
УДК 620.9
DOI: 10.31249/espr/2022.01.02

И.Г. Родичкин, В.А. Карасевич*
**ВОДОРОДНАЯ ЭКОНОМИКА КАК ДРАЙВЕР
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА**

Аннотация. Тема использования водорода выходит на лидирующие позиции при обсуждении перспективных направлений развития мировой энергетики и достижения глобальных Целей устойчивого развития. В статье представлен анализ развития энергетики и показан закономерный эволюционный путь к водородному топливу. Продемонстрирована роль водорода при переходе к энергоэффективной и экологичной экономике в России.

Ключевые слова: водород; энергетика; Цели устойчивого развития; энергетический переход; эволюция.

Для цитирования: Родичкин И.Г., Карасевич В.А. Водородная экономика как драйвер энергетического перехода // Экономические и социальные проблемы России. – 2022. – № 1. – С. 26–45.

I.G. Rodichkin, V.A. Karasevich
Hydrogen economy as a driver for energy transition

Abstract. The topic of hydrogen usage goes on the leading positions in the discussion of prospective ways of world energy development and achievement of global sustainable development goals. The article there is presented the analysis of energy development and is shown the natural evolutionary way to hydrogen fuel. The role of hydrogen in the transition towards an energy-efficient and environment-friendly economy in Russia is shown.

* **Родичкин Игорь Геннадьевич**, эксперт Национальной ассоциации СПГ, г. Кингисепп, Россия.

Igor Rodichkin, Expert, National Association of Liquid Natural Gas. E-mail: RodichkinIgor@hotmail.com

Карасевич Владислав Александрович, канд. тех. наук, доцент базовой кафедры ВИЭ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина.

Vladislav Karasevich, PhD (Tech. Sci.), Assistant Professor of the Department of Renewable Energy, Gubkin State Oil and Gas University. E-mail: crucian-74@mail.ru

© И.Г. Родичкин, 2022

© В.А. Карасевич, 2022

Keywords: hydrogen; energy; sustainable development goals; energy transition; evolution.

For citation: Rodichkin I.G., Karasevich V.A. Hydrogen economy as a driver for energy transition // Economic and Social Problems of Russia. – 2022. – N 1. – P. 26–45.

Введение

Развитие человечества с каменного века определялось технологическим прогрессом, для которого главным фактором является энерговооруженность, определяющая победителей как в развитии, так и в войнах. С достижением уровня вооруженности, достаточного для взаимно-гарантированного уничтожения, человечество пришло к пониманию тупиковости такого пути и необходимости сотрудничества для устойчивого развития всех жителей планеты Земля. В 2000 г. государствами – членами ООН впервые были приняты 8 Целей Развития Тысячелетия, которые в 2015 г. были взяты за основу концепции 17 Целей Устойчивого Развития (ЦУР) – рис. 1.



Рис. 1. Цели устойчивого развития ООН
Источник: [17 целей для преобразования ... , 2015]

В их число входит 7-я ЦУР «доступная и чистая энергия», которую нужно рассматривать как ключевую для достижения остальных целей. От того, как человечество решит энергетическую проблему, принципиально зависит успешность перехода к устойчивому развитию, это является ключом к решению ЦУР 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15.

Смысл энергетики состоит в получении максимального количества энергии с минимальными издержками. Для этого ведется постоянный поиск новых способов получения энергии, новых подходов и принципов организации производства. Одним из перспективных векторов развития отрасли на сегодня является переход на использование водорода.

Особенность водородной энергетики позволяет говорить об очередном энергетическом переходе, затрагивающем самые разные сферы деятельности. Для его понимания предлагается рассмотреть эволюцию энергетики, особенности современных преобразований, роль и специфику водорода.

Эволюция производства и потребления энергии

Ретроспективные данные за период 1800–2019 гг. показывают, что потребление энергии в целом на Земле и на одного ее жителя неуклонно росло (рис. 1). Причем заметно резкое ускорение темпов роста с 1950-х годов – за счет увеличения использования углеводородного топлива (угля, нефти и газа). С 2010 г. ежегодное потребление энергии на одного жителя планеты превышает 70 ГДж.

Анализ структуры потребления энергии показывает следующие интересные закономерности. Во-первых, каждый новый вид энергии на каждом этапе развития энергетики играл дополняющую, а не замещающую роль. Во-вторых, ступенчатое изменение удельного потребления энергии в 1840, 1870, 1890, 1910, 1950, 1970, 2010 годах совпадает с началом промышленного применения новых видов и способов получения энергии: соответственно каменного угля, нефти, природного газа, гидро-, атомной, нетрадиционной возобновляемой (без гидро) энергии (нВИЭ) – рис. 1.

