировали автомобиль «Лада АНТЭЛ-1» и «Лада АНТЭЛ-2» с электродвигателем и блоком энергоснабжения на основе ЭХГ «Фотон», представленные на рис. 9. В первой системе окислителем служил кислород, во второй – очищенный от CO_2 воздух. На одной заправке водорода, хранящегося в баллонах, эти автомобили могли проехать 300 км [72]. Конечно, стоимость такой системы (с учетом ее «космического происхождения») была излишне велика.

В 1970–1980 гг. в НПО «Квант» совместно с рижским автобусным заводом РАФ был создан первый в мире экспериментальный водородный микроавтобус «Квант-РАФ» с комбинированной энергоустановкой на основе водородно-воздушного ТЭ мощностью 2 кВт и никель-цинковой ак-



Рис. 9. Автомобили ВАЗ на топливных элементах «АНТЭЛ-1» (а) и «АНТЭЛ-2» (б) [73].



Рис. 10. Комплект батарей для спутников связи “Ямал”.

кумуляторной батареи (5 кВт·ч), который был представлен на Московской международной выставке “Электро-82” и прошел экспериментальную эксплуатацию [51].

С 1966 г. РКК “Энергия” разрабатывала фосфорно-кислые ТЭ для советской лунной программы. С 1987 по 2005 г. “Энергия” произвела около 100 топливных элементов, которые наработали суммарно около 80000 ч [74]. Однако в дальнейшем разработки в этой области прекратились.

В 1999 г. для космического аппарата “Ямал” были созданы модули из двух никель-водородных аккумуляторных батарей (рис. 10), т.е. водород использовали не только для ТЭ, но и для их аналогов [72].

Первый опытный образец электрохимического генератора на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ) мощностью 1 кВт был создан в 1989 г. в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН (ИВТЭ). Это был самый мощный ТОТЭ на Европейской территории, но в кризисные 1990-е эти работы затормозились и были возобновлены только в 2008 г. в сотрудничестве с дочерним предприятием Росатома – топливной компанией “ТВЭЛ”. Заинтересован в разработках ТОТЭ, в частности, Газпром, так как автономные источники энергии на природном газе перспективны для систем энергообеспечения газопроводов, включая станции катодной защиты. На площадках ОАО “Газпром трансгаз Екатеринбург” энергоустановка мощностью 1.5 кВт успешно отработала больше года [75]. Научно-ис-

следовательские работы в области ТОТЭ успешно продолжаются в этом институте [76, 77].

Начиная с конца 80-х годов прошлого века работы по разработке энергосистем на основе ТОТЭ также успешно проводились в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики им. академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ ВНИИТФ, г. Снежинск). Разработки велись по всем конструктивным разновидностям ТОТЭ (трубчатая, планарная, блочная) и была достигнута мощность 1–2.5 кВт.

В 2005 г. в ВНИИТФ был также изготовлен модуль батарей ТОТЭ для систем катодной защиты газопроводов. Основой модуля являлся трубчатый ТОТЭ с несущим электролитом. Рабочая температура ТОТЭ – 950°C. Коэффициент использования топлива достигал 86% [78]. Начиная с 2007 г. в рамках Федеральной целевой программы существенные успехи в этой области были достигнуты ФГУП “ЦНИИ СЭТ” при участии РФЯЦ ВНИИТФ.

В 1994 г. ОАО “Специальное конструкторское бюро котлостроения” (СКБК) разработало проект комбинированной электроэнергетической установки (ЭЭУ) с электрохимическим генератором на базе ТОТЭ и конечным парогазотурбинным циклом.

Корпорация “ТВЭЛ” (ОАО “ЧМЗ” (ОАО “Чепецкий механический завод”) имеет опытный участок по производству диоксида циркония, порошков для плазменного напыления и изделий из твердых электролитов.

Комплексная программа развития корпорации “ТВЭЛ” до 2020 г. предусматривала существенное увеличение производства и расширение номенклатуры выпускаемой продукции.

В последние годы существенный прогресс также был достигнут в Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), где успешно ведутся разработки по созданию планарных ТОТЭ [79].

В России исследования и разработки твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ) проводятся в ИПХФТ РАН, НИЦ “Курчатовский институт”, РФЯЦ-ВНИИЭФ, ЦНИИ СЭТ, а также в ряде других исследовательских организаций.

Разработка и опытное производство твердополимерного электролита (ТПЭ) велись с середины 70-х годов и в России в ОАО “Пластполимер” [82]. Однако в настоящий момент производство ТПЭ (мембран на его основе) прекращено.

В последние годы научно-исследовательская деятельность в области водородной энергетики в России была сосредоточена в основном на разработке новых материалов, наноструктурных катализаторах, мембранно-электродных блоках и со-



Рис. 11. Электролизные модули Уралхиммаша типов СЭУ (а) [80] и ФВ (б) [81].

