

Перспективы российской атомной энергетики в водородной экономике

От редакции

Редакция предлагает вниманию читателей статью, посвящённую перспективам водородной энергетики. Если ожидания мирового сообщества в отношении водородной экономики сбудутся хотя бы на 50%, то перед российской атомной энергетикой открываются широчайшие возможности стать лидером в производстве и экспорте водорода. Уже сейчас Европейский союз на грани признания атомной энергетики как приемлемо чистой энергетики.

Андрей КАПЛИЕНКО
Борис ГАБАРАЕВ

О водороде мы все слышали ещё со школьной скамьи. Каждый помнит, что водород – газ без запаха, цвета и вкуса. В результате его соединения с кислородом получается такая необходимая всему живому вода, а в соотношении «два к одному» они образуют так называемый гремучий газ, который взрывается при контакте с огнём или электрической искрой.

Водород вступает в реакцию с водой и множеством других химических элементов. Он плохо растворяется в воде, но охотно растворяется в метал-

КАПЛИЕНКО Андрей Владимирович – доктор технических наук, генеральный директор АО «НИКИЭТ». E-mail: avkaplienکو@nikiet.ru

ГАБАРАЕВ Борис Арсентьевич – доктор технических наук, профессор НИУ МЭИ, Заслуженный энергетик РФ, научный руководитель по научно-технической информации АО «НИКИЭТ». E-mail: boris-gabaraev@yandex.ru

Ключевые слова: глобальное изменение климата, декарбонизация, мировая водородная экономика, водородные топливные элементы, российская ядерная энергетика.

лах, например, в палладии может раствориться до 750 объёмов водорода. В свободном состоянии водород на Земле практически не встречается, за исключением вулканических газов, попутных газов в нефтяных буровых скважинах и т. п. В земной атмосфере свободного водорода почти нет, так как он легко улетучивается в космос.

Водород, подобно многим другим химическим элементам, имеет несколько изотопов, ядра которых, в случае водорода, имеют по одному протону в ядре и различаются числом нейтронов. Из изотопов водорода к природным формам относятся **протий**, ядро которого состоит только из одного протона, **дейтерий** с ядром, состоящим из одного протона и одного нейтрона, и **тритий** с одним протоном и двумя нейтронами.

На долю протия, самого лёгкого из природных изотопов, приходится 99,99% всего водорода. Протий и дейтерий являются стабильными изотопами, в отличие от трития, период полураспада которого составляет 12,3 года. Распад трития происходит с испусканием электрона (так называемый бета-распад), при этом один нейтрон в ядре претерпевает превращение в протон, а химический элемент повышает атомный номер на единицу, становясь гелием-3.

Итак, зная химические и физические свойства водорода, человечество уже много лет применяет водород в самых различных сферах.

Применение водорода

Наиболее широкое применение водороду нашла сама природа. Он является самым распространённым элементом известной части Вселенной. Многие звёзды, в том числе и наше Солнце, наполовину и более состоят из водорода, а межзвёздное пространство заполнено водородом не менее чем на 90%. На нашей планете водород по своей распространённости уступает не только кислороду и кремнию, но входит тем не менее в первую десятку химических элементов.

Так как в свободном состоянии водород на Земле практически не встречается, то его производят из различного водородсодержащего

сырья, прибегая к тем или иным физико-химическим процессам. Современный объём производства водорода составляет, по разным оценкам, 50–70 млн т в год [1].

До недавнего времени наиболее ёмким потребителем водорода являлась химическая промышленность (~ 63%), использующая водород для получения аммиака (53%), метанола (8%), полимеров, полиуретанов и т. д. На втором месте шла нефтехимия (31%), например, нефтеперерабатывающие заводы, которые применяют водород для гидрокрекинга и гидроочистки (обессеривание топлива и т. п.). Далее следовала металлургия (6%), использующая водо-

¹ Развитие водородной энергетики в России (2021). Аналитическое исследование // Группа «Деловой профиль» // URL: https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf

род в качестве восстановителя при получении железа, молибдена, вольфрама и других металлов. Высказываются предположения, что к концу текущего столетия по потреблению водорода металлургия может сравниться с синтезом аммиака и даже превзойти его. Менее 1% водорода использовали в космонавтике (ракетное топливо), полупроводниковой промышленности и на автомобильном транспорте.

