

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 620.93:662.769.21

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА
В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ**

¹Шатманов О.Т., ¹Исманов Ю.Х., ²Маматкасымова А.Т., ³Бекболот К.Б.

*¹Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры
им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i_yusupjan@mail.ru;*

²Ошский технологический университет им. М. Адышева, Ош;

³Институт химии и фитотехнологий НАН КР, Бишкек

Проведен анализ перспектив использования водорода в качестве носителя энергии, который показывает, что эффективность такого носителя несомненна. Технологии хранения и перевозки водорода хорошо отработаны. Водород достаточно просто преобразовать в другой вид носителя энергии – например, электричество в топливных элементах. С точки зрения экологической безопасности водород практически непревзойденный источник энергии. Водород чаще всего получают из воды, и его окисление также приводит к получению воды. То есть никаких вредных выбросов в атмосферу нет. Водород в качестве энергоносителя имеет свои преимущества и недостатки, которые определяются свойствами и характеристиками водорода. К преимуществам водорода в качестве энергоносителя относятся следующие факторы: 1. Производство. В качестве сырья для получения водорода можно использовать углеводороды и неуглеводородные источники, например воду. 2. Использование. Во многих отраслях промышленности водород можно использовать либо как химическое топливо, либо в качестве сырья. 3. Хранение. Преимуществом водорода в качестве энергоносителя является то, что водород можно хранить в произвольных объемах и формах, причем форма хранения определяется только возможным дальнейшим способом использования водорода. 4. Транспортабельность. Для транспортировки водорода можно использовать, по сути, любой вид современного транспорта – морской, автомобильный, железнодорожный. И самое важное, водород можно транспортировать по трубопроводам, причем для этого можно использовать существующие трубопроводные линии для природного газа. 5. Безопасность для окружающей среды. Использование водорода в качестве энергоносителя предполагает его окисление, а результатом этого процесса может быть в основном только вода. Обладая многими положительными свойствами, водород, тем не менее, имеет некоторые отрицательные характеристики, которые с развитием современных технологий могут быть преодолены, что позволит в перспективе широко использовать водород в качестве энергоносителя.

Ключевые слова: водород, энергетика, ископаемое топливо, энергоноситель, топливный элемент, экология

PROSPECTS FOR USING HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER

¹Shatmanov O.T., ¹Ismanov Yu.Kh., ²Mamatkasymova A.T., ³Bekbolot K.B.

*¹Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov,
Bishkek, e-mail: i_yusupjan@mail.ru;*

²Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh;

*³Institute of Chemistry and Phytotechnologies of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, Bishkek*

An analysis of the prospects for the use of hydrogen as an energy carrier has been carried out, which shows that the effectiveness of such a carrier is beyond doubt. Hydrogen storage and transportation technologies are well developed. Hydrogen is quite easy to convert into another type of energy carrier – electricity, for example, in fuel cells. From the point of view of environmental safety, hydrogen is an almost unsurpassed source of energy. Hydrogen is most often obtained from water, and its oxidation also results in water. That is, there are no harmful emissions into the atmosphere. Hydrogen as an energy carrier has its advantages and disadvantages, which are determined by the properties and characteristics of hydrogen. The advantages of hydrogen as an energy carrier include the following factors: 1. Production. Hydrocarbons and non-hydrocarbon sources, such as water, can be used as raw materials for hydrogen production. 2. Usage. In many industries, hydrogen can be used either as a chemical fuel or as a feedstock. 3. Storage. The advantage of hydrogen as an energy carrier is that hydrogen can be stored in arbitrary volumes and forms, and the form of storage is determined only by the possible further use of hydrogen. 4. Transportability. In fact, any type of modern transport can be used to transport hydrogen – sea, road, rail. And, most importantly, hydrogen can be transported through pipelines, and this can be done using existing pipeline lines for natural gas. 5. Safety for the environment. The use of hydrogen as an energy carrier involves its oxidation, and the result of this process can be, basically, only water. Having many positive properties, hydrogen, however, has some negative characteristics that can be overcome with the development of modern technologies, which will allow hydrogen to be widely used as an energy carrier in the future.

Keywords: hydrogen, energy, fossil fuel, energy carrier, fuel cell, ecology

История человечества связана с использованием большого количества источников энергии, которые, в свою очередь, порождают невероятно большой диапазон используемых в современном мире энергоносителей.