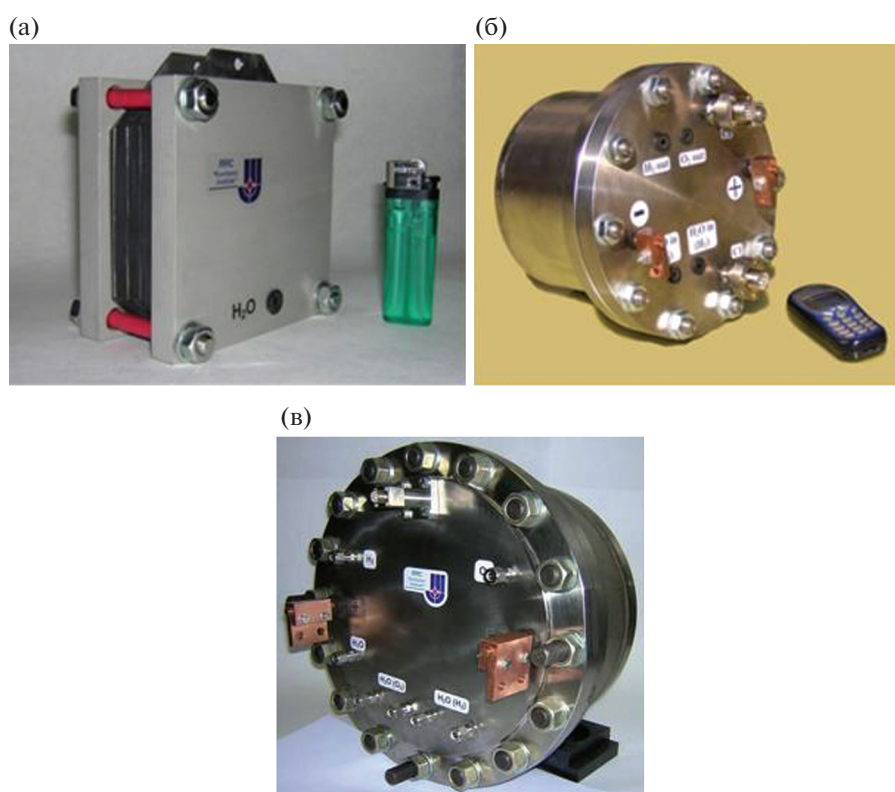


Рис. 12. Электролизеры с ТПЭ, разработанные в НИЦ “Курчатовский институт”, производительностью 25 л/ч (а), 125 л/ч с рабочим давлением 30 кг/см² (б) и 1.5 м³/ч с рабочим давлением 30 кг/см² (в).

ответствующих технологиях. В частности, в НИЦ “Курчатовский институт” (Москва), МЭИ (ТУ) (Москва), Институте проблем химической физики РАН (Черноголовка), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Институте катализа РАН (Новосибирск), Институте физической химии и электрохимии А.Н. Фрумкина РАН (Москва) и некоторых других был успешно выполнен ряд фундаментальных и прикладных исследовательских проектов [83].

В 2015 г. был разработан и изготовлен опытный образец энергоустановки на основе ТПТЭ в филиале “ЦНИИ СЭТ” ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, работающей на конвертированном дизельном топливе и оснащенной системой утилизации отработанных продуктов окисления для морской техники нового поколения [84]. В НИЦ “Курчатовский институт” было разработано несколько экспериментальных гибридных солнечно/ветро/водородных энергосистем для децентрализованного



Рис. 13. Первый российский беспилотник, снабженный ТПТЭ, 2013 [86].

энергоснабжения [85]. Также стоит упомянуть беспилотный летательный аппарат (рис. 13) [86], разработанный в 2013 г. в НИЦ “Курчатовский институт” совместно с Объединенной авиастроительной корпорацией (ОАК). В дальнейшем большие успехи в этой области были достигнуты в Институте проблем химической физики РАН (ИПХФ) [87]. В настоящее время производством ТПТЭ для беспилотных летательных аппаратов успешно занимаются компании AT Energy [88] и VMPower [89]. Разработаны оригинальные наноструктурные электрокатализаторы на наноуглеродных носителях [90–101].

Для ТЭ безусловно оптимальным является производство водорода методом электролиза воды, обеспечивающего высокую чистоту водорода. В России водно-щелочные электролизеры успешно производились предприятием “Уралхиммаш” с 1950-х годов. Электролизеры с асбестовыми диафрагмами, представленные на рис. 11, производительностью по водороду от 4 до 250 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (СЭУ-4, 10, 20, 40 с производительностью по водороду 4, 10, 20, 40 $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{ч}$ соответственно) работают при давлении до 1.0 МПа, а электролизная установка ФВ-500 с производительностью по водороду до 500 $\text{нм}^3/\text{ч}$ работала при атмосферном давлении [2].

К сожалению, выпуск отечественных водно-щелочных электролизеров реально прекращен, так как компания не выдержала конкуренции с зарубежными разработчиками.

Однако в России более 20 лет проводятся исследования и разработка систем электролиза воды с ТПЭ – ФГБУ НИЦ “Курчатовский институт”, ФГУП “Красная Звезда” и другие организации. В настоящее время созданы электролизеры с ТПЭ производительностью от нескольких миллилитров до нескольких кубических метров водорода в час (рис. 12) различного назначения и давления до 150 бар [2]. Большое внимание уделяется разработке наноструктурных катализаторов и наноструктурных мембранно-электродных блоков (МЭБ) на основе платины и иридия [46, 102–110].

