

УДК 662.769

БУДУЩЕЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ж.А. Кулекеев, Г.К. Нуртаева

В статье рассматриваются основы водородной энергетики, развитию которой в последнее время уделяется большое внимание в мире как в связи с ограниченностью природных запасов углеводородов, так и в связи с проблемой увеличения выбросов углекислого газа в атмосферу, обусловленной применением углеродсодержащих топлив.

Рассмотрены как положительные, так и отрицательные стороны водородной энергетики, возможные направления развития. Приведены перспективы использования водородного топлива.

Ключевые слова: водород, водородная энергетика, топливные элементы.

Введение

Одним из главных недостатков традиционного способа получения энергии путем использования углеводородных топлив (бензина, керосина, мазута, солянки, угля и др.) является увеличение нагрузки на окружающую среду в связи с выделением углекислого газа в процессе их сжигания. Углекислый газ, относящийся к парниковым газам, способствует повышению температуры нижних слоев атмосферы планеты, следствием которого является глобальное, связанное с потеплением, изменение климата.

В связи с этим мировые инвесторы стали менять своё отношение к энергетическим отраслям, отдавая предпочтение альтернативным низкоуглеродным источникам энергии, основанным на источниках энергоресурсов – биомассе, биогазе и иных топливах из органических отходов. Учитывая новые тенденции в энергетической отрасли, ООН в 2005 г. разработала основные принципы ответственного инвестирования ESG (Environmental, Social and Governance, или «Окружающая среда, социальная сфера и управление»). По мере роста популярности ESG появились основные критерии определения ответственного инвестора и специальные рейтинги компаний, показывающие их отношение к окружающей среде и общим проблемам обществу.

На сегодня известно, что все крупные инвесторы (более 3000) с общими активами управления на сумму более 110 трлн долл. США подписали принципы ответственного инвестирования, и их число с каждым днём растёт. Эти ответственные инвесторы одним из перспективных направлений энергетики будущего выбрали развитие технологий водородных топливных элементов и выразили готовность вложить огромные ресурсы в эту отрасль.

В этой связи нет сомнений в том, что огромные деньги, вложенные в развитие технологии, обеспечат технологический прорыв, и в результате водород реально станет потенциальной энергией будущего.

В июле текущего года Европейский союз представил водородную стратегию, которая названа одним из самых амбициозных планов развития энергетики за всю историю. В новой водородной стратегии ЕС изложены планы по установке 40 ГВт электролизеров в пределах региона, а также поддержке разработок ещё 40 ГВт «зелёного» водорода в соседних странах, которые имеют возможность экспортировать региональную электростанцию. О своих, не менее грандиозных, планах объявили Австралия и Канада, отметив, что ускорят разработку некоторых из крупнейших в мире ветряных и солнечных проектов, направленных на производство «зелёного» водорода [1, 9]. Думаем, что это только начало предстоящих масштабных работ.

В настоящее время возобновляемые источники «зелёной» энергетики занимают скромное место в мире, о чем свидетельствуют данные рис. 1, представляющие распределение первичной энергии за 2019 г. по данным British Petroleum (BP) [2].

Данные BP показывают, что по-прежнему основным источником энергии всё ещё остаётся нефть, на долю которой приходится 33%, а возобновляемые источники энергии занимают 5%, но рост возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) в 2019 г. по сравнению с 2018 г. составляет 20%, с увеличением их доли в мире на 1%.

Казахстан так же, как и большинство стран мира, стал активным участником Парижского соглашения с момента его ратификации Парламентом страны 27 октября 2016 г. и добровольно взял от-



Рисунок 1. Распределение первичной энергии в мире за 2019 г., в эксаджоулях

ответственность по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу. В стране начата огромная работа по реагированию на мировые и локальные энергетические проблемы, ведущие к изменению климата на земном шаре. Например, в Казахстане действует специальный закон «О поддержке использования возобновляемых источников энергии», согласно которому осуществляется «государственное регулирование использования возобновляемых источников энергии в целях создания благоприятных условий для производства электрической и (или) тепловой энергии с использованием ВИЭ для снижения воздействия на окружающую среду и увеличения доли использования возобновляемых источников энергии при производстве электрической и (или) тепловой энергии» [3]. В настоящее время готовится новая редакция Экологического кодекса, который полагает предусмотреть ряд новых норм, направленных на ужесточение контроля за выбросами парниковых газов. Кроме того, наша страна проводит последовательную работу в соответствии с требованиями подписанного Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [4, 5].