Казалось бы, с водородом всё обстоит благополучно, его свойства хорошо известны, он востребован в различных отраслях промышленности и производится в достаточных объёмах.

Однако в последние десятилетия из-за опасений за будущее климата Земли резко активизировалась широчайшая кампания за «декарбонизацию» всего экономического уклада человечества. Главной климатической угрозой признан так называемый парниковый эффект, вызванный накоплением определённых газов в земной атмосфере. По мнению сторонников «парниковой» теории, этот эффект приводит к постепенному повышению температуры атмосферы, которое может стать необратимым и вызывать таяние льдов с катастрофическим повышением уровня воды в Мировом океане, затоплением прибрежных стран и губительными изменениями климата на всей планете.

У «парниковой» теории много оппонентов, полагающих, что вероятность такого развития событий невелика, однако человечество не очень склонно доверять свою судьбу теории вероятности, поэтому правительства многих стран мира вняли опасениям сторонников «парниковой» теории.

В 1992 г. была принята Рамочная Конвенция ООН о предотвращении опасных глобальных изменений климата, согласно которой каждая страна проводила свою национальную политику ограничения выбросов в атмосферу. Для активизации этой Конвенции в 2016 г. подписано Парижское соглашение, реализация которого направлена на то, чтобы «удержать рост глобальной средней температуры «намного ниже» 2 °C и «приложить усилия» для ограничения роста температуры «величиной 1,5 °C». Страны-участники сами определяют свои вклады в достижение декларируемой общей цели в индивидуальном порядке, пересматривают их раз в пять лет, однако при этом не предусматривается никакого механизма принуждения как в отношении декларирования национальных целей, так и в обеспечении обязательности их достижения.

Представитель России подчеркнул: «Мы не рассматриваем отказ от углеводородов в качестве способа снижения выбросов парниковых газов в рамках выполнения взятых на себя обязательств в среднесрочной перспективе. Необходимо искать новые рецепты с учётом текущей и прогнозируемой экономической ситуации, планов социально-экономического развития, учитывать национальные особенности и интересы страны».

Вообще, следует помнить, что из любой глобализации коллективный Запад всегда старается извлечь свою выгоду. Поэтому желательно крайне осторожно брать на себя те или иные обязательства, чтобы их невыполнение вдруг не обернулось какими-то штрафами или санкциями для России. Не хотелось бы уви-

деть Россию в роли медведя из мудрой сказки «Про вершки и корешки».

По состоянию на ноябрь 2021 г. соглашение подписали 194 государства и Европейский союз. Из них 192 государства и ЕС, на долю которых приходится более 98% глобальных выбросов парниковых газов, ратифицировали соглашение или присоединились к нему, включая Китай и США – страны, занимающие первое и второе места по величине выброса CO₂ в атмосферу. Россия должна по этому соглашению снизить к 2030 г. выбросы парниковых газов как минимум до 70% от уровня 1990 г. В 2018 г. уровень выбросов парниковых газов в России составлял 52% от указанного уровня 1990 г.

Авторы работы «Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества [2]» обратили внимание на опубликованный Европейским парламентом в 2021 г. пакет предложений по изменениям в экономике ЕС, позволяющих обеспечить сокращение выбросов парниковых газов к 2030 г. на величину не менее 55% по сравнению с 1990 г., а к 2050 г. стать первым климатически нейтральным континентом. Пакет предложений содержит в том числе правила пограничного углеродного регулирования *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)*. Предполагается, что в рамках механизма СВАМ цена на выбросы углекислого газа будет одинаковой как для продукции европейских производителей, так и для импортных товаров. Казалось бы, всё вполне де-

мократично и никакого намёка на дискриминацию, однако, как говорится, дьявол кроется в деталях. В соответствии с результатами анализа, выполненного конференцией по торговле и развитию ООН, наибольшие риски от введения СВАМ с точки зрения совокупной стоимости экспорта в страны ЕС несут Российская Федерация (9 млрд долл. США) и Китай (7 млрд долл.), для сравнения приведём США (1,8 млрд долл.), Канада (0,6 млрд долл.) и Япония (0,5 млрд долл.).