Согласно прогнозам организации стран – потребителей энергии Международного энергетического агентства (МЭА) и Организации стран – экспортеров нефти (ОПЕК) до 2045–2050 гг. энергопотребление продолжит расти как абсолютно (ориентировочно на 1% в год), так и относительно (т.е. в расчете на одного жителя Земли) – рис. 2.

Чем больше потребляется энергии, тем более емкими должны быть средства доставки ее потребителю. Ключевая роль в этом принадлежит транспорту.

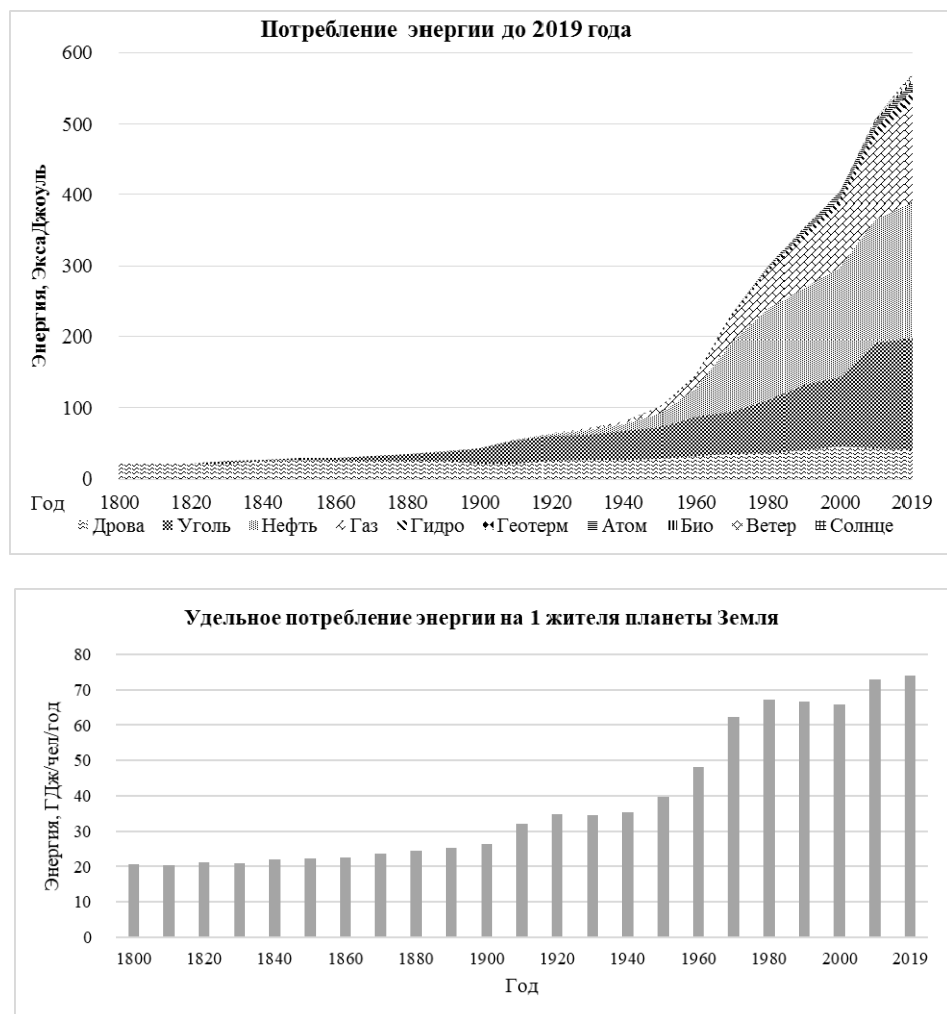


Рис. 2. Абсолютное и удельное потребление энергии в 1800–2019 гг.
Источники: [Ritchie, Roser, 2020; World Population Prospects ... , 2019]

До середины XIX в. для энергоснабжения было достаточно доставки дров повозками на животной тяге. С появлением парового двигателя и развитием специализированной промышленности (первая технологическая революция, или для краткости первый энергопереход) возникла необходимость и возможность поставки каменного угля паровозами и пароходами. В начале XX в. стали развиваться транспорт и энергетика, использующие в качестве топлива жидкие углеводороды, производимые из нефти (второй энергопереход). Почти одновременно началось локальное использование

природного газа, вышедшее к XXI в. на глобальный уровень. Объемы транспортировки углеводородов росли вслед за потреблением, понадобился также специализированный транспорт: танкеры и трубопроводы. Появившиеся технологии сжижения газа и танкеры для перевозки получаемого продукта (СПГ) превратили природный газ из континентального топлива в межконтинентальное. Развитие гидро- и атомной энергетики в середине XX в., а также расширение использования электрической энергии (третий энергопереход) потребовало больших масштабов производства и новых средств транспортировки: гигаваттных мощностей электростанций и мегавольтных линий электропередач.