Водородная энергетика является одним из видов возобновляемых источников энергии. В течение почти 20 лет ведущие мировые энергетические компании работают над вопросами возможного применения водорода как альтернативного топлива в глобальной системе будущего энергопотребления, поэтому исследования, связанные с развитием технологии водородной

энергетики, получают поддержку не только на уровне правительств, но и крупнейших энергетических автомобильных и других технологических компаний.

В данной статье рассмотрим отдельные проблемы водородной энергетики и некоторые её отличия от традиционной, основанной на ископаемых топливах.

Сравнение водородной энергетики с традиционной углеводородной энергетикой

Углеводородная, или углеродная, энергетика основана на использовании нефти, газа, угля, кокса, сланцев и др. В нефтегазовой отрасли традиционно подразделяют направления upstream (добыча нефти и газа) и downstream (транспортировка, переработка и использование продукции). В водородной энергетике этап upstream отсутствует.

Водород, наиболее распространенный химический элемент как во Вселенной (93% ат.), так и на Земле (5,52% ат.), является самым лёгким из элементов периодической таблицы. Но в чистом виде водород не встречается в природе, поэтому в сравнении с ископаемым топливом (нефтью, природным газом, углём), которое является первичным, водород считается вторичным, поскольку его нужно получить из других соединений, таких как нефть, природный газ и вода.

Водород при сжигании в чистом кислороде дает тепло, а остатком сгорания является вода. В этом заключается главное преимущество водорода как экологи-

чески чистого топлива перед углеродными топливами, которые при сжигании образуют ещё и углекислый газ. В зависимости от используемой технологии получения и нагрузки на окружающую среду водород принято обозначать разными цветами. Водород считается самым чистым, или «зелёным», если в процессе его получения на 100% не было обеспечено выбросов углекислого газа. Таким образом, самой чистой, или «зелёной», является технология получения водорода из воды с использованием энергии солнца и ветра. Если водород получен с использованием углеводородных топлив, то это – «серый» водород. В случае, когда используется природный газ и продукты сжигания утилизируются, то полученный водород называют «голубым».

Удельная теплота сгорания водорода более чем в 3 раза выше, чем у нефти, бензина, керосина, природного газа. Для сравнения: у водорода – 141,1 МДж/кг, бытового газа – 46,1 МДж/кг, пропана-бутана (баллонного) – 43,8 МДж/кг, бензина – 43,6 МДж/кг, нефти – 41 МДж/кг [6]. Но если перевести эти значения на единицу объема для газообразных веществ, то получим следующие данные теплотворной способности в МДж/м³ при 0°С и 101,3 кПа: бутан – 124 МДж/м³, бытовой газ – 15,9 МДж/м³, водород – 10,8 МДж/м³, метан – 35,9 МДж/м³ [6].

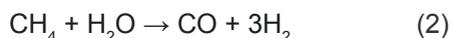
И ещё одно преимущество водорода – это практически не ограниченная и доступная во всех регионах мира сырьевая база водорода, при условии получения его из воды. На нынешнем этапе развития технологий производство чистого «зелёного» водорода является очень затратным, по сравнению даже с технологией получения «голубого» водорода из углеводородов. По оценкам экспертов, в странах с дешевым газом себестоимость получения 1 кг «голубого» водорода из газа находится в пределах от 1 до 1,5 долл. США, а «зеленого» водорода с использованием альтернативных экологичных источников энергии – от 4 до 5 долл. США. Несмотря на это, только технология получения «зелёного» водорода развитыми странами рассматривается как приоритетное направление энергоперехода на самый экологичный источник энергии будущего.

Минусами водородной технологии являются высокие цены, трудности хранения и транспортировки водорода, но в последнее время многие страны и крупные энергетические компании объявили о готовности к масштабной эксплуатации систем водородной энергетики.

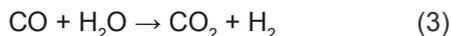
Производство водорода

В настоящее время мощности по производству водорода в мире оцениваются в 75 млн т/г. [7].

Более 90% водорода получают в процессах риформинга метана, который включает использование высокотемпературного пара для производства водорода из природного газа, являющегося источником метана. Риформинг проводят либо с использованием углекислого газа (называется углекислотной конверсией или «сухим риформингом» метана) по реакции (1), либо с использованием пара по реакции (2).