Европейский союз является одним из ключевых торговых партнёров Российской Федерации. Структурные изменения в экономике ЕС могут привести к изменению условий и структуры экспорта (импорта) товаров и услуг из России, поэтому анализ причин и последствий перехода на водородную экономику является актуальной задачей.

Объявленная правительствами практически всех стран мира война выбросам парникового диоксида углерода под лозунгами «декарбонизации», «углеродной нейтральности» и «низкоуглеродной экономики» привела к кардинальному изменению роли водорода в современном экономическом укладе человечества.

В июле 2020 г. Европейский союз опубликовал Стратегию развития водородной экономики, которая позволит ему достичь поставленной цели по нейтральности к углероду к 2050 г. [2]. Обращает на себя внимание тот факт, что в качестве приоритета ЕС выбрал развитие возобновляемых источников водорода, производимых с использованием

² Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества. СПб.: Научно-технические технологии, 2021.

главным образом энергии ветра и Солнца. Не секрет, что этот выбор основывается на доминировании ЕС в технологиях производства электролизеров, применяемых для получения водорода непосредственно из воды. ЕС рассчитывает выгодно продавать эти аппараты тем странам, которые будут располагать достаточно большой электрогенерацией (например, России) для получения водорода электролизом воды.

Так как до сих пор основными источниками выбросов CO_2 были транспорт и энергетика, то именно в этих сферах водороду предстоит заменить используемое ими углеводородное топливо.

Следует сразу отметить, что прямое сжигание водорода в воздухе вовсе не такое уж безобидное в экологическом отношении, так как из азота в условиях высоких температур горения, непременно присутствующего в воздухе, образуются очень вредные оксиды азота. Поэтому водород лучше сжигать в атмосфере кислорода, а это практически исключено в двигателях внутреннего сгорания. Отсюда крайне ограниченное применение чистого водорода непосредственно в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Куда более приемлемым представляется применение водорода как топлива в топливных элементах – устройствах, реализующих, в первом приближении, процесс, обратный электролизу воды. Если в электролизере посредством использования электричества и воды полу-

чают водород и кислород, то в водородном топливном элементе получают электричество и воду. В этом устройстве нет перемещающихся деталей, благодаря чему достигается высокий уровень коэффициента полезного действия на уровне 50–75%.

Применение топливных элементов на транспорте отнюдь не ограничивается автомобильным транспортом. Они могут применяться на складском транспорте, поездах, авиатранспорте (включая дроны), судах [3, 4].

Так, например, произведённые французской компанией *Alstom* поезда на топливных элементах уже приняты на эксплуатацию в Германии. Они развивают скорость до 140 км/ч, одной заправки водородом им хватает примерно на 1000 км, причём сама заправка занимает всего лишь порядка 15 минут.

Вскоре примеру *Alstom* последовали машиностроительные компании Китая, Германии, Испании и Швейцарии, приступившие к созданию поездов на водородных топливных элементах.

Российские компании Росатом, РЖД и Трансмашхолдинг тоже подписали в 2019 г. соглашение о сотрудничестве и взаимодействии по проекту организации железнодорожного сообщения с применением поездов на водородных топливных элементах. В качестве пилотного полигона для обкатки и дальнейшей эксплуатации таких поездов выбрана железнодорожная инфраструктура острова Сахалин. Госкорпорация «Росатом» организует производство водорода на площадке, предоставленной правительством Сахалин-

³ Новак А. Водород энергия «чистого» будущего // Энергетическая политика. 2021. 15 апреля // URL: <https://energypolicy.ru/vodorod-energiya-chistogo-budushhego/business/2021/13/15/>

⁴ Фотцу Г. Водородный поезд: реальность и перспективы. 2021. 20 апреля // URL: <https://transportnet.ru/vodorodnyj-poezd-realnost-i-perspektivy/>

ской области, а также будет поставлять топливные элементы и другое ключевое оборудование.