Если говорить о природных энергоносителях, то такое совпадение – источник энергии и энергоноситель – возможно только в случае ископаемых источников энергии, таких как уголь, газ, нефть и др. Именно

для ископаемых источников энергии характерно то, что энергия переносится с источником без каких-либо преобразований, так как есть. В этом существенное отличие ископаемых источников энергии от источников, подобным падающей воде и ветру, в которых энергия требует предварительного преобразования, чаще всего в электрическую энергию, прежде чем она может быть использована для практических нужд.

На современном развитии человеческого общества именно ископаемое топливо является основным источником энергии и одновременно основным энергоносителем. И это фактор, который сильно влияет на окружающую среду, не говоря уже о том, что запасы ископаемого топлива ограничены.

Постепенное истощение объемов ископаемых источников энергии, рост обеспокоенности влияния этих источников на окружающую среду вынудит человечество обратить внимание на альтернативные источники энергии как способ преодоления возможного энергетического кризиса. Правда, факт заключается в том, что практически все известные на сегодняшний день источники энергии, такие как ветер, падающая вода, ядерное топливо, солнечное излучение и др., не являются носителями энергии в виде, который можно напрямую использовать потребителями энергии.

И еще один очень важный момент – эти источники энергии способны, по крайней мере на современном уровне развития технологий, создавать только один вид носителя энергии – электричество.

Однако электричество не может являться универсальным носителем энергии. Во многих случаях в качестве носителя энергии необходимо использовать и химические источники энергии, и напрямую сырьевые ресурсы. В качестве примера можно рассмотреть воздушный транспорт, который при современных технологиях пока не может перейти на электричество. Да и наземный транспорт пока не способен полностью перейти на электричество [1–3]. Сокращение использования ископаемых видов энергии, замена их возобновляемыми или неископаемыми источниками энергии может вызвать сильное перенасыщение рынка электрической энергией и создать высокий дефицит химических носителей энергии [4–6].

Как показал анализ развития использования источников энергии в человеческом обществе, такие базовые в свое время источники энергии, как древесина, уголь, нефть и даже природный газ, будут постепенно сокращаться, будет сокращаться и их

доля в мировой энергетике. На смену этим источникам энергии придет использование энергии ядерного деления, ветра, солнечной энергии и, в перспективе, энергии термоядерного синтеза. Как ни странно, исследования показали, что появление таких источников энергии, как ядерное деление, может привести к достаточно сильному переизбытку электрической энергии. И, хотя электричество достаточно универсальный вид энергии, однако, как уже упоминалось, не везде технологии позволяют ее использовать. Такая ситуация, связанная с переизбытком электрической энергии и дефицитом химических источников энергии, уже наблюдалась в некоторых странах даже на современном уровне.

Данные исследования, показавшие, что с развитием человеческого общества использование ископаемых видов топлива будет постепенно сокращаться и при этом использование электрической энергии будет ограничено невозможностью ее использования в определенных областях человеческой деятельности, предполагают развитие технологий, позволяющих получать химические носители энергии либо непосредственно из неископаемых источников энергии, либо опосредованно, получив вначале электрическую энергию из неископаемых источников энергии, а затем преобразовав ее в химический источник энергии [7–9]. И, как показывает анализ работ многих исследователей в области энергетике [10–12], в качестве универсального, экологически чистого химического источника энергии, который будет использоваться в перспективе в человеческом обществе, может быть водород. Однако надо помнить, что водород, как и электричество, являются производными, т.е. вторичными носителями энергии, которые могут всегда дополнять друг друга [13–15]. При этом первичные носители, такие как уран, которые могут быть легко транспортируемы и хранятся без особых сложностей, несомненно, останутся, даже если электричество и водород займут весь спектр вторичных энергоносителей будущего человеческого общества.

Целью данной работы является обзор энергетике, использующей водород, оценка перспектив использования водорода в качестве энергоносителя. Дается описание аспектов использования водорода в качестве носителя энергии, а также системы и технологии энергетике на основе водорода, включая технологии, используемые для производства, утилизации, хранения и распределения водорода.

*Потребление энергетических ресурсов
и воздействие этого фактора
на окружающую среду*

Энергия является фундаментом достойного существования любого современного промышленно развитого общества. Непосредственное влияние энергетики на современное общество проявляется в уровне жизни, качестве и образе жизни. Потребности развития энергетики определяются численностью населения и тем, как распределяется энергия между городом и селом. Рост энергетики в первую очередь связан с ростом населения большинства регионов мира. Очень важным фактором, влияющим на потребление энергии, является постоянно растущий уровень жизни, причем это особенно проявляется в странах третьего мира. Как ни странно, нехватка энергетических ресурсов также влияет на рост потребления энергии, а значит, на воздействие энергетики на окружающую среду.