Создание систем хранения и транспортировки водорода имеет ключевое значение и во многом является сдерживающим фактором развития водородной энергетики. Хранение на борту транспортных средств имеет ключевое значение для развития водородных технологий на транспорте. В 1980-е годы в СССР были разработаны опытные образцы систем хранения (металлогидридных, газобаллонных, криогенных). Следует отметить разработанные в Институте проблем машиностроения им. А.И. Подгорного системы аккумулирования водорода с использованием низкотемпературных и высокотемпературных гидридов интерметаллических сплавов на основе FeTiVa и Mg_2Ni [48], легкие композитные супербаллоны с массовым содержанием водорода примерно 8–10% при давлениях 300–500 атмосфер [51]. В 2000-х годах в Московском авиационном институте в сотрудничестве с РКК “Энергия” и ОАО “Сплав” по заказу МЧС изготовлены и испытаны баллоны вместимостью 10 л, массой 2.5 кг, рассчитанные на давление 30 МПа [111].

ООО НПО “Поиск” (Санкт-Петербург) в 2001 г. по заказу компаний АОЗТ “ЛЕМ” и АО “Автоваз” были разработаны металлопластиковые автотранспортные баллоны вместимостью 65 л с рабочим давлением 22 МПа и массой 35 кг для сжатого природного газа (метана) и водорода, использованные в легковых автомобилях. В 2003 г. по заказу РКК “Энергия” и АО “Автоваз” начаты работы по разработке баллона для хранения на борту автомобилей семейства “Антэл” сжатого водорода с рабочим давлением 39.2 Мпа [112].

Однако именно гидриды металлов для транспортного и стационарного применения вызвали особенно интенсивные исследования и разработки. Работы в СССР в этой области были начаты в конце 1960-х годов после открытия явления обратимого поглощения водорода сплавами и интерметаллическими соединениями [113–115]. В рамках консорциума по созданию металлогидридных систем хранения сотрудничали три ведущие организации: ИАЭ, НАМИ и МГУ им М.В. Ломоносова [54]. В 1979 г. были зарегистрированы в Госу-


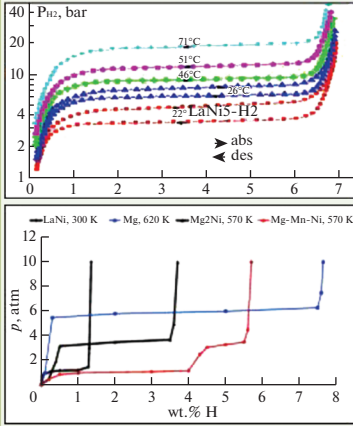
Металлогидридный аккумулятор	Принцип действия	Материал	Температура, °С	Количество H ₂ , мас. %
	<p>Обратимое гидрирование</p> $M + xH_2 \rightleftharpoons MH_{2x}$ 	La(Mm)Ni ₅	-50 – +50	1.5
		TiFe	-30 – +50	1.8
		(Ti, Zr)(Mn, Cr) ₂	-30 – +50	2.0
		Mg ₂ Ni	250 – 300	3.6
		Mg–Mm–Ni	250 – 300	5.5
		Mg + 5%С	300 – 350	7.0
		Mg + 3%Ni/С	300 – 350	7.0

Рис. 14. Разработанные в ИПХФ РАН материалы для металлогидридного хранения водорода [120].

дарственном реестре изобретений СССР заявки № 263140 и 263141 с приоритетом изобретения 22 июня 1978 г., которые были одними из первых изобретений в этой области в СССР и в мире [54].

Известно, что хранение водорода в гидридах имеет ряд преимуществ по отношению к хранению под давлением или в сжиженном виде, а именно: энергозатраты снижаются, транспортировка упрощается и, главное, повышается безопасность хранения. Гидриды обеспечивают высокую объемную плотность, сравнимую с жидким водородом, но не требуют поддержания низкой температуры. В ряде случаев может быть достигнута и высокая массовая плотность [116].

В настоящее время в России в ИПХФ РАН разработано множество водород-аккумулирующих материалов (рис. 14) и созданы на их основе разные типы металлогидридных аккумуляторов многократного действия [114, 117–120]. В ОИВТ РАН также ведутся разработки гидридных материалов. Но особое внимание уделяется созданию энергоустановок на их основе [118, 121–124].

Также исследовались возможности создания криогенных систем хранения жидкого водорода на борту автомобиля. Экспериментальный автомобиль РАФ с криогенной системой хранения водорода испытан на полигоне НАМИ в 1980-х годах и по результатам этих работ в НПО “Криогенмаш” был разработан экспериментальный криогенный бак для хранения жидкого водорода на борту автомобиля. Однако дальнейшего существенного развития после 1985 г. эти работы не получили [51].

В СССР ОАО “Криогенмаш”, ОАО “Гелий-маш”, ОАО “Уралкриомаш”, институтами РАН,

Научно-исследовательским и проектным институтом азотной промышленности и продуктов органического синтеза (ОАО “ГИАП”) и другими была создана инфраструктура снабжения страны жидким водородом, прежде всего для ракетно-космических программ. Были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию установки ожижения производительностью 180 кг/ч параводорода (НИИхиммаш в г. Сергиев Посад, ПО “Электрохимпром” в г. Чирчик) [125]. Следует также отметить “Криогенный центр” на Байконуре, обеспечивавший весь цикл работ с системой “Энергия–Буран” [126].

Наноструктурные пористые материалы также могут быть использованы для хранения водорода в молекулярной форме. Основные материалы, способные обеспечить эффективную физическую сорбцию водорода, – это углеродные наноструктуры, VN-наноструктуры, металл-органические каркасные системы (MOF), пористые органические полимеры. Сорбенты должны иметь большую удельную поверхность, упорядоченную систему пор и быть достаточно легкими, но стабильными. Этой проблеме также было уделено большое внимание в отечественных разработках [116].