Помимо транспорта к новым потребителям водорода как энергоносителя относится электрогенерация, причём как крупномасштабная, так и децентрализованная, используемая в автономном режиме.

Примеры применения водорода в крупномасштабной электрогенерации приведены в работе [2].

Так, в США ещё 2003 г. заявили о планах сооружения по проекту *FutureGen* электростанции мощностью 275 МВт, работающей на продуктах газификации угля. На электростанции предполагалось улавливать и хранить под землёй до 90% CO₂. Электричество должны были вырабатывать топливные элементы на водороде, получаемом в результате газификации угля.

Аналогичный проект под названием *GreenGen* создан в Китае. Строительство первой очереди электростанции мощностью 250 МВт началось в 2008 г. Общая мощность электростанции запланирована на 650 МВт.

Итальянская *Enel* запустила в 2009 г. первую в мире водородную электростанцию мощностью 16 МВт, способную обеспечить энергоснабжение 20 тыс. частных домов и сэкономить 17 тыс. т выбросов CO₂. Следует отметить, что на эту электростанцию водород поступает с нефтеперерабатывающего завода, в связи с чем его трудно считать «зелёным».

Децентрализованная (распределённая) электрогенерация широко применяется в виде автономных энергоустановок на топливных элементах, топливом которых являются водород или углеводороды. Тысячи таких установок уже используются в Японии, США и Европе для обеспечения электро- и теплоснабжения небольших посёлков, частных хозяйств и отдельных потребителей типа супермаркетов или предприятий. Они выгодно отличаются от дизель-генераторов более низким уровнем шума, поэтому их удобно применять в качестве запасных источников электрической энергии при отказе от основного источника электроснабжения.

Производство водорода

По разным источникам информации можно судить о том, что по состоянию на 2020 г. в мире произведено 50–75 млн т водорода, одна треть из которых приходится на Китай. Дальнесрочный прогноз [2] предусматривает к 2100 г. увеличение потребления водорода по сравнению с уровнем 2000 г. в 16–20

раз, причём большая часть этого увеличения (до 80%) связана с использованием водорода как топлива и энергоносителя, из которого порядка 70% будет использоваться на нужды автотранспорта.

Среднесрочный прогноз [5] предсказывает к 2050 г. десятикратное увеличение потребности водородной

⁵ Пономарев-Степной Н. Н., Алексеев С. В., Петрунин В. В. [и др.]. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа // Газовая промышленность. Энергоснабжение и энергосбережение. 2018. № 11.

экономики в водороде и снижение выброса CO_2 на 25%.

В любом сценарии развития водородной экономики требуется многократное увеличение производства водорода. Структура мирового производства водорода свидетельствует о том, что 85% водорода получают из природного газа (главным образом метана), 7% из нефти, 4% из угля и 4% из электролиза воды [2].

Из указанных способов получения водорода строгому критерию «нулевой углеродности» отвечает только электролиз воды, но он требует самого большого расхода электроэнергии. При этом сама электроэнергия тоже должна иметь «нулевой углеродный след», т. е. получена только из возобновляющихся источников электроэнергии (ВИЭ), какими на сегодня являются ветровые (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции, а также гидроэлектростанции (ГЭС).

Потенциал ГЭС во многих странах уже исчерпан, к тому же эти электростанции требуют отчуждения (затопления) больших земельных участков и представляют большую опасность в случае разрушения их плотины из-за землетрясения или внешнего воздействия (диверсия, военные действия и т. д.). Кроме того, сам процесс получения материалов для их сооружения неизбежно связан с весьма ощутимым «углеродным следом».

Потенциал ВЭС и СЭС также уже исчерпан во многих развитых странах с небольшой территорией (особенно в Европе), так как эти электростанции тоже требуют, как и ГЭС, отчуждения больших площадей. С учётом соблюдения расстояния между башнями ВЭС для их разме-

щения в европейской стране требуется около 35% территории.