Ископаемые виды топлива к настоящему времени составляют около 95% используемых источников энергии. Замещать ископаемые виды источников энергии пытаются методами гидроэнергетики, ядерной, солнечной, ветровой и геотермальной энергетики [16–18].

Особенностью ядерной энергетики является то, что она используется в основном для производства электрической энергии. Однако есть нечастые примеры использования ядерных реакторов для обогрева воды и подачи ее в системы централизованного теплоснабжения, промышленного отопления. Наконец, ядерная энергия может быть использована в качестве первичного источника энергии для выработки химических носителей энергии, таких как водород (термохимическое производство водорода).

Для многих современных и даже технологически развитых характерно несоответствие спроса на энергию и ее предложения. И если речь идет об ископаемых источниках энергии, то при их достаточном количестве спрос всегда может быть удовлетворен. В отношении возобновляемых источников энергии этого не скажешь. В первую очередь это связано с тем, что возобновляемые источники энергии чаще всего доступны с перерывами. Атомные электростанции также не могут увеличивать производство энергии в моменты пиковых потребностей, так как их работа эффективна при условии постоянства уровня их мощности. Как следствие, реальная выработка энергии относительно заданной мощности возобновляемых источников энергии, если брать какой-то определенный период вре-

мени, сильно различаются для различных технологий возобновляемой энергетики.

Отсюда полярные представления о перспективах возобновляемых источников энергии. Часть экспертов считает, что уже в ближайшей перспективе возобновляемые источники энергии полностью покроют потребности человеческого общества в энергии. Другая часть экспертов считает, что возможности возобновляемых источников энергии ограничены, например оценки Международной энергетической ассоциации дают предельные значения для возобновляемых источников энергии при производстве электрической энергии приблизительно 10^{20} Дж в год, в то время как человеческое общество потребляет на сегодняшний день порядка 10^{21} Дж в год, и потребление будет только расти.

Важнейшие проблемы, с которыми человечество столкнется при использовании возобновляемых источников энергии:

- Обычно стоимость любых систем возобновляемых источников энергии значительно превосходит стоимость систем, использующих ископаемые источники энергии.

- Возобновляемые источники энергии обычно занимают достаточно большие площади, т.е. концентрация этих источников энергии очень мала, что приводит к сложностям при их проектировании.

- Возобновляемые источники энергии – это чаще всего источники, которые не могут быть непрерывными, постоянными по мощности, вследствие чего возникает необходимость использовать накопители энергии, что значительно удорожает эти энергетические системы.

Так, например, ежедневные и сезонные колебания солнечного излучения приводят к коэффициенту использования солнечных устройств примерно на 19%, в то время как колебания этого коэффициента для обычных ветряных турбин составляют около 37% [19–21].

Любые энергетические установки оказывают сильное воздействие на окружающую среду, что вынуждает страны и даже регионы рассматривать ввод новых энергетических предприятий при обязательной их экологической оценке, и это касается также возможных их модернизаций. Энергетические предприятия воздействуют на окружающую среду посредством изменения климата, возникновения кислотных дождей, смога и уменьшения озонового слоя. Среди этих факторов важнейшим является изменение климата, которое как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе пагубно воздействует на биосферу нашей планеты, что, несомненно, волнует общественность всех стран.

Таблица 1

Выработка энергии и связанных с ней выбросов двуокиси углерода в атмосферу

Ежегодный объем	Годы					
	1980	1990	2000	2010	2020	2030
Ежегодная выработка энергии (Гтнэ/год)						
Уголь	1,6	2	2	2,6	2,9	
Нефть	3	3,1	3,5	3,9	5,1	
Природный газ	1,4	1,8	2	3,3	6,1	
Атомная энергетика	0,1	0,2	0,5	1,3	1,7	
Гидроэнергетика	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	
Отходы и возобновляемые горючие источники	0,7	1	1,1	1,2	1,7	
Выброс двуокиси углерода (Гтн/год) по группам стран						
Страны, входящие в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)	10,9	11	11,8	12,6	14,5	14,4
Развивающиеся страны	3,5	5	7,3	12	15,6	20,9
Страны с переходной экономикой	3,6	3,5	2,4	2,6	2,7	2,8
Выброс двуокиси углерода (Гтн/год) по виду топлива						
Уголь	5,7	7,2	6,5	10,7	14,1	
Нефть	7,8	8,1	10	11,1	12,2	
Природный газ	3,5	4,2	5	5,4	7,6	

Если говорить об основных факторах, вызывающих изменение климата, то это в первую очередь выбросы парниковых газов в результате деятельности человека. Именно поэтому человечество должно усиленно заняться проблемой уменьшения выбросов парниковых газов в окружающую среду или в конце концов адаптироваться к этим изменениям, что маловероятно. Преобладающая доля парниковых газов – это двуокись углерода, выделяющаяся в результате сжигания ископаемых видов топлива. И это надо учитывать, так как большая часть энергопотребления человечества опирается на ископаемые носители энергии.