Отметим оригинальную концепцию “алюмо-водородной энергетики”, где водород производится за счет реакции алюминия с водой [127, 128]. В этом случае алюминий выступает в качестве промежуточного энергоносителя в стационарных, транспортных и портативных приложениях. Перспективным также является прямое электрохимическое окисление алюминия и его наноструктурных модификаций [129] в воздушно-алюминиевых топливных элементах. Но и

алюмоводородные технологии весьма привлекательны, так как есть возможность выработки дополнительной тепловой энергии [130].

В ОИВТ РАН с 2006 г. успешно разрабатывались прототипы компактных источников питания для портативной электроники на основе “свободнодышащих” водородно-воздушных топливных элементов и алюмоводородного микрогенератора водорода [131, 132].

Разрабатываемые технологии алюмоводородной энергетики могут найти свое место в “водородной экономике” будущего в качестве эффективного и безопасного способа транспортировки “источника” водорода и запасаемой энергии [130].

Особый интерес представляют выполненные в НИЦ “Курчатовский институт” разработки систем хранения водорода в стеклянных/кварцевых капиллярах, позволяющие достичь массовой доли запасаемого водорода более 10% [133, 134], но до практической реализации эти разработки пока не доведены.

В последние годы в НИЦ “Курчатовский институт” активно ведутся разработки по применению водородного цикла (реализуемого в системе электролизер воды—система хранения водорода—топливный элемент) для хранения энергии, вырабатываемой энергоустановками на основе ВИЭ, в том числе в условиях Крайнего Севера и Арктической зоны. Разработаны эффективные технические решения по использованию электрохимических водородных систем для хранения энергии с КПД ее циклического преобразования более 40%. Показано, что хранение энергии в виде водорода экологически безопасно и значительно превосходит по своим емкостным показателям традиционные аккумуляторные батареи, что особенно актуально при длительном отсутствии энергии от ВИЭ, например, в условиях полярной ночи и в безветренную погоду. Подтверждено, что применение водородных электрохимических систем (электролизеров воды и ТЭ) с соответствующей системой хранения водорода позволяет запасать значительное количество энергии и сглаживать дневную, месячную и сезонную неравномерность поступления энергии от ВИЭ [135].

Важное преимущество водородной системы аккумулирования энергии — возможность наращивания энергоемкости водородного накопителя путем присоединения дополнительных газовых баллонов или использования газгольдеров большей вместимости. Также несомненными преимуществами водородных накопителей по отношению к традиционным электрохимическим аккумуляторам являются простота утилизации и отсутствие токсичных компонентов. Немаловажными достоинствами систем водородного акку-

мулирования являются отсутствие саморазряда, самосбалансированность, модульная архитектура, обратимость процесса и большое количество циклов зарядки/разрядки. Примечательно, что с увеличением вместимости хранения снижается удельная стоимость системы, так как для запасания дополнительной энергии требуется только дополнительный объем для хранения водорода. Преимущество энергоустановок с водородными накопителями по массогабаритным показателям по сравнению с традиционными аккумуляторами становится особенно существенным при создании удаленных систем в труднодоступных районах, куда оборудование доставляется, например, с помощью вертолетов [136].

В НИЦ “Курчатовский институт” разработана, протестирована и внедрена линейка энергоустановок на основе ВИЭ и водородных систем генерации и хранения энергии. Особенностью созданных энергоустановок является их северное климатическое исполнение, обеспечивающее эффективное энергоснабжение различных потребителей в условиях полярной ночи, низких температур и других факторов, свойственных северным регионам таких стран, как Россия, Норвегия, Финляндия, Дания, Ирландия, США и Канада. Принципиально важными преимуществами созданных энергоустановок являются отказ от использования дизель-генераторов в качестве вспомогательных источников энергии и их замена на экологически безопасные ЭХГ на основе ТЭ [137]. Диапазон мощностей разработанных автономных энергоустановок и их модульная наращиваемая архитектура позволяют обеспечивать потребности в электроснабжении как небольших удаленных систем, например метеорологических станций, станций сотовой связи, морских и речных маяков и других навигационных систем, так и более энергоемких потребителей, таких как локальные жилые и производственные объекты, станции зарядки электрического транспорта и т.п. Комплексное использование принципиально разных первичных источников энергии — солнца и ветра, а также электрохимической системы хранения и генерации электроэнергии позволяет значительно повысить стабильность электроснабжения автономных внесетевых потребителей [138].

Подчеркнем, что нормативная база водородной энергетики (ГОСТы, коды и стандарты) практически не развивалась в СССР, но сейчас ей уделяется необходимое внимание [139].

Так, НАВЭ считает, что формирование национальной технической политики в области водородных технологий и ТЭ на основе современной национальной нормативно-технической базы, гармонизированной с международными стандартами ИСО и МЭК, а также организация междуна-

родного сотрудничества в рамках Международной ассоциации водородной энергетики (ИАНЕ), необходимые для развития водородных технологий, обеспечивающих благоприятные условия для формирования водородной экономики, популяризации водородной энергетики, организации водородного всеобуча, являются главными приоритетами на ближайшие годы [140].