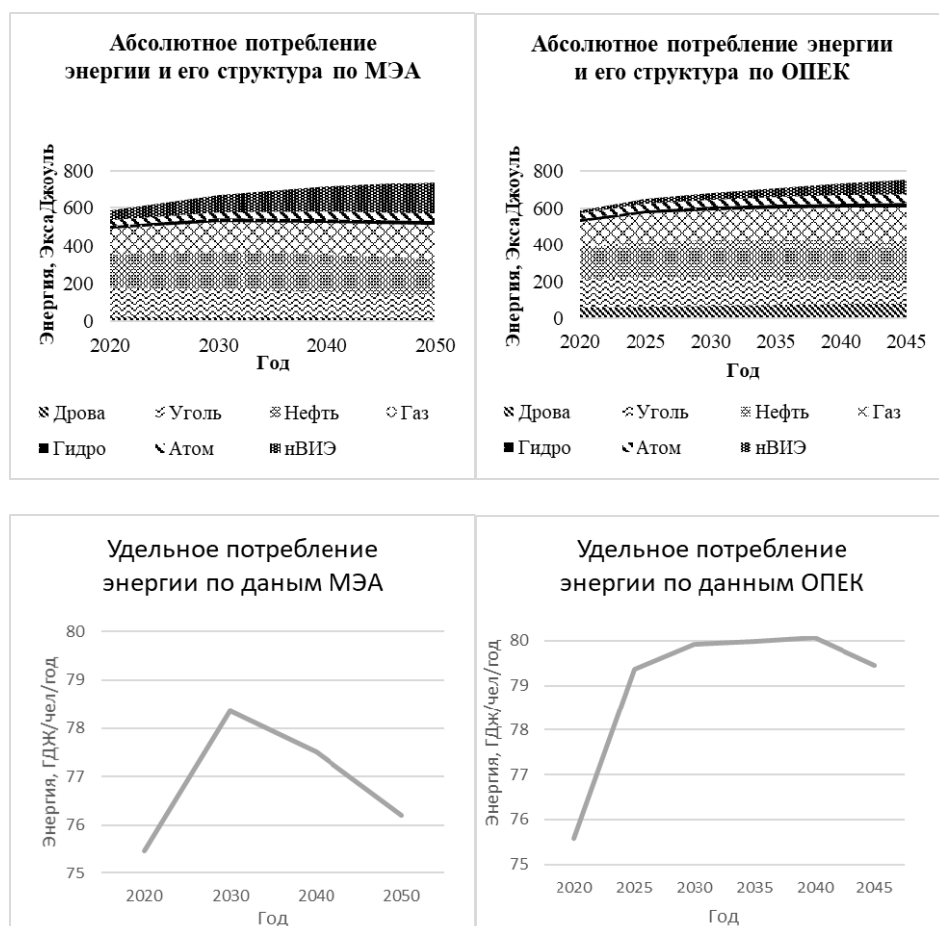


Рис. 3. Абсолютное и удельное потребление энергии в 2020–2050 гг.

Источники: [World Energy Outlook ... , 2021, p. 294;

World oil outlook ... , 2021, p. 58]

В начале XXI в. энергетические технологии усовершенствовались настолько, что экономически целесообразно стало применять электроустановки малой мощности и ставить их вблизи потребителей: солнечные и ветровые генераторы, приливные и малые гидроэлектростанции и т.д. (четвертый энергопереход).

Что есть общего у четырех перечисленных энергопереходов? Это постепенное, но неуклонное повышение энергоемкости носителей, а также содержания в них водорода (табл. 1). У каждого хронологически нового вида энергоносителя плотность энергии на единицу массы выше, чем у предыдущего (хотя с учетом массы емкости хранения изменения незначительны, так как каждый новый вид энергоносителя требовал более сложной технологии хранения и транспортировки).

Таким образом, энергетика последовательно эволюционирует посредством цепочки энергопереходов.

При этом очевиден переход в XX в. на прямую генерацию электроэнергии. Доля сектора электроэнергетики в мировой энергетике постепенно увеличивается. В 1990 г. она составляла 12%, в 2020 г. – 16%. В 2050 г., по оценкам, достигнет 23% (рис. 3).