Таблица подтверждает данный факт. В ней показаны общие объемы вырабатываемой человечеством энергии в прошлые годы и в перспективе. Также показаны выбросы двуокиси углерода в разбивке по группам стран и по видам топлива, также за прошлые годы и экстраполяция до 2030 г. Объемы вырабатываемой энергии даны в гигатоннах нефтяного эквивалента в год (Гтнэ/год), объемы выбросов двуокиси углерода – в гигатоннах в год (Гтн/год) [3].

Водород

как эффективный носитель энергии

Если рассматривать водород в качестве носителя энергии, то эффективность такого носителя несомненна. Технологии хранения

и перевозки водорода хорошо отработаны. Водород достаточно просто преобразовать в другой вид носителя энергии – например, электричество в топливных элементах. С точки зрения экологической безопасности водород практически непревзойденный источник энергии. Водород чаще всего получают из воды, и его окисление также приводит к получению воды. То есть никаких вредных выбросов в атмосферу нет.

Эффективность водорода при использовании его в качестве химического топлива, подменяющего ископаемые виды топлива, определяется многими причинами. Но, несомненно, основной причиной является то, что водород является как бы дополнением самого распространенного носителя энергии – электричества [22–24]. Оба носителя энергии высокоэффективны, переносимы, и есть области, где один из них нельзя использовать, по крайней мере при современном развитии технологий, тогда используется другой носитель.

Естественно, что водород в качестве энергоносителя имеет свои преимущества и недостатки, которые определяются свойствами и характеристиками водорода. К преимуществам водорода в качестве энергоносителя относятся следующие факторы [25–27]:

1. Производство. В качестве сырья для получения водорода можно использо-

вать углеводороды. Однако, что особенно важно, для этих целей можно использовать и неуглеводородные источники энергии. И таким источником является одно из наиболее распространенных на нашей планете соединений – вода.

2. Использование. Во многих отраслях промышленности водород можно использовать либо как химическое топливо, либо в качестве сырья. Так, например, водород широко используется при очистке металлических руд, при обработке тяжелых масел и смолосодержащих веществ, на транспорте – в топливных элементах [28] и др.

3. Хранение. Преимуществом водорода в качестве энергоносителя является то, что водород можно хранить в производных объемах и формах, причем форма хранения определяется только возможным дальнейшим способом использования водорода.

4. Транспортируемость. Для транспортировки водорода можно использовать, по сути, любой вид современного транспорта – морской, автомобильный, железнодорожный. И самое важное, водород можно транспортировать по трубопроводам, причем для этого можно использовать существующие трубопроводные линии для природного газа. При транспортировке водорода по трубопроводам потери энергии значительно меньше, чем при передаче электрической энергии по высоковольтным линиям. Таким образом, энергия неуглеводородных источников энергии, расположенных на больших расстояниях от потребителей энергии, может быть использована для получения водорода и затем легко транспортирована.

5. Безопасность для окружающей среды. Использование водорода в качестве энергоносителя предполагает его окисление, а результатом этого процесса может быть в основном только вода. Правда, при сгорании водорода в атмосфере происходит образование небольшого количества оксида азота, но выход данного продукта можно уменьшить практически до нуля, используя специальные конструкции двигателя [29].

Другие этапы водородного цикла, такие как этап получения, воздействуют на окружающую среду подобно похожим циклам любых других энергетических технологий и сильно зависят от методики получения водорода и от исходного сырья.

6. Возможность вторичной переработки конечного продукта. При использовании водорода в качестве энергоносителя конечным продуктом в основном является вода, которую можно повторно использовать для получения водорода.