Паровой риформинг метана сопровождается реакцией конверсии монооксида углерода (3):

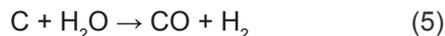


Паровой риформинг возможно использовать и для других углеводородов. В результате риформинга которых образуется водород:



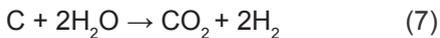
Этот метод в настоящее время является самым дешевым и наиболее эффективным методом производства водорода и может сочетаться с технологиями улавливания и хранения углерода для снижения выбросов углерода, образующихся в процессе производства водорода [8].

Водород получают также из угля или биомассы с использованием высокотемпературного пара и кислорода в газификаторе под давлением, например, пропуская пары воды над раскаленным углем при температуре около 1000°С:

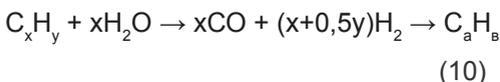


Это один из самых ранних методов получения водорода.

Также можно проводить газификацию угля, одним из газообразных продуктов которой является водород. Этот метод газификации топлива получил название CTL (coil-to-liquid). Реакции, лежащие в основе газификации:



Во всех этих методах водород образуется совместно с монооксидом углерода CO, смесь которого с водородом получила название синтез-газа, широко используемого в производстве синтетической нефти (GTL – gas-to-liquid) по следующей реакции:



Один из самых дорогих на сегодня методов получения водорода – это получение водорода электролизом воды.



Следует отметить широкое разнообразие процессов получения водорода, однако все эти методы энергозатратны, поэтому идеальным вариантом будет получение водорода с применением энергии возобновляемых источников, например, энергии солнца или ветра: в этом случае и процесс производства, и последующее использование водорода для выработки энергии не приведут к выбросам парниковых газов.

На рис. 2 показано соотношение количества водорода, получаемого в данное время разными методами.



Рисунок 2. Структура мирового производства водорода в 2019 г. [5]

В настоящее время на получение водорода по любому из вышеуказанных 3 методов затрачивается энергия, получаемая с использованием углеводородсодержащих видов топлива. Получается, что мы затрачиваем одно топливо, при сжигании которого имеем выбросы CO₂ в атмосферу, ради получения другого, имеющего нулевой выброс и поэтому считающегося менее безопасным для окружающей среды.

Для того, чтобы снизить затраты классического топлива на получение водорода, в Водородной стратегии Евросоюза, опубликованной в этом году [9], предлагается осуществить разработку возобновляемого, или «зелёного», водорода (renewable

hydrogen), производимого в основном с использованием энергий ветра и солнца. Но в краткосрочной и среднесрочной перспективе необходимы другие формы низкоуглеродного водорода (low-carbon hydrogen) для быстрого сокращения выбросов и поддержки развития жизнеспособного рынка. Такой же подход принят и в Водородной стратегии Германии, которая недавно была опубликована [10].

Исследовательская компания BloombergNEF опубликовала отчет по перспективам водородной экономики (Hydrogen Economy Outlook) [11], в котором утверждается, что до 2050 г. в большинстве регионов мира с помощью солнечной

и ветровой энергий можно будет производить водород по цене 0,8 до 1,6 долл. США/кг, что примерно соответствует текущим ценам на природный газ в энергетическом эквиваленте. Стоимость может быть ещё ниже в богатых возобновляемыми источниками энергии странах.

В этом случае к 2050 г. водородом будет обеспечено 24% мировых потребностей в энергии, глобальные выбросы от ископаемого топлива в промышленности уменьшатся на треть. Однако для этого

придётся выполнить ряд условий, одним из основных является политическая поддержка, поддержка на уровне крупных технологических компаний производителей и потребителей водородного топлива.

Потребление водорода

Структура потребления водорода в наше время представлена на рис. 3. Как видно, больше всего водород используют нефтепереработка и химическая промышленность.