Таблица 1

Характеристики разных источников генерации и хранения энергии*

Источники энергии	Состав		Форма энергии	Плотность, МДж/кг	
	углерод, %	водород, %		нетто	брутто
<i>Генерация и хранение</i>					
биотопливо твердое	40	5	тепло	10–22	10–20
каменный уголь	90	5	тепло	20–33	20–30
нефть	80	13	тепло	40–44	30–35
природный газ	75	23	тепло	40–50	20–30
<i>Генерация</i>					
гидроэлектрогенерация	–	–	электро		
атомная электрогенерация	–	–	тепло		
ветроэлектрогенерация	–	–	электро		
солнечная электрогенерация	–	–	электро		
приливные электростанции	–	–	электро		
<i>Хранение</i>					
электричества	–	–	электро		1–2
водорода	–	100	тепло/электро	120	14

*Источники: составлено авторами на основе справочной литературы и корпоративной документации.

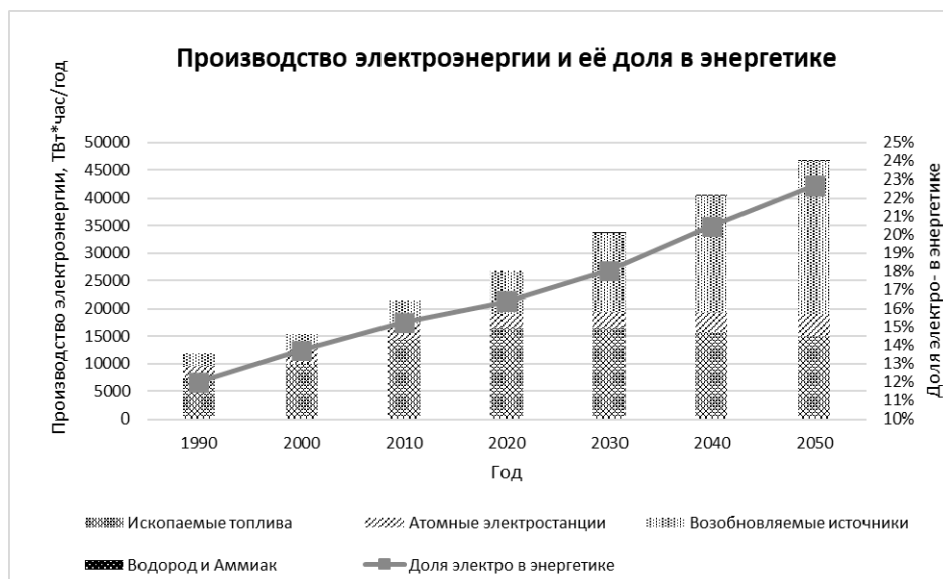


Рис. 4. Производство электроэнергии и её доля в энергетике в 1990–2050 гг.

Источники: [World Energy Outlook ... , 2021, p. 297; World Energy Outlook ... , 2011, p. 178; World Energy Outlook ... , 2010, p. 618; World Energy Outlook ... , 2003, p. 435]

Как показано на рис. 4, доля возобновляемых источников активно растет. Кроме того, тонкие полоски наверху показателей за 2030–2050 гг. – это 5–44 ТВт·ч/год водорода вместе с аммиаком для стационарного производства электроэнергии (это только небольшая часть общей потребности в водороде – 10–20%. В мобильной электроэнергетике доля водорода будет приблизительно такой же, остальной объем производства водорода планируется для химии и индустрии [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 44]).

Особенности современного энергоперехода

Как отмечено выше, современный (четвертый) энергопереход характеризуется началом распределенного производства электроэнергии с помощью солнечных панелей и ветрогенераторов. Эти два вида генерации зависят от погодных условий и дают неустойчивый по времени и мощности поток электроэнергии. Стабилизация электроснабжения возможна двумя путями: либо замещающей генерацией (традиционных электростанций), либо с помощью накопителей энергии (электрохимических, кинетических, гидроаккумулирующих, химических).

Два десятилетия спустя после старта энергоперехода данная стабилизация продолжается в основном путем развития замещающей генерации. Лучше всего для этого подходит генерация на природном газе, мощность которой к настоящему времени стала сопоставимой с угольной и нефтяной. Надежды на длительное (более суток) коммерчески успешное хранение электричества с помощью различных компактных накопителей энергии не оправдались, в основном в силу низкой плотности хранимой в них энергии. Наибольшие ожидания были связаны с инновационными электрохимическими аккумуляторами, но темпы снижения их стоимости не внушают оптимизма. Энергоемкость их также остается невысокой, а ее рост в последнее время замедлился [Атращенко, 2020, с. 31].