В ИАНЕ входили и ученые из СССР, работы которых координировали Комиссия АН СССР по водородной энергетике и ИАЭ. Руководителем и лидером водородного движения в СССР был академик В.А. Легасов. Под его редакцией с 1978 г. “Атомиздатом” выпускались сборники “Атомно-водородная энергетика и технология”, проводились Всесоюзные семинары по атомно-водородной энергетике на базе ИАЭ.

Первая всесоюзная школа по этой тематике под научным руководством А.М. Стыриковича прошла в 1979 г. в Донецком политехническом институте (ныне Донецкий национальный технический университет). В 2004 г. к водородному всеобучу активно подключились ректор МИРЭА, академик А.С. Сигов и профессор А.А. Евдокимов (с 2007 г. заведующий кафедрой химии). У них особая роль в развитии водородного всеобуча в России [141].

Прежде всего они поддержали дополнительную специализацию по водородной энергетике на кафедре информатизации журналистики МИРЭА как часть водородного всеобуча, а затем и организацию студенческого водородного клуба как одну из форм неакадемического образования. Водородный клуб МИРЭА, созданный студентами в 2004 г., участвует в организации и проведении международных симпозиумов “Водородная энергетика будущего и металлы платиновой группы в странах СНГ”, выпускает цветную иллюстрированную газету “Водородоворот”, журнал “Водородный всеобуч” и др. [142].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водородная энергетика как научно-техническое направление, охватывающее проблемы получения, хранения, транспортировки и использования водорода, сформировалась в СССР в 1970-х годах и успешно развивалась на протяжении последующих десятилетий в русле мировых тенденций. При этом был реализован ряд уникальных отечественных разработок, не имеющих аналогов в мире. В современной России технологии водородной энергетики становятся крайне востребованными в связи с ренессансом атомно-водородной энергетики (основой которой является производство водорода с использованием энергии АЭС) и бурным развитием возобновляемой энергетики (требующей высокоэффектив-

ных систем хранения энергии). Наблюдается устойчивая тенденция к переходу от углеводородной энергетики к экологически чистой водородной энергетике, в рамках которой водород — универсальный энергоноситель — становится неотъемлемой частью развития современного общества. Применение наноматериалов и нанотехнологий является инновационной составляющей технологий водородной энергетики и открывает перспективы их широкомасштабного внедрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения о представлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2019-1847 от 04.12.2019 г. (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0243).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козлов С.И., Фатеев В.Н.* Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 520 с.
2. *Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.Н. и др.* // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. № 3 (3). С. 62.
3. Водородная экономика: новые надежды на успех. Аналитический центр при правительстве РФ, 2019. <http://ac.gov.ru/files/publication/a/22861.pdf>
4. *Вестник Атомпрома.* 2019. № 9. http://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2019/12/internet_9_isp.pdf
5. *Гриб Н.* // Нефтегазовая вертикаль. Национальный отраслевой журнал. 2019. № 19. С. 6. <http://www.ngv.ru/upload/iblock/224/224b8a5647503ebe18e4180a43431d41.pdf>
6. Инвестиционный форум “Россия зовет!” 2019. <https://tass.ru/ekonomika/7161985>
7. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года. <https://minenergo.gov.ru/node/1920>
8. *Сорокин П.* Заседание рабочей группы по развитию водородной энергетики в РФ. <https://minenergo.gov.ru/node/16922>
9. Аналитический центр при правительстве РФ, 2019, Энергетический бюллетень. 2019. № 73. <http://ac.gov.ru/files/publication/a/22861.pdf>
10. Сайт энергетического холдинга РусГидро. <http://www.rushydro.ru/press/news/104245.html>
11. *Некрасов А.* Водородные перспективы. <https://plus.rbc.ru/news/5dfc2e607a8aa9fb3e34dbf3>
12. *Fateev V., Grigoriev S.* H2 technologies in Russia (Book Chapter). Hydrogen in an International Context: Vulnerabilities of Hydrogen Energy in Emerging Markets. River Publishers, 2017. P. 171.
13. *Егоров А.* // Корпоративный журнал “Газпром”. 2019. № 9. С. 42. <https://www.gazprom.ru/f/posts/91/915005/gazprom-magazine-2019-9.pdf>