Кроме того, энергетический кризис североамериканского штата Техас зимой 2021 г., случившийся из-за отключений замёрзших ВЭС и СЭС, свидетельствует о низкой надёжности ВИЭ ввиду их сильной зависимости от природных аномалий. Также следует отметить, что производство материалов для сооружения ВЭС и СЭС неизбежно связано с весьма ощутимым «углеродным следом».

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), на единицу установленной мощности ВЭС требуется в девять раз больше минеральных ресурсов, чем для газовой электростанции. На создание электромобиля уходит в шесть раз больше полезных ископаемых, чем на автомобиль такой же мощности с бензиновым двигателем.

Таким образом, даже так называемый «зелёный» водород, произведённый электролизом воды с использованием электрической энергии, которая получена из ВИЭ, трудно увязать с «нулевым углеродным следом». Более уместно было бы говорить о «низкоуглеродной» водородной энергетике. В таком случае «зелёному» водороду можно приписать минимальный возможный углеродный след. Водород иных цветов пока стоит в разы дешевле «зелёного». Водороду, который в нормальных условиях является бесцветным газом, приписывают тот или иной цвет в зависимости от способа его получения.

Например, в работе различают:

– «зелёный» водород (безуглеродный) – электролиз с использованием электроэнергии от возобновляемых источников энергии (ВЭС и СЭС);

– «жёлтый» водород (безуглеродный) – электролиз с использованием электроэнергии от атомных электростанций (АЭС);

– «бирюзовый» водород (малоуглеродный) – пиролиз природного газа (метана);

– «голубой» водород (среднеуглеродный) – паровая конверсия метана (ПКМ) или газификация угля с утилизацией CO_2 (секвестрация углекислого газа (CCS) – применение технологии его улавливания и изоляции);

– «серый» водород (высокоуглеродный) – паровая конверсия метана (ПКМ) без секвестрации углекислого газа, т. е. с выбросом CO_2 в атмосферу;

– «бурый» водород (высокоуглеродный) – газификация или паровая конверсия угля без секвестрации углекислого газа, т. е. с выбросом CO_2 в атмосферу [6].

Цвета водорода перечислены в порядке убывания его себестоимости в расчёте на один килограмм его массы. Конкретные значения цены одного и того же водорода сильно разнятся в зависимости от страны-производителя (цена природного газа метана, угля и электроэнергии), выбранной технологии, используемого оборудования и принятой ценовой политики.

В России с её дешёвым природным газом и углём издержки на производство одного килограмма «голубого» водорода в 2019 г. составили около 0,4 долл., тогда как один килограмм «зелёного» водорода обошёлся в 6,7 долл. [1].

Ясно, что при таком соотношении издержек никакой разумной мо-

тивацией невозможно заставить бизнес перейти на «зелёный» водород. Производство «серого» и «бурого» видов водорода обходится ещё дешевле, чем «голубого». Поэтому о переходе мировой экономики к чисто «водородному» укладу в 2050 г. и мечтать не приходится.

Возможность сооружения ВЭС и СЭС ограничены располагаемыми под отчуждение земельными площадями, возможными запасами требуемых материалов (редкие металлы, медь и т. п.) и другими факторами. В лучшем случае европейские страны могут рассчитывать на импорт «зелёного» водорода из стран третьего мира, в которых много свободных земельных площадей под сооружение ВЭС и солнечных дней для СЭС, однако это обойдётся им очень недёшево.

Производство «серого» и «бурого» видов водорода мало чем отличается по выбросу углекислого газа от нынешней углеводородной энергетики, и ещё какое-то время их можно применять для удовлетворения текущих потребностей химической промышленности, нефтепереработки и металлургии в водороде.