Обладая многими положительными свойствами, водород, тем не менее, имеет некоторые отрицательные характеристики:

1. При хранении водорода плотность упаковки его в хранилищах значительно уступает плотности упаковки бензина, причем это касается как объемной плотности, так и массовой плотности, т.е. это в конце концов сказывается на количестве энергии, содержащейся в одном и том же объеме хранилища. Наибольшей массовой плотностью хранения обладает жидкий водород, для которого плотность упаковки достигает значений 85 % от плотности упаковки бензина в хранилищах. С точки зрения объемной плотности упаковки водорода в хранилищах ситуация еще хуже – наибольшая плотность достигается при хранении водорода в виде гидридов металла. Здесь плотность упаковки достигает значений порядка 30–40 % от плотности упаковки бензина. То есть и объемная, и массовая плотность упаковки водорода в хранилищах значительно ниже требуемых, что особенно важно при использовании водорода в качестве топлива в автомобилях.

2. Водород обладает высокой текучестью из-за малых размеров молекул, что приводит к проблемам при создании защитных оболочек.

3. Водород может активно взаимодействовать с некоторыми материалами, что приводит к изменению их свойств. Так, например, некоторые сплавы становятся более хрупкими при взаимодействии с водородом [30].

4. Фактор, который удерживает широкое распространение водорода в качестве энергоносителя – высокая стоимость его производства, особенно по сравнению со стоимостью ископаемого топлива в настоящее время.

Тем не менее развитие современных технологий позволяет преодолеть многие негативные характеристики водорода.

Важнейшим моментом при использовании водорода в качестве энергоносителя является проблема безопасного использования водорода. Хорошо известны его высокая горючесть, взрывоопасность его смеси с кислородом. Страх перед этими свойствами водорода также является фактором, задерживающим развитие водородной энергетики. Водород, как и любое топливо, обладает опасными свойствами, но страхи людей перед водородом часто возникают в основном из страха перед неизвестным. Помимо опасных свойств у водорода есть и безопасные. Результаты многих исследований последствий использования водорода для безопасности показывают, что опас-

ность водорода ничем не выше опасности бензина, природного газа или любого другого топлива, а просто у водорода есть свои особенности, которые всегда необходимо учитывать. Если принять во внимание температуру пламени, энергию взрыва и излучательную способность водорода, можно сделать вывод, что он безопаснее метана и бензина. Если же учесть нетоксичность водорода, его способность быстро рассеиваться в окружающей среде, то здесь преимущества водорода перед другими видами топлива несомненны. Водорода в атмосфере очень мало, поэтому водород быстро рассеивается в окружающей среде, что значительно снижает риски возгорания и взрыва. И, наконец, существует огромный опыт работы с водородом, который показывает, что с ним можно безопасно и что при соблюдении техники безопасности водород вполне безопасен.

Из сказанного выше следует, что за водородной энергетикой несомненное будущее, водород в качестве энергоносителя вероятно перспективен. Развитие энергетики в настоящем и в экстраполяции на будущее – это три основных этапа: первый этап – это современность, энергетика, опирающаяся на ископаемое топливо и электричество; второй этап – этап перехода от ископаемого топлива в качестве энергоносителя к водороду; третий этап предполагаемое использование только двух типов энергоносителей – водорода и электричества, полностью исключая ископаемое топливо.

На переходном этапе, скорее всего, будет происходить радикальное замещение химических энергоносителей, т.е. углеводороды – легкие, такие как нефть и природный газ, и тяжелые, такие как уголь, горючие сланцы, пески и битум, – будут, вероятно, замещены водородом. Важной особенностью переходного этапа развития энергетике [31] является всемерная интеграция как источников энергии, так и носителей энергии. Если посмотреть на период широкого использования ископаемого топлива, то, например, природный газ использовался в основном как источник тепловой энергии, в настоящий момент, который можно назвать переходным периодом, тот же природный газ используется, помимо получения тепловой энергии, для выработки водорода, метанола, электричества и др. С другой стороны, подобная интеграция просто приводит к задержке использования ископаемого топлива, что, тем не менее, должно рано или поздно отменить использование ископаемого топлива в качестве источника энергии, так как влияние этого вида топлива на окружающую среду становится все более значительным.

К интеграции можно без сомнений отнести использование водорода, полученного из веществ, не содержащих углеводороды, для целей нефтепереработки. Современные технологии позволяют обогащать тяжелые нефтепродукты водородом, с целью получения более легких, имеющих товарный спрос, жидких углеводородных носителей энергии. Это достигается за счет добавки в тяжелые углеводороды водорода, а не удаления из них углерода, как это происходит в обычных технологиях. Яркий пример интеграции – это использование электрической энергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, для получения водорода, которым обогащают тяжелые фракции нефти до товарной смеси жидкого топлива.