14. Источник: CREON Energy. https://neftegaz.ru/analysis/oil_gas/328834-po-protorennoy-dorozhke/
15. Сайт компании ООО “Айр Техник”. Сферы применения водорода. <https://airtechnik.ru/blog/sfery-primeneniya-vodoroda/>
16. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
17. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – пусть к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2019. 62 с. https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Rus.pdf
18. Солодова Н.Л., Черкасова Е.И., Салахов И.И., Тутубалина В.П. // Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 11–12. С. 39.
19. Ковальчук М.В. Водородная энергетика как составляющая топливно-энергетического комплекса России // Федеральный справочник. Топливо-энергетический комплекс России. 2011. № 10. С. 369. <http://federalbook.ru/files/ТЕК/Soderzhanie/Tom%2010/V/Kovalchuk.pdf>
20. Специальный выпуск “К 70-летию Курчатовского института”. 2013. 36 с. http://www.kuriermedia.ru/data/objects/2225/80_Kurchatov_institut.indd.pdf
21. Stukalov V.A., Subbotin S.A., Shechetina T.D. Hydrogen Energy and Technogenic Hydrogen Cycle as a Basis for Consolidated Development of Fuel Producing and Nuclear Energy Industries. М.: NRC “Kurchatov institute”. <http://isem.irk.ru/symp2010/papers/RUS/S3-09r.pdf>.
22. Rusanov V.D., Fridman A.A., Sholin G.V. // Sov. Phys. Usp. 1981. № 24. P. 447. <https://doi.org/10.1070/PU1981v024n06ABEH004884>
23. Животов В.К. // Инновации. 2006. № 11 (98). С. 112.
24. Источник: Опять водород. <https://www.buran.ru/htm/12-3.htm>
25. Латышенко К.П., Гарелина С.А. // Изв. МГТУ. 2013. № 3 (17). С. 63.
26. Кротов М.Ф., Коробцев С.В., Фатеев В.Н. // Энергия: экономика, техника, экология. 2011. № 12. С. 26.
27. Miller A.I. // Nucl. Eng. Int. 2005. V. 50. № 612. P. 16.
28. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Пахомов В.П. Атомно-водородная энергетика: системные аспекты и ключевые проблемы. М.: Энергоатомиздат, 2008. 107 с.
29. Александров А.П., Пономарев-Степной Н.Н. // Атомной энергетике 20 лет. М.: Атомиздат, 1974. С. 205.
30. Легасов В.А., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н. и др. // Вопр. атом. науки и техн. Сер. Атомно-водородная энергетика. 1976. Вып. 1. С. 5.
31. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я. // Энергия. 2004. № 1. С. 3.
32. Основные проблемы водородной энергетики. Доклад комиссии АН СССР по водородной энергетике. М.: Изд. ИВТАН, 1978.
33. Малышенко С.П., Назарова О.В., Сарумов Ю.А. // Атомно-водородная энергетика и технология. 1986. Вып. 7. С. 106.
34. Малышенко С.П. // Рос. хим. журн. 1997. Т. 41. С. 112.
35. Малышенко С.П., Пригожин В.И., Рачук В.С. // Современное машиностроение. 2009. № 2–3 (8–9). С. 54.
36. Малышенко С.П. Исследования и разработки ОИВТ РАН в области технологий водородной энергетики ОИВТ РАН. Итоги и перспективы. М.: ОИВТ РАН. 2010. Вып. 1. 190 с.
37. Бебелин И.Н., Волков А.Г., Грязнов А.Н., Малышенко С.П. // Теплоэнергетика. 1997. № 8. С. 48.
38. Малышенко С.П., Назарова О.В., Сарумов Ю.А. // Теплоэнергетика. 1986. № 10. С. 43.
39. Малышенко С.П. // Международный научный журнал “Альтернативная энергетика и экология”. 2011. Т. 95. № 3. С. 10.
40. Водородное производство ФКП “НИЦ РКП”. http://www.nic-rkp.ru/default.asp?page=productions_hydrogen_production
41. Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва 1946–1996 гг. М.: Менонсовполиграф, 1996. 670 с.
42. ОАО “Уралкриомаш” “Малая земля Вагонки”. Екатеринбург: СВ-96, 2001. 208 с.
43. Архаров А.М., Кунис И.Д. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / Под ред. Бармина И.В. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 252 с.
44. Черемных О.Я. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Т. 3 (63). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1684>
45. DISCOVERY RESEARCH GROUP <https://marketing.rbc.ru/articles/9910/>
46. Grigoriev S.A., Fateev V.N., Bessarabov D.G., Millet P. // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. In press. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
47. Dincer I. // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37 (2). P. 1954. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
48. Orhan M.F., Dincer I., Rosen M.A., Kanoglu M. // Renew Sustain Energy Rev. 2012. V. 16 (8). P. 6059.
49. Badmaev S.D., Snytnikov P.V. // Int. J. Hydrogen Energy. 2008. V. 33 (12). P. 3026.
50. Samoilo V.A., Kirillov V.A., Shigarov A.B. et al. // Catal. Industry. 2018. V. 10 (4). P. 321.
51. Хрусталева Е. // Энергетика и промышленность России. 2008. № 15–16. С. 107. <https://www.eprus-sia.ru/epr/107/8367.htm>.
52. Semenov N.N. // Russ. Chem. Rev. 1967. № 36 (1). P. 1. <https://doi.org/10.1070/RC1967v036n01ABEH001579>
53. Сороко-Новицкий В.И., Куренин А.К. Об использовании возможности работы двигателя на водороде: Отчет о НИР/МММИ им. М.В. Ломоносова. М. 1935. 87 с.