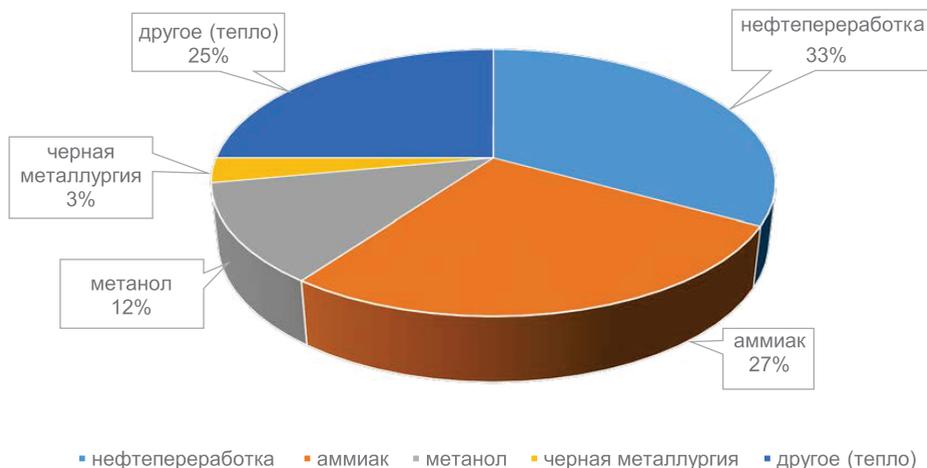


Рисунок 3. Структура мирового потребления водорода в 2019 г. по данным работы [12]

В нефтепереработке водород используется в процессах гидрокрекинга, гидроочистки для повышения качества углеводородных топлив с повышенной теплотворной способностью и уменьшенными вредными выбросами от их сжигания [12].

В химической промышленности водород используется в разных процессах органического синтеза, в частности, при получении метанола, а также в синтезе аммиака (27%), который используется при производстве минеральных удобрений [6]. Однако, как видно из рис. 3, уже 25% водорода используется в качестве топлива.

Идея использования водорода в качестве топлива привела к появлению топливных элементов, похожих на электрохимические устройства, работающие на принципах гальванического элемента, но отличающиеся тем, что вещества для электрохимической реакции не содержатся внутри, а подаются извне [8, 14].

В работе Т.В. Поляковой представлена схема работы топливного элемента (рис. 4): Как видно из рис. 4, топливо (во-

дород) и окислитель (кислород) подаются на электроды, разделенные электролитом, водород не сгорает, а окисляется с образованием воды, в результате выделяется энергия.

Поскольку в топливном элементе химическая энергия напрямую превращается в электрическую, минуя фазу тепловой энергии, коэффициент полезного действия топливных элементов может достигать 90%.

В сравнении с гальваническим элементом, имеющим ограниченный срок службы, связанный с количеством реагирующих веществ, в топливном элементе реакция может протекать по времени так долго, как долго поступают внутрь топливо и окислитель. Само топливо хранится в специальных емкостях или картриджах, которые могут быть сменными или заправляться на специальных заправочных станциях. Теперь, что касается подобных топливных элементов, то они уже применяются в самых разных сферах. Приведем только один пример.