Когда ископаемое топливо станет слишком дорогим под давлением как экономических факторов, так и факторов экологического характера, водород займет ведущее место среди энергоносителей в глобальной мировой энергетике. Очень возможно, что на это также повлияет появление новых революционных технологий получения водорода из возобновляемых источников энергии с использованием недорогих экологически чистых процессов. Скорее всего, мы сейчас находимся на этапе перехода, после которого наступит эра водородной энергетике. Водород будет использоваться в качестве энергоносителя таким образом, чтобы использовать его уникальные свойства, и будет создана инфраструктура, необходимая для поддержки эпохи водородной энергетике. В первую очередь это касается использования водорода в экологических топливных элементах, которые найдут широкое применение, заменив экологически вредные двигатели на ископаемом топливе и химические элементы.

Технологии и энергетика на основе водорода

Водородная энергетика – это сложный комплекс, состоящий из технологий производства, использования, хранения и распределения водорода. Многие из этого комплекса до сих пор не отработано и потому требует дальнейших исследований.

Если рассматривать текущий период развития мировой энергетике, то можно заметить, что использование водорода в качестве энергоносителя пренебрежительно мало. Это связано с тем, что пока мировые запасы ископаемого топлива достаточно велики. Скорее, он в основном производится для удовлетворения промышленных неэнергетических потребностей во всем мире, особенно в развитых странах.

В настоящее время водород в основном используется в процессах переработки нефти (гидрокрекинг тяжелых остаточных фракций нефти с получением высококачественных бензинов, и др.), при производстве продуктов химической переработки нефти (альфа-спирты и др.) и производстве химикатов (аммиак и др.).

В небольших количествах водород используется при производстве лекарств, полупроводниковых материалов и др. В табл. 2 более подробно показано как используется водород в современных условиях в масштабах мирового производства. Таблица составлена в виде процентных долей по типам использования водорода в производстве [7].

Таблица 2

Использование водорода в мировом производстве

Вид использования водорода	Доля продукции в %
Производство аммиака	58
Переработка нефти	25
Производство метанола	10
Другое использование водорода	7

Если проследить историю использования водорода современным промышленным производством, то это использование ограничено несколькими последними десятилетиями, причем пропорции по виду использования практически совпадают с данными, представленными в табл. 2.

Однако в современном переходном периоде в использовании водорода важно то, что наряду с использованием водорода в виде химического сырья он все шире используется в качестве химического топлива, например, в топливных элементах и др. Все это приведет к тому, что водород найдет широкое применение на транспорте, коммерческом и жилом секторах, а также в промышленности.

Эксперты предполагают [32], что даже сейчас, при широчайшем использовании ископаемого топлива, водород, тем не менее, найдет широкое использование следующим образом: ожидают, что помимо перечисленных применений водорода в эпоху ископаемого топлива водород также будет применяться:

1) в топливных элементах [33], где прямое соединение водорода с кислородом позволит получать электроэнергию, а выбросы будут представлять собой обычную воду;

2) в разбавлении природного газа, причем это можно осуществлять непосредственно в уже существующих газораспределительных сетях [34];

3) как базовое сырье для производства синтетического топлива, такого как метан и аммиак [35];

4) как топливо для транспортных средств любого вида, включая городской транспорт, использующих водородные топливные элементы либо их комбинацию с двигателями внутреннего сгорания [36].

Из сказанного видно, что, скорее всего, водород уже в ближайшие десятилетия получит широкое применение в качестве эффективного химического энергоносителя. Использование водорода в качестве химического энергоносителя найдет наиболее широкое применение в области транспорта. Все это требует создания специальной широкомасштабной инфраструктуры по использованию водорода. Кроме того, такое использование требует обширных исследований, направленных на разработку физико-химических методов хранения водорода высокой объемной и весовой плотностей для использования его в качестве автомобильного топлива.

Водород в автомобильном транспорте

Современный транспорт, использующий в качестве топлива ископаемые виды энергоносителя, является основным источником выбросов в атмосферу парниковых газов – до 69% всех выбросов. Поэтому использование водорода в качестве топлива на транспорте, несомненно, значительно снизит выбросы углекислого газа в атмосферу. В настоящий момент основным препятствием на пути широкого использования водорода на транспорте является проблема его хранения, так как объем и вес являются важнейшими факторами для использования водорода на транспорте.

На сегодняшний день существуют два наиболее приемлемых предложения по использованию водорода на транспорте – водородные топливные элементы и двигатели внутреннего сгорания на водороде.