54. Раменский А.Ю. История развития водородных автомобилей в России. http://www.cleandex.ru/articles/2015/11/06/the_use_of_hydrogen_as_a_fuel_for_cars
55. Раменский А.Ю. Применение водорода в качестве топлива. <https://abs-magazine.ru/article/primeneniye-vodoroda-v%20kachestve-topliva>
56. Ramenskiy A.Yu., Shelichsh P.B., Nefedkin S.I. // Int. Sci. J. Alternative Energy Ecology. 2006. V. 11 (43). P. 63.
57. Бернштейн А. // Техника – молодежи. 1984. № 11. С. 37.
58. Водородный лейтенант: история становления водородных технологий в России http://h2center.ru/index.php?id=8&option=com_content&task=view.
59. X Петербургский междунар. экономический форум 2006 г. http://h2org.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=135&Itemid=114
60. Водородный автомобиль с комбинированной энергоустановкой. http://h2org.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=85&Itemid=118
61. Уникальный самолет Ту-155 с водородным двигателем. <https://uacrussia.livejournal.com/15784.html>
62. “Буран”: первый и единственный. <https://gostec.ru/news/buran-pervyy-i-edinstvennyy/>
63. “Энергия” – “Буран”. <http://www.minspace.ru/Education/edu9phys/buran.html>
64. Глушков С.П., Кочергин В.И., Красников В.В. // Вестн. АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 24.
65. Бризицкий О.Ф., Терентьев В.Я., Кириллов В.А. и др. // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. № 6 (6). С. 25.
66. Певнев Н.Г., Кириллов В.А., Бризицкий О.Ф., Бурцев В.А. // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 3 (15). С. 40.
67. Певнев Н.Г., Понамарчук В.В. // Вестн. СибАДИ. 2016. № 2 (48). С. 75.
68. Iordache I., Bouzek K., Paidar M. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44 (35). P. 19036.
69. Кондратьев Д.Г., Матренин В.И., Овчинников А.Т. и др. // Энергия: экономика, техника, экология. 2009. № 4. С. 12.
70. Ramenskiy A.Y. // Alternative Energy and Ecology (IS-JAEE). 2015. № 20. P. 13.
71. Козлов С.И., Фатеев В.Н. // Транспорт на альтернативном топливе. 2016. № 3 (51). С. 41.
72. Манаев О.И. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2008. № 2 (23). С. 34.
73. Стихин А.С. ФГУП УЭХК, презентация Возможности и применение нанотехнологий в разработке и организации производства энергоустановок на водородном топливе. <http://www.myshared.ru/slide/58566/>
74. Источник: википедия https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82
75. Сайт Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН <http://www.ihte.uran.ru/?p=7741>.
76. Putilov L.P., Demin A.K., Tsidilkovski V.I., Tsiakaras P. // Appl. Energy. 2019. V. 242. P. 1448.
77. Medvedev D., Lyagaeva J., Gorbova E. et al. // Prog. Mater. Sc. 2016. V. 75. P. 38.
78. Romanov I.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A. // Int. J. Appl. Fundamental Res. 2015. № 10. P. 38.
79. Erilin I.S., Agarkov D.A., Burmistrov I.N. et al. // Mater. Lett. 2020. V. 266. Article 127439.
80. Электролизный модуль Уралхиммаша типа СЭУ. <http://vodorod-energy.ru/wp-content/uploads/2017/03/9-1.jpg>
81. Электролизный модуль Уралхиммаша типа ФВ. http://chem.prompages.ru/images/gallery/71_.jpg
82. Козлов С.И., Фатеев В.Н. // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 2 (38). С. 7.
83. Grinberg V.A., Emets V.V., Modestov A.D. et al. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2019. V. 55(2). P. 277.
84. Сайт Крыловского государственного научного центра. <http://krylov-centre.ru/press/news/199/>
85. Grigor'ev S.A., Grigor'ev A.S., Kuleshov N.V. et al. // Thermal Engineering. 2015. № 62 (2). P. 81. <https://doi.org/10.1134/s0040601515020032>
86. Баранов И.Е., Калинин А.А., Коробцев С.В. и др. // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 4. С. 31.
87. Чеберко И. // Известия. 2016. <https://iz.ru/news/611043>
88. Сайт компании AT Energy. <http://atenergy.pro/products/energoobespechenie-bpla.html>
89. Сайт компании ВМPower. <http://bmpower.ru/fuelcel/energoobespechenie-bpla.html>
90. Guterman V.E., Belenov S.V., Alekseenko A.A. et al. // Electrocatalysis. 2018. V. 9 (5). P. 550.
91. Kalinnikov A.A., Pushkareva I.V., Porembskii V.I. et al. // Chemical Problems. 2019. V. 17. № 4. P. 535. <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2019-4-535-545>
92. Baranov I.E., Porembskii V.I., Lyutikova E.K. et al. // Chemical Problems. 2019. V. 17. № 4. P. 489. <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2019-4-489-499>
93. Spasov D.D., Ivanova N.A., Pushkarev A.S. et al. // Catalysts. 2019. V. 9. № 10. P. 803. <https://doi.org/10.3390/catal9100803>
94. Baranov I.E., Grigoriev S.A., Ylitalo D. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2006. V. 31(2). P. 203.
95. Grigoriev S., Fateev V., Pushkarev A. et al. // Materials. 2018. V. 11. № 8. P. 1405. <https://doi.org/10.3390/ma11081405>
96. Novikova K., Kuriganova A., Leontyev I. et al. // Electrocatalysis. 2018. V. 9. № 1. P. 22. <https://doi.org/10.1007/s12678-017-0416-4>
97. Alekseenko A.A., Moguchikh E.A., Safronenko O.I., Guterman V.E. // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. № 51. P. 22885. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.139>
98. Astafev E.A., Ukshe A.E., Manzhos R.A. et al. // Int. J. Electrochem. Sci. 2017. P. 1742. <https://doi.org/10.20964/2017.03.56>
99. Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Grigoriev S.A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40 (42). P. 14492.