В 2019 г. в Сингапуре запущено трех-

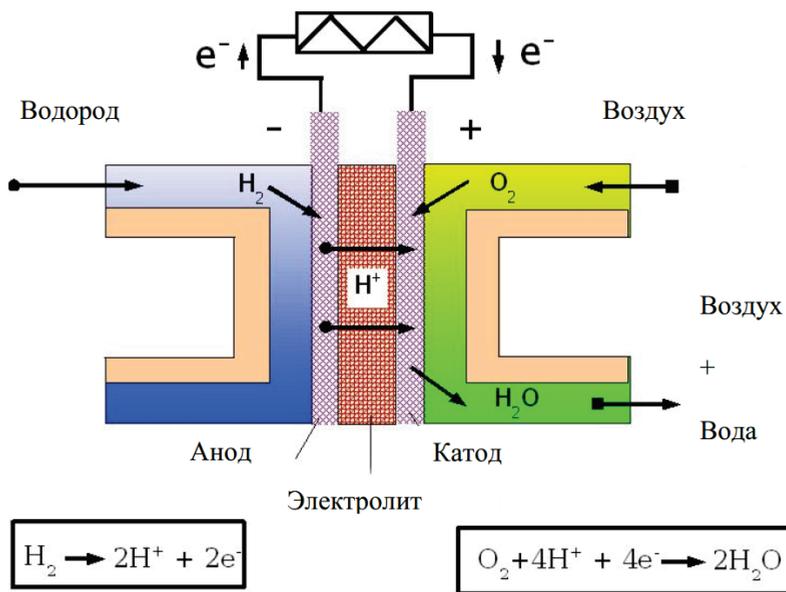


Рисунок 4. Принцип работы топливного элемента

этажное здание учебного центра, работающее полностью на водородных топливных элементах с нулевым выбросом. Здание не подключено к электросети. Для выработки первичной электроэнергии используются солнечные батареи, которые затем применяются в процессе электролиза для производства водорода. Полученный по такой технологии водород хранится в специальных резервуарах, где он связывается с порошками металлических сплавов, с образованием гидрида металла. Когда появляется потребность в электричестве, часть накопленного водорода выделяется и, проходя через топливные элементы, производит необходимое электричество на месте. Эта водородная система была разработана SP Group совместно с компанией Marubeni Corporation и Университетом Тохоку в Японии [15].

Заключение

Отрасль водородной экономики развивается быстрыми темпами, создавая множество новых рабочих мест во всем мире, конечно, растёт и количество новых проектов. В этот процесс вовлечены практически все крупные нефтегазовые компании, автомобильные концерны, крупные технологические компании.

Так, коалиция 19 ведущих нефтегазовых, автомобильных компаний, компаний по производству топливных элементов и водорода (включая Chevron, Shell, Engie, Hyundai, Microsoft, Toyota и Daimler AG)

выпустила отчет «Дорожная карта водородной экономики США» [16], в котором приведены прогнозные объемы выручки за счет продажи водородной энергии и число создаваемых в этой отрасли новых рабочих мест. Утверждается, что применение водорода только в США к 2030 г. даст выручку в 140 млрд долл. США в год, будут созданы 700 000 рабочих мест, а к 2050 г. выручка возрастет до 750 млрд долл. США в год и будет создано 3 400 000 рабочих мест.

Нефтегазовые компании Shell, Gasunie и Groningen Seaports запустили проект North2, направленный на производство экологически чистого, «зелёного» водорода, с использованием возобновляемых источников. При этом проект нацелен на производство «зелёного» водорода за счет использования возобновляемой электроэнергии, вырабатываемой прибрежной ветряной электростанцией мощностью 3–4 ГВт: её запуск ожидается в 2030 г., к 2040 г. её мощность должна вырасти до 10 ГВт [17].

В настоящее время во многих странах мира стало уделяться серьёзное внимание развитию технологии чистой водородной энергетики. Борьба за лидерство в этой отрасли осуществляется между такими странами, как Китай, Япония, Корея, Канада, Австралия, Европа и США, которые уже выделяют огромные финансовые ресурсы и создают необходимые инфраструктуру для развития водородной энергетики.

Эксперты полагают, что технологические и масштабные преимущества энергетического и транспортного секторов США могут сделать США будущим лидером в мировой водородной экономике [18].

Недавно российское правительство утвердило план мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 г., который предусматривает создание межведомственной рабочей группы и проектного офиса в 2021 г., в задачи которых входят проблемы развития новой отрасли энергетики, также определен перечень пилотных проектов. В число пилотных проектов вошли газовые турбины на метановодородном топливе, опытные образцы железнодорожного транспорта, установки по производству водорода без выбросов углекислого газа. Кроме того, принято решение о составлении реестра передовых технологий в этой сфере, а также тем перспективных научных исследований, охватывающих проблемы получения, хранения и перевозки водорода и пр. [19].

Но сейчас главное не то, кто из этих стран будет лидером в мировой водород-

ной энергетике, более важно – и это уже непреложный фактор – то, что водородная энергетика будет лидировать среди секторов будущей мировой энергетической системы. И важно, чтобы Казахстан тоже включился в развитие стратегически важной энергетической отрасли – водородной энергетики. Важность данной отрасли в нашей стране не раз отмечалась в программных документах, однако серьезный прогресс в деле не был достигнут. Например, Государственная программа развития науки Республики Казахстан на 2007–2012 гг., утвержденная Указом Президента №348 от 20 июня 2007 г., содержала 6 приоритетных направлений, в числе которых числилось развитие технологии получения водорода, но этот приоритет был незаслуженно предан забвению. Теперь, с учётом новых мировых трендов развития мировой энергетики, нам следует вернуться к исследованию проблем водородной энергетики, включив её в число приоритетных направлений науки, а также приступить к подготовке квалифицированных специалистов.