Использование электрических автомобилей на базе водородных топливных элементов выглядит наиболее перспективным на ближайшее будущее, так как выбросы вредных веществ в окружающую среду в этом случае минимальны. Запас хода таких электромобилей достигает 450–550 км на одной заправке водородом при условии, что давление в баке с водородом не менее 750 атм [37]. Высокая эффективность водородных топливных элементов делает возможным их использование для легковых

автомобилей [38]. На всем пути использования водорода можно довести выбросы углекислого газа в атмосферу практически до нуля, если использовать при производстве водорода либо сырье с низким или даже нулевым содержанием углекислого газа, либо поставить устройства, которые улавливают и хранят образующийся углекислый газ. Для увеличения срока службы подобных топливных батарей, а также для оптимизации работы батарей при торможении и ускорении используют гибридные схемы, в которых представлены аккумуляторные батареи или конденсаторы с топливным элементом [39].

На текущий момент фактором, сдерживающим широкое использование подобных схем на транспорте, является ограниченность поставок материалов, удовлетворяющих вышеуказанным условиям [40].

Водород скорее всего будет использоваться в двигателях внутреннего сгорания, конструкция которых аналогична традиционным двигателям внутреннего сгорания. Развитая промышленность и обширная производственная инфраструктура, доступная для двигателей внутреннего сгорания, делают водородные двигатели внутреннего сгорания экономически привлекательными. Важной особенностью является то, что, в отличие от автомобилей на топливных элементах, эти транспортные средства не зависят от материалов, которые могут ограничить их крупномасштабное производство [41]. Единственным отличием этих двигателей от традиционных двигателей, использующих в качестве топлива бензин, является наличие электронного блока, регулирующего давление в системе впрыска и водородной камере сгорания. Однако данные двигатели выбрасывают в атмосферу вместо углекислого газа смеси азота, что также нежелательно [41].

Широкое использование водорода на различных видах транспорта потребует создания новой, специализированной инфраструктуры распределения и заправки водородом с достаточным территориальным охватом для пользователей, во многом отличающейся от структуры, использующей ископаемое топливо. Такая структура будет состоять из обширной сети станций заправки водородом, причем мощности и плотности хранения водорода на них должны соответствовать этим характеристикам на транспортных средствах. Несомненно, что такая инфраструктура потребует больших финансовых затрат, что сопряжено с высокими инвестиционными рисками, так не вполне ясно, каков будет спрос на водород в ближайшем будущем.

В предлагаемой сети станций заправки водородом получать водород можно непосредственно на станциях, но можно и на специальных предприятиях, после чего подвозить его на станции и хранить его там до момента заправки транспортных устройств.

В ближайшие десятилетия, скорее всего, за ископаемыми видами топлива на основе нефти, которые используются на транспорте, останется ведущая роль, что связано с простотой обращения с этим видом топлива, несложностью его хранения, высокой объемной плотностью, что очень важно при использовании его на транспорте. Наконец, для этого вида топлива создана широко разветвленная сеть доставки, распределения и хранения [26]. Так как сеть заправочных станций для водорода пока не создана в достаточных масштабах, ближайшее будущее скорее всего за автомобилями с гибридными двигателями внутреннего сгорания, способными работать как на водороде, так и на ископаемом топливе. Такие автомобили обладают гибкостью, так как способны легко переходить на топливо на основе нефти в случае, если водородные заправочные станции недоступны [39].

Заключение

Использование водорода в качестве топлива на данном этапе является нерентабельным из-за больших финансовых затрат на его производство и хранение, но с развитием современных технологий в перспективе может заменить традиционное ископаемое топливо в качестве энергоносителя.

Список литературы

1. Dimitrakakis G.K., Tylianakis E., Froudakis G.E. Pillared graphene: a new 3-D network nanostructure for enhanced hydrogen storage. *NanoLett.* 2018. No. 8. P. 3166–3170.
2. Ball M., Wietschel M. The future of hydrogen opportunities and challenges. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2013. Vol. 34. No. 2. P. 615e27.
3. Midilli A., Dincer I., Ay M. Green energy strategies for sustainable development. *Energy Policy.* 2016. Vol. 32. No.18. P. 3623e33.
4. Midilli A., Dincer I. Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 33. No. 5. P. 511e24.
5. Midilli A., Dincer I. Hydrogen as a renewable and sustainable solution in reducing global fossil fuel consumption. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2018. Vol. 34. No. 16. P. 4209e22.
6. Sherif S., Barbir F., Veziroglu T. Towards a hydrogen economy. *Electr. J.* 2015. Vol. 18. No. 6. P. 62e76.
7. Sperling D., Cannon J.S. The hydrogen energy transition, moving toward the post petroleum age in transportation. Elsevier Academic Press. 2013. Vol. 33. No. 1. P. 302.
8. Simader G.R., Kordes K.V. Fuel cells and their applications. *Int. J. Hydrogen Energy* 2012. Vol. 34. No. 10. P.1e375.
9. Thomas C.E., Reardon J.P., Lomax Jr. F.D., Pinyan J., Kuhn Jr. I.F. Distributed hydrogen fueling systems analysis.

Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535, Arlington, Virginia. 2012. P. 1e83.

10. Raissi A.T., Block D. Hydrogen: automotive fuel of the future. *Power Energy Mag IEEE*. 2014. Vol. 2. No. 6. P. 40e5.

11. Momirlan M., Veziroglu T. Current status of hydrogen energy. *Renew Sustain. Energy Rev*. 2012. Vol. 6. No.1e2. P.141e79.

12. Momirlan M., Veziroglu T. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 30. No. 7. P. 795e802.

13. Mulder G., Hetland J., Lenaers G. Towards a sustainable hydrogen economy: hydrogen pathways and infrastructure. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 32. No. 10e11. P. 1324e31.

14. Agnolucci P. Hydrogen infrastructure for the transport sector. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 32. No. 15. P. 3526e44.

15. Wietschel M., Hasenauer U., de Groot A. Development of European hydrogen infrastructure scenarios. CO2 reduction potential and infrastructure investment. *Energy Policy*. 2016. Vol. 34. No. 11. P. 1284e98.

16. Smit R., Weeda M., de Groot A. Hydrogen infrastructure development in The Netherlands. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 32. No. 10e11. P. 1387e95.

17. Ogden J.M. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 24. No. 8. P.709e30.

18. Turner J.A. Sustainable hydrogen production. *Science*. 2014. Vol. 305. No. 5686. P. 972e4.

19. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной: материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596–597.

20. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // *Вестник КГУСТА*. 2017. № 3 (57). С. 171–178.

21. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. № 3. С. 98–102.

22. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Эффект саморепродуцирования в голографии: материалы VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 646–647.

23. Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol. Energy*. 2005. Vol. 78. No. 5. P. 661e9.

24. Ghenciu A.F. Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci*. 2002. Vol. 6. No. 5. P. 389e99.

25. Grigorev S., Porembsky V., Fateev V. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2006. Vol. 1. No. 2. P. 171e5.

26. Marshall A., Borresen B., Hagen G., Tsytkin M., Tunold R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers. Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy*. 2007. Vol. 2. No. 4. P. 431e6.

27. Kalinci Y., Hepbasli A., Dincer I. Biomass-based hydrogen production: a review and analysis. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. No. 21. P. 8799e817.

28. Lindstrom B., Pettersson L.J. Hydrogen generation by steam reforming of methanol over copper-based catalysts for fuel cell applications. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2001. Vol. 26. No. 9. P. 923e33.

29. Lindstrom B., Agrell J., Pettersson L. Combined methanol reforming for hydrogen generation over monolithic catalysts. *Chem. Eng. J*. 2003. Vol. 93. No. 1. P. 91e101.

30. Czernik S., French R., Feik C., Chomet E. Hydrogen by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion processes. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2002. Vol. 41. No. 17. P. 4209e15.

31. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography. *J. Optics (Paris)*. 1995. Vol. 26. No. 1. P. 25–28.

32. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // *Вестник КРСУ*. 2015. Т. 15. № 5. С. 104–106.

33. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2015. № 4. С. 30–33.

34. Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Особенности голограмм регулярных объектов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. № 4. С. 73–77.

35. Shoko E., McLellan B., Dicks A., da Costa J.D. Hydrogen from coal: production and utilisation technologies. *Int. J. Coal Geol*. 2016. Vol. 65. No. 3e 4. P. 213e22.

36. Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future. *Int. J. Coal Geol*. 2016. Vol. 65. No. 3e4. P. 173e90.

37. Clemens T., Gong D, Pearce S. Study on the suitability of New Zealand coals for hydrogen production. *Int. J. Coal Geol*. 2016. Vol. 65. No. 3 e 4. P.235e42.

38. Neef H.J. International overview of hydrogen and fuel cell research. *Energy*. 2012. Vol. 34. No. 3. P. 327e333.

39. Balat M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 33. No. 15. P. 4013e29.

40. Fatsikostas A.N., Kondarides D., Verykios X.E. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass-derived ethanol. *Catal. Today*. 2012. Vol. 75. No. 1e4. P.145e55.

41. Miceli R. Energy management and smart grids. *Energies*. 2013. Vol. 6. No. 4. P. 2262e90.