100. Fedotov A.A., Grigoriev S.A., Lyutikova E.K. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38(1). P. 426.
101. Novikova K., Kuriganova A., Leontyev I. et al. // Electroanalysis. 2018. V. 9 (1). P. 22.
102. Pushkarev A.S., Solovyev M.A., Grigoriev S.A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.098>
103. Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Du Preez S.P. et al. // Chemical Problems. 2019. V. 17. № 1. P. 9. <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2019-1-9-15>
104. Pushkareva I.V., Pushkarev A.S., Grigoriev S.A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.011>
105. Akel'kina S.V., Pushkarev A.S., Grigoriev S.A. et al. // Russ. J. Electrochem. 2018. V. 54. № 3. P. 251. <https://doi.org/10.1134/S1023193518030023>
106. Varzatskii O.A., Oranskiy D.A., Vakarov S. V. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 46. P. 27894. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.092>
107. Grigoriev S.A., Pushkarev A.S., Pushkareva I.V. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 46. P. 27845. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.048>
108. Grigor'ev S.A., Khaliullin M.M., Kuleshov N.V., Fateev V.N. // Russian J. Electrochem. 2001. V. 37. № 8. P. 819.
109. Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Grigoriev S.A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41 (1). P. 36.
110. Millet P., Grigoriev S.A., Poremskiy V.I. // Int. J. Energy Research. 2013. V. 37 (5). P. 449.
111. Алексин Е.Н. // Перспективы науки. 2010. № 6 (08). С. 63.
112. Сайт компании ООО НПО Поиск. http://poisk-ltd.com/about/about_39.html
113. Yartys' V.A., Burnasheva V.V., Semenenko K.N. // Russ. Chem. Rev. 1983. № 52 (4). P. 299. <https://doi.org/10.1070/RC1983v052n04ABEN002818>
114. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. // Российский химический журнал. 2006. Т. 50. № 6. С. 34.
115. Семененко К.Н., Вербецкий В.Н. // Российский химический журнал. 1993. Т. 37. № 2. С. 70.
116. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В. // Chemical Problems (Kimya Problemleri). 2018. № 4. С. 453. <https://cyberleninka.ru/article/n/problemu-akkumulirovaniya-i-hraneniya-vodoroda>
117. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. // Рос. хим. журн. 2006. Т. L. № 6. С. 5.
118. Tarasov B.P. // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36. № 1. P. 1196.
119. Тарасов Б.П., Володин А.А., Фурсиков П.В. и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 22. С. 30.
120. Тарасов Б.П. Презентация “Хранение водорода для накопления энергии”. <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149860616/%D0%A2%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%91.%D0%92..pdf>
121. Borzenko V., Dunikov D., Malysenko S. // High Temperature. 2011. V. 49 (2). P. 249.
122. Dunikov D., Blinov D. // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45(16). P. 9914.
123. Khayrullina A.G., Blinov D.O., Borzenko V.I. // Energy. 2019. V. 183. P. 1244.
124. Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys' V.A. // Russian Journal of General Chemistry. 2007. V. 77 (4). P. 694.
125. Домашенко А.М., Горбатский Ю.В. Состояние, проблемы и перспективы развития в России инфраструктуры жидкого водорода. — Материалы международного форума “Водородные технологии для производства энергии”. Москва, 6–10 февраля 2006 г. С. 29.
126. Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н. // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 4 (10). С. 68.
127. Шейндлин А.Е., Жук А.З. // Вестн. РАН. 2010. Т. 80. № 3. С. 218.
128. Шейндлин А.Е., Жук А.З. // Рос. хим. журн. 2006. № 6. С. 105. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-alyumovodorodnoy-energetiki-1>
129. Жук А.З., Клейменов Б.В., Школьников Е.И. и др. Алюмоводородная энергетика. М.: ОИВТ РАН, 2007. 278 с.
130. Школьников Е.И. // Экология и жизнь. 2010. № 7. С. 57. https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431264/Chto_takoe_alyumoenergetika
131. Школьников Е.И., Янушко С.А., Тарасова С.А. и др. // Электрохимическая энергетика. 2008. Т. 8. № 2. С. 86.
132. Школьников Е.И., Власкин М.С., Илюхин А.С., Тарасенко А.Б. // Электрохимическая энергетика. 2007. Т. 7. № 4. С. 175. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-svobodno-dyshaschego-toplivnogo-elementa-s-tverdym-polimernym-elektrolitom-v-usloviyah-ogranichennogo-obema>
133. Zhevago N.K., Glebov V.I. // Energy Conversion and Management. 2007. № 48 (5). P. 1554. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.11.017>
134. Zhevago N.K., Denisov E.I., Glebov V.I. // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35. P. 169.
135. Grigor'ev S.A., Grigor'ev A.S., Kuleshov N.V. et al. // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2015. V. 62 (2). P. 81.
136. Grigoriev A.S., Skorlygin V.V., Grigoriev S.A. et al. // Int. J. Electrochemical Science. 2018. V. 13 (2). P. 1822.
137. Grigoriev A.S., Skorlygin V.V., Grigoriev S.A. et al. // Russian Electrical Engineering. 2019. V. 90 (7). P. 505.
138. Doucet G., Etiévant C., Puyenchet C. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2009. V. 34 (11). P. 4983.
139. Ramenskiy A.Yu., Grigoriev S.A., Ramenskaya E.A., Grigoriev A.S. // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42 (33). P. 21250.
140. Сайт Национальной ассоциации водородной энергетики. <http://h2org.ru/>
141. Котляр Ю.А., Шинкаренко В.В. Водородный всеобуч в России. К истории вопроса. Документы. Материалы. Комментарий. М.: АСМИ, 2008. 620 с.
142. Сигов А.С., Шинкаренко В.В., Евдокимов А.А. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2006. №. 6. С. 94.