Например, при реализации паровой конверсии метана половина его идёт не на собственно производство водорода, а на сжигание для получения требуемых высоких температур, приводящее к выбросу большого количества углекислого газа в атмосферу. Этот принципиальный недостаток получения «серого» водорода пытаются устранить, прибегнув при получении «голубого» угля к секвестрации углекислого

⁶ Кантемиров В. Энергетика 2.0 и «Водородная долина» России // Военное обозрение. 2021. 4 февраля // URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.htm>

газа (CCS) посредством его улавливания и изоляции. Однако улавливание CO_2 пока ещё находится на стадии поиска, а его изоляция посредством растворения в океанских глубинах, хранение в подземных полостях или закачивание в нефтегазоносные пласты с целью вытеснения углеводородов вызывает большие вопросы по безопасности, особенно по возможным крупномасштабным прорывам CO_2 в атмосферу при разрушительном землетрясении.

Какую-то часть CO_2 возможно использовать для получения полезных материалов в следующих процессах [7]:

- конверсия CO_2 , извлечённого из воздуха, в метиловый спирт;
- превращение CO_2 в аналог синтетического дизельного топлива;
- каталитическое превращение CO_2 в сырьё для производства пластиков, резины, красок и искусственной кости;
- нанотехнологическое превращение CO_2 с помощью солнечной энергии и воды в метан;
- превращение CO_2 в безвредный карбонат кальция (мел) с помощью никелевого катализатора;
- получение экологичного бетона CO_2 NCRETE из смеси извести и CO_2 , выбрасываемого электростанциями.

Эти технологии представляют большой интерес, но они не в состоянии вовлечь в сферу своего действия сколько-нибудь значимую долю антропогенного выброса CO_2 в атмосферу.

Таким образом, даже грядущей водородной экономике придётся

хоть на какой-то переходный этап смириться с «низкоуглеродным следом» водородной энергетики.

Какого же цвета водород позволит обеспечить данный этап?

Как уже было отмечено, безуглеродный «зелёный» электролизный водород (ВЭС И СЭС) не «потянет» эту роль из-за ресурсных ограничений указанных электростанций. Кроме того, электролиз требует много пресной воды (порядка суммарного стока нескольких крупных рек Европы), ресурсы которой в европейских странах также ограничены.

Безуглеродный «жёлтый» электролизный водород (производимый на АЭС) практически не имеет ресурсных ограничений в случае использования реакторов на быстрых нейтронах, но не «проходит» по экономике при современных пока ещё сравнительно высоких ценах электрической энергии и электролизного оборудования, пока ещё низкой эффективности этого оборудования. Отметим, что время работает на атомно-водородную энергетику, снижаются цены электрической энергии и электролизного оборудования, совершенствуются электролизные технологии, идёт поиск эффективных катализаторов и электролитов. Вполне ожидаемо, что в какой-то среднесрочной перспективе «жёлтый» водород станет конкурентоспособным и реально превратится в крупномасштабную опору водородной экономики.

Однако у российской ядерной энергетики есть не только эта среднесрочная перспектива активного участия в водородной экономике.

⁷ Нечаева Э. В поисках решения проблемы утилизации углекислого газа // livejournal. 2017. 30 августа // URL: https://coal_liza.livejournal.com/17054.html

Разрабатываемые в России газо-охлаждаемые энергетические реакторы (ВТГР), в которых температура теплоносителя может достигать порядка 900 °С, могут исключить, благодаря своему высокопотенциальному теплу, необходимость сжигания природного газа метана при получении среднеуглеродного «голубого» водорода. При таком подходе снижается расход метана, уменьшаются издержки на секвестрацию образующегося CO₂.

Россия имеет многолетний опыт разработки ВТГР, достигнутый опыт разработки соответствующих технологий позволяет приступить к созданию атомных энерготехнологических станций (АЭТС), состоящих из ядерной части (ВТГР) и неядерной части (ХТЧ – химико-технологическая часть). Подобные комплексы могут уже в ближней перспективе стать атомно-водородной составляющей энергетики предстоящей водородной экономики мира [6].

Достаточно сложно судить, насколько оправданы экологические страхи сторонников немедленного перехода к водородной экономике с неременной декарбонизацией.