Список использованной литературы

1. Australia Could Lead The \$11 Trillion Hydrogen Boom. – <https://oilprice.com/Alternative-Energy/Fuel-Cells/Australia-Could-Lead-The-11-Trillion-Hydrogen-Boom.html>.
2. Материалы сайта <https://www.bp.com/>.
3. Закон Республики Казахстан «О поддержке использования возобновляемых источников энергии (с изменениями и дополнениями по состоянию на 28.12.2018 г.). – Утв. 4 июля 2009 г., № 165-IV ЗРК.
4. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (с изменениями от 17.11.2006 г.). – Киото, 11 декабря 1997 г.
5. О ратификации Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Закон РК от 26 марта 2009 г. № 144-IV.
6. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике. Учебное пособие. – Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2014, 234 с.
7. Водородные перспективы. – Материалы партнерских проектов РБК+. <https://plus.rbc.ru/news/>.
8. Полякова Т.В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики. – Вестник МГИМО, 2012, № 1, с. 156–163.
9. A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe. – Brussels, EU, 2020.
10. Amelang S. Germany's National Hydrogen Strategy. – Jun. 2020. <https://www.cleanenergywire.org/>.
11. Hydrogen Economy Outlook. Key messages. – Bloombergnef, March, 2020, 14 p.1.
12. Водородная экономика: новые надежды на успех. – Энергетический бюллетень. Аналитический центр при Правительстве РФ, 2019, № 73, с. 14–18.
13. Liebreich M. Separating Hype from Hydrogen – Part One: The Supply Side. – Okt., 2020. <https://www.bloombergnef/>.
14. Полякова Т.В. Состояние и перспективы водородной энергетики в России и в мире. Аналитическая записка. – МГИМО, 2009. https://mgimo.ru/files/120132/polyakova_vodorod.pdf.
15. Road Map To A Us Hydrogen Economy. Executive summary. <http://www.ushydrogenstudy.org/>.
16. Channel News Asia. SP Group launches first zero-emission building in Southeast Asia powered by green hydrogen. – 30 October 2019. <https://www.channelnewsasia.com>.

17. Shell начинает крупнейший в Европе проект по производству зеленого водорода. – 27 февраля 2020 г. <https://elektrovesti.net/>.

18. Joyce M., Mahal K. The Emerging Hydrogen Economy. – AG Speaking Energy, Dec, 2019, <https://www.akingump.com/en/>.

19. Проектный офис по развитию водородной энергетики создадут в 2021 году – <https://tass.ru/ekonomika/9818081>.

СУТЕГІ ЭНЕРГЕТИКАСЫНЫҢ БОЛАШАҒЫ

Ж. Ә. Құлекеев, Г. К. Нұртаева

Мақалада сутегі энергетикасының негіздері қарастырылады, соңғы уақытта көмірсутектердің табиғи қорларының шектеулі болуына байланысты да, көміртегі бар отындарды қолдануға байланысты атмосфераға көмірқышқыл газының шығарылуын арттыру проблемасына орай, әлемде оның дамуына көп көңіл бөлінуде.

Сонымен қатар, сутегі энергетикасының оң және теріс жақтары, дамудың мүмкін бағыттары қарастырылады. Сутегі отынын пайдалану перспективалары да келтірілген.

Түйінді сөздер: сутегі, сутегі энергетикасы, отын элементтері.

THE FUTURE OF HYDROGEN ENERGY

Zh.A. Kulekeyev, G.K. Nurtayeva

The article discusses the fundamentals of hydrogen energy, the development of which has recently received great global attention both due to the limited nature of hydrocarbon reserves and the problem of increasing carbon dioxide emissions into the atmosphere caused by the usage of carbon-containing fuels.

The authors consider both positive and negative aspects of hydrogen energy, as well as possible development directions, and present the prospects for the use of hydrogen fuel.

Key words: hydrogen, hydrogen energy, fuel cells.

Информация об авторах

Кулекеев Жаксыбек Абдрахметович – канд. экон. наук, профессор, советник генерального директора, zh.kulekeyev@niikmg.kz.

Нуртаева Гульнара Камидоллаевна – канд. хим. наук, докт. пед. наук, ведущий инженер департамента бюджетирования и экономического анализа, g.nurtayeva@niikmg.kz. ТОО «КМГ Инжиниринг», г. Нур-Султан, Казахстан