Наличие у традиционных энергоносителей и нВИЭ существенных недостатков определяет продолжение поиска идеального энергоносителя, удовлетворяющего техническим, экономическим, социальным и экологическим требованиям человечества. Необходим способ хранения и передачи энергии, по возможности универсальный и с энергоагентом, наиболее близким к электрической форме. Одним из наиболее перспективных вариантов считается использование в этом качестве водорода. Прогнозируется, что в 2030–2050 гг. от 25 до 40% производимого водорода будет применяться в стационарной и мобильной электроэнергетике [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 44].

Водород как новое направление развития энергетики

Необходимо отметить, что в свободном состоянии водород встречается на Земле очень редко и в малых количествах. Используемый человечеством водород – это вторичный продукт, который получается из других веществ, в то время как, например, запасов экономически рентабельных освоенных месторождений природного газа (основной составляющей которого является метан) хватит на полвека, а ресурсов (потенциальных месторождений) – на века.

Свойства водорода. Водород и его основные свойства давно известны. Впервые полученный пять столетий назад Т. Парацельсом, он был детально изучен как вещество в XIX–XX вв. Однако исследования свойств водорода продолжают до сих пор.

Сравнение водорода с метаном (наиболее близким энергоносителем по физико-химическим свойствам) позволяет сделать выводы, касающиеся возможности его использования, хранения и транспортировки (табл. 2).

Плотность энергии (в расчете на единицу массы) водорода в 2,4 раза выше, чем метана. В то же время плотность вещества в газообразном (параметр 2) и в сжиженном (параметр 3) виде у водорода ниже в 6–8 раз соответственно. В результате объемная плотность энергии водорода меньше, чем у метана в 2,5 (в жидкости) – 3,3 (в газе) раза. Это создает дополнительные проблемы для его хранения, так как требует большего объема.

Сравнение физических свойств водорода и метана***

№	Свойства веществ*	Единица	Водород	Метан
1	Плотность энергии**	МДж/кг	120	50
2	Плотность газа	кг/м ³	0,09	0,72
3	Плотность жидкости при Тк	кг/м ³	71	422
4	Температура кипения – (Тк)	°К	20,4	112
5	Температура инверсии	°К	204	1000

* Значение 1 и 2 даны при нормальных условиях: T=273°K, P=0,1 Мпа.

** Низшая теплота сгорания.

*** Составлено по данным: [ГОСТ 31369–2008 ... , с. 26, 28; Водород. Свойства, получение ... , 1989, с. 49, 50, 107, 141; Термодинамические свойства метана ... , 1979, с. 111, 146, 178, 180, 215, 216].

Однако плотность газа влияет также на скорость его прокачки по трубопроводам, увеличивая ее для более легких газов. В результате при прочих равных условиях пропускная способность трубопровода по прокачиваемому объему водорода выше, чем при прокачке метана в 2,3 раза¹ [Родичкин, Карасевич, 2021], но объемный поток энергии при этом ниже на 30%.

Транспортировка возможна не только в газообразном, но и в сжиженном виде. Но для этого газ нужно перевести в жидкость. Данный процесс характеризуется параметрами температуры кипения (параметр 4) и температуры инверсии (параметр 5). Температура кипения метана в 5,5 раза выше, чем водорода, и в 1,55 раза ближе к температуре нормальных условий, т.е. его можно сжижать с меньшими энергозатратами, чем водород. Сложность и затратность этих технологий во столько же раз выше, во сколько раз рабочие температуры ближе к абсолютному нулю по шкале Кельвина (минус 273 °С) и ниже плотность вещества. Применительно к водороду это означает в 6–8 раз больше затрат по сравнению с метаном (природным газом).

Температура инверсии водорода ниже на 69 °С температуры нормальных условий (273°K) – табл. 2. При температурах выше инверсионной газ при снижении давления не охлаждается, а нагревается, что может привести к возгоранию. У большинства других газов, включая природный газ, температура инверсии составляет сотни градусов выше нуля, потому их утечки не настолько пожароопасны, как утечки водорода.

¹ Пропускная способность трубопровода зависит от большого числа параметров, таких как геометрические размеры и внутренняя шероховатость трубопровода, перепад давления на входе и выходе, температура, плотность, сжимаемость и вязкость газа. Расчётные зависимости изложены в специальной литературе. С результатами расчетов для частного случая – газопровода Nord Stream 2 - можно ознакомиться в статье [Родичкин, Карасевич, 2021].

По всем рассмотренным параметрам водород объективно уступает метану с точки зрения экономической выгодной реализации. Чем же тогда он привлекателен, и почему так велика заинтересованность в его использовании – несмотря на все недостатки по сравнению с метаном? Водород – лидер среди химических энергоагентов по энергоемкости (плотности энергии на единицу массы энергоносителя, параметр 1). Кроме того, он очень легко трансформируется в электроэнергию.

Традиционным способом производства водорода является электролиз воды. С момента его открытия прошло более 200 лет, и технологии производства постоянно совершенствовались, внедрялись новые материалы. В результате экономической выгодной стала обратная реакция – окисление водорода в так называемых топливных элементах (ТЭ) с получением электрического тока и воды.

Принципиальные преимущества такого использования водорода перед его сжиганием в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и котлах – более высокий коэффициент полезного действия (КПД), снижение вредных выбросов в атмосферу и более низкие требования к материалам камер, в которых происходит данная реакция. Это открывает большие перспективы на пути энергосбережения, дает мультипликативный эффект для развития экономики и уменьшает загрязнение окружающей среды (в том числе за счет сокращения производства ископаемых видов топлива).

Водородные источники электропитания являются весьма перспективным направлением развития электротранспорта и энергетики благодаря большей энергоемкости водорода нежели химические аккумуляторы электроэнергии. Использование водорода и его соединений оказывает более щадящее влияние на экологию Земли, чем ископаемые виды топлива. Это прямо способствует достижению ЦУР 12–15 ООН.

Производство водорода. На сегодняшний день самыми распространенными способами производства водорода в мире являются паровая конверсия метана и газификация угля, на которые приходится 79% всего производимого водорода [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 108], доля электролизеров менее 1%. Также активно используется водород, получаемый как побочный продукт на химических предприятиях (например, при производстве хлора и стирола) [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 25].

Среди наиболее перспективных из разрабатываемых так называемых низкоуглеродных технологий производства водорода можно выделить высокотемпературный электролиз воды и пиролиз метана.

В первом случае для производства водорода помимо электроэнергии также используется тепло, а вместо воды в высокотемпературный электролизер подается пар. Потребление электроэнергии на диссоциацию воды (на водород и кислород) за счет этого снижается (в идеальном случае можно прийти к термолизу, при котором диссоциация воды происходит только под воздействием тепла без потребления электроэнергии). Данная технология может представлять интерес для производства водорода на

тепловых электростанциях, в том числе на атомных, в случае избыточного производства тепла в периоды суточных спадов потребления. Кроме того, заслуживает внимания технология производства водорода на специализированных атомных термоэлектрических станциях (АТЭС) методом паровой конверсии метана и при получении тепла от атомного реактора [Атомный энерготехнологический комплекс, 2018].

В случае пиролиза метана природный газ при высокой температуре, в отсутствие кислорода и под воздействием катализатора распадается на углерод и водород. Технология пиролиза применяется давно и повсеместно как в газохимии (обычно продуктом пиролиза выступает ацетилен), так и при утилизации бытовых отходов (резины, пластмассы, органических соединений), где в качестве ее основного продукта выступает технический углерод, а газовая смесь, которая наряду с твердой и жидкой фракцией является одним из продуктов пиролиза, не сепарируется, а сжигается. Тем не менее возможна ориентация подобных технологий и на расширение производства водорода. Также активно развиваются технологии пиролиза метана с акцентом на выпуск углеродных нанотрубок, в которых водород является сопутствующим продуктом [Многослойные углеродные нанотрубки, 2021].

Все вышеописанное наглядно показывает, что даже с учетом потерь на трансформацию энергии любого энергоносителя (ископаемые топлива, атомная энергия, электричество) в водород использование его в качестве носителя энергии в большинстве случаев оправдано. Однако существуют определенные ограничивающие условия по расстоянию транспортировки, массогабаритных характеристик транспортных средств и других параметров энергетических объектов.

Хранение и транспортировка водорода. Выше уже отмечалось что хранение и транспортировка водорода возможны в газообразном и жидком видах [Норрег, 2017]. Кроме этих основных форм, есть и другие: в химически и механически связанном виде. В первом случае это аммиак, метанол и органические носители водорода; во втором – металлические адсорберы, позволяющие внедрять водород в кристаллические решетки различных сплавов металлов и извлекать из них. Аммиак в энергетике имеет перспективы стать носителем водорода, поэтому часто рассматривается вместе с водородом, особенно в виде моторного топлива [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 44]. Органические носители водорода (LCOH) и металлические адсорберы существуют пока в виде НИОКР и лабораторных установок, и их промышленная перспективность неясна.

Наиболее понятным и экономически целесообразным способом транспортировки водорода, по мнению авторов, является его транспортировка по трубопроводам. Возможны два варианта транспортировки: в виде чистого водорода и в составе метано-водородной смеси.

Опыт успешной эксплуатации магистральных водородопроводов превышает 80 лет. Первый водородопровод находится в Рейнско-Рурском

регионе Германии и функционирует с 1938 г. до сих пор [Алексеева, Козлов, Фатеев, 2011]. Сегодня протяженность водородопроводов в мире превышает 4500 км. Наиболее протяженными сетями обладают США (более 2000 км), в первую очередь компания Air Liquide [Hydrogen pipelines, 2016].

По мере расширения использования энергетического водорода и перехода химической промышленности от собственной выработки водорода к его покупке на внешних рынках, развитию водородопроводных сетей в отдельных регионах мира (таких как США, Китай, ЕС) может быть дан дополнительный импульс. Так, в странах ЕС идут дискуссии о создании единой европейской сети водородопроводов. Один из крупнейших в мире транзитеров природного газа, нидерландская компания Gasunie, уже предварительно согласовала параметры водородопроводной сети и размеры государственной поддержки (1,8 млрд евро). По оценкам специалистов [Pre-feasibility study ... , 2021, p. 42], стоимость переоборудования 1 км газопровода параметра 30"/80 в водородопровод составляет 0,5 млн евро, а стоимость строительства 1 км нового водородопровода оценивается в 2,2 млн евро без учета замены компрессорных станций на более мощные. Стоимость транспортировки водородопроводами меняется нелинейно, в зависимости от пропускной способности и расстояния и, по данным МЭА, оценивается в 0,2–1,8 долл. за 1 кг на 1000 км [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 150].

Другим способом трубопроводного транспорта водорода является его подмешивание к метану. По результатам научных исследований, 20% содержания водорода является тем максимумом, за пределами которого в существующих трубопроводах начинаются существенные потери водорода ввиду его более высокой проникающей способности, чем у метана [Melaina, Antonia, Renev, 2013, p. viii, x]. Стоимость транспортировки водорода в этом случае можно оценить на основе стоимости транспортировки природного газа (с поправкой на соотношение плотности, массы и вязкости метана и водорода). По расчетам авторов, она на 20–50% выше, чем для метана при содержании до 10% водорода в метано-водородной смеси (МВС). В связи с отсутствием в мире масштабных коммерческих проектов по транспортировке МВС, ее невозможно определить на основании проектов-аналогов.

Относительно низкая удельная стоимость транспортировки энергии посредством газопроводов представляет собой важное преимущество водорода. В таблице 3 и на рисунке 5 представлены расчеты удельной стоимости капитальных затрат транспортировки энергии на севере Европы посредством электрических кабелей и газопроводов. Хотя стоимость транспортировки водорода в 1,5–2 раза выше по сравнению с природным газом, она на порядок ниже, чем передача электроэнергии по подводным кабелям.

Таблица 3

**Технико-экономические показатели подводных энергопроводов
Северной Европы******

Название	Энерго-носитель	Место старта	Место финиша	Год	Стоимость млрд евро / инфл. к 2021 г.	Мощность / длина, ГВт / тыс. км	Удельная стоимость млрд евро на ГВт / тыс. км
NordNed	э/э*	Норвегия	Нидерланды	2008	0,6 / 1,13	0,7 / 0,58	1,67
NordBalt	э/э*	Швеция	Литва	2015	0,58 / 1,06	0,7 / 0,45	1,95
Western HVDC Link	э/э*	Велико-британия	Велико-британия	2019	1,38 / 1,02	2,2 / 0,42	1,48
NordLink	э/э*	Норвегия	Германия	2021	1,75 / 1,00	1,4 / 0,62	2,01
NorthSeaLink	э/э*	Норвегия	Британия	2021	1,60 / 1,00	1,4 / 0,62	1,59
Nord Stream 1	ПГ**	Россия	Германия	2012	8,9 / 1,09	58 / 1,22	0,14
Nord Stream 2	ПГ**	Россия	Германия	2021	9,0 / 1,00	58 / 1,23	0,13
	H2***	Россия	Германия	2021	12,0 / 1,00	41 / 1,23	0,24
AquaDuctus (ТЭО****)	H2***	Германия	Германия	2035	0,34/1,01	10 / 0,42	0,08

* Электроэнергия.

** Природный газ.

*** Водород, расчетные параметры.

**** Предварительные расчеты технико-экономического обоснования (ТЭО).

***** Источники: данные авторов, а также справочная литература, корпоративная документация и пресс-релизы из сети Интернет.

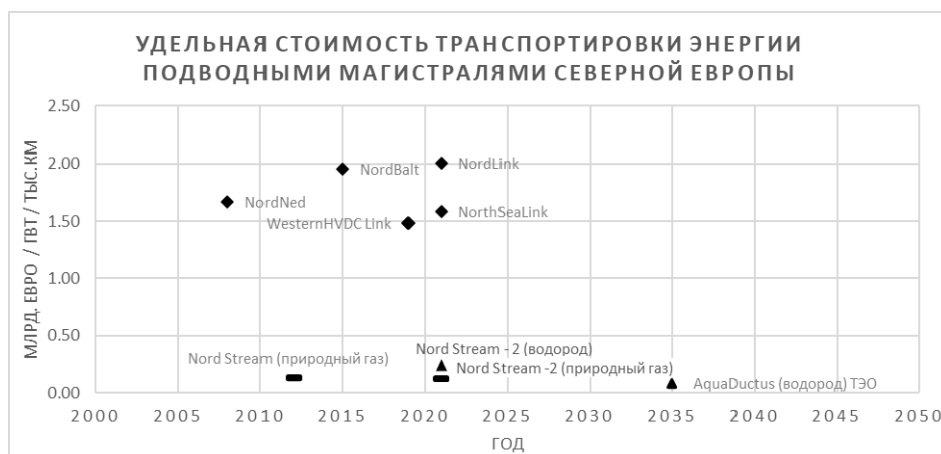


Рис. 5. Удельная стоимость транспортировки энергии подводными магистральями в Северной Европе

Потребители водорода. Необходимо отметить, что водород в промышленности применяется давно и регулярно. Традиционными потребителями водорода являются химические производства (чаще всего водород выступает как сырье для производства аммиака или метанола) и предприятия нефтепереработки, на которые приходится более 80% мирового потребления водорода. Также водород используется в пищевой промышленности, микроэлектронике, электроэнергетике (в основном для охлаждения генераторов). Перспективными потребителями водорода выступают сталелитейная и цементная промышленность [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 44].

Новой областью применения водорода (и его соединений, в том числе аммиака) является энергетика и электротранспорт, в которых он выступает не в качестве вспомогательного вещества, а как носитель энергии. Прогнозируется расширение использования водорода в сферах генерации, накопления и распределения электро- и тепловой энергии. Это фиксируется как в стратегических документах многих стран мира, в том числе России [Концепция развития водородной энергетики ... , 2021], так и в обзорных документах международных организаций, например МЭА.

Наиболее разработанной и расширяющейся областью применения водорода в энергетике является его использование в водородо-воздушных твердополимерных топливных элементах (ТПТЭ). На них, в частности, работает практически весь существующий водородный автотранспорт [Филиппов, 2020]. В данном случае от 1 м³ водорода можно получить до 2 кВт электроэнергии (КПД – до 60%), тогда как КПД парогазовых электроустановок обычно не превышает 40%. От ТПТЭ также можно получить до 35% низкопотенциального (60–120 °С) тепла [PureCell[®] Model ... , 2021]. В качестве перспективной технологии производства электроэнергии и тепла можно считать твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), температура реакции в которых достигает 900 °С. ТОТЭ менее восприимчивы к качеству топлива и, кроме водорода, также могут работать на природном газе, синтез-газе и метаноле. Температуры отводимого тепла с ТОТЭ может быть достаточно для того, чтобы использовать его в парогазовом цикле. Одним из примеров сочетания ТОТЭ с паровой турбиной является японская установка MEGAMIE [MHPS Selects ... , 2018].

Установки с ТПТЭ и ТОТЭ могут применяться на изолированных территориях, где сложно организовать подвоз топлива со стороны и себестоимость 1 кВт•ч электроэнергии может в 10 и даже в 100 раз [Объекты генерации в изолированных ... , 2020, с. 46] превышать стоимость сетевой. Водород может производиться локально за счет использования местных источников энергии (например, солнечной или ветряной генерации), аккумулироваться и использоваться для генерации при дефиците электроэнергии. По данным Аналитического Центра при Правительстве России, общая установленная мощность энергоустановок на изолированных территориях в настоящее время превышает 840 МВт [Объекты генерации в

изолированных ... , 2020, с. 3]. Современный срок службы ячейки ТПТЭ достигает 30 000 часов, что делает подобную установку конкурентоспособной по сравнению с дизельной генерацией [Coolegem, 2016].

Однако в связи с отсутствием технологических и нормативных решений маловероятно, что водород будет массово использоваться для отопления и электроснабжения (в том числе резервного и / или пикового) индивидуальных домохозяйств в ближайшее время. Скорее всего, до 2030 г. все ограничится пилотными проектами [Heating Dutch homes ... , 2019].

Гораздо более понятны перспективы использования водорода и его соединений в качестве источника энергии на транспорте. В случае, когда двигатель стоит на средстве передвижения, удельная энергия (в первую очередь массовая) является