Понимают ли поборники нового уклада, какие сложные вопросы предстоит решать при этом в области безопасности, экологии, экономики, инфраструктуры и т. п. Однако, как говорится, если не можете остановить какое-то движение, то надо его возглавить. Россия имеет все предпосылки к тому, чтобы стать одним из лидеров этого движения, так как располагает достаточными ресурсами земельных площадей, углеводородов, пресной воды, полезных ископаемых и хорошими заделами в области высоких технологий.

Атомно-водородная энергетика России имеет хорошие шансы как в ближней перспективе за счёт возможности крупномасштабного производства среднеуглеродного «голубого» водорода путём паровой конверсии метана на специальных атомных энерготехнологических станциях или газификации угля с применением тепла от высокотемпературных реакторов.

Она также имеет хорошие шансы и в среднесрочной перспективе, когда со временем в результате динамики технических и экономических факторов будет достигнута конкурентоспособность получения водорода за счёт электролиза воды. В этом случае использование электрической энергии, вырабатываемой на российских энергетических ядерных реакторах, обеспечит получение безуглеродного «жёлтого» водорода в любом требуемом количестве.

Библиография • References

Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненасhev А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества. СПб.: Научно-технологии, 2021. – 151 с.

[Beloborodov S. S., Gasho E. G., Nenashev A. V. Vozobnovlyaemye istochniki energii i vodorod v energosisteme: problemy i preimushchestva. SPb.: Naukoyomkie tekhnologii, 2021. – 151 s.]

- Кантемиров В.* Энергетика 2.0 и «Водородная долина» России // Военное обозрение. 2021. 4 февраля // URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.htm>
- [*Kantemirov V.* Energetika 2.0 i «Vodorodnaya dolina» Rossii // Voennoe obozrenie. 2021. 4 fevralya // URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.htm>]
- Нечаева Э.* В поисках решения проблемы утилизации углекислого газа // livejournal. 2017. 30 августа // URL: https://coal_liza.livejournal.com/17054.html
- [*Nechaeva E.* V poiskah resheniya problemy utilizacii uglekislogo gaza // livejournal. 2017. 30 avgusta // URL: https://coal_liza.livejournal.com/17054.html]
- Новак А.* Водород энергии «чистого» будущего // Энергетическая политика. 2021. 15 апреля // URL: <https://energypolicy.ru/vodorod-energiya-chistogo-budushhego/business/2021/13/15/>
- [*Novak A.* Vodorod energiya «chistogo» budushchego // Energeticheskaya politika. 2021. 15 aprelya // URL: <https://energypolicy.ru/vodorod-energiya-chistogo-budushhego/business/2021/13/15/>]
- Пономарев-Степной Н. Н., Алексеев С. В., Петрунин В. В.* [и др.]. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа // Газовая промышленность. Энергоснабжение и энергосбережение. 2018. № 11. С. 94–102.
- [*Ponomarev-Stepnoj N. N., Alekseev S. V., Petrunin V. V.* [i dr.]. Atomnyj energotekhnologicheskij kompleks s vysokotemperaturnymi gazoohlazhdaemymi reaktorami dlya masshtabnogo ekologicheskogo chistogo proizvodstva vodoroda iz vody i prirodnogo gaza // Gazovaya promyshlennost'. Energосnabzhenie i energosberezhenie. 2018. № 11. S. 94–102]
- Развитие водородной энергетики в России (2021). Аналитическое исследование // Группа «Деловой профиль» // URL: https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf
- [*Razvitie vodorodnoj energetiki v Rossii* (2021). Analiticheskoe issledovanie // Gruppya «Delovoj profil» // URL: https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf]
- Фотиу Г.* Водородный поезд: реальность и перспективы. 2021. 20 апреля // URL: <https://transportinet.ru/vodorodnyj-poezd-realnost-i-perspektivy/>
- [*Fotiu G.* Vodorodnyj poezd: real'nost' i perspektivy. 20 aprelya // URL: <https://transportinet.ru/vodorodnyj-poezd-realnost-i-perspektivy/>]

Статья поступила в редакцию 2 августа 2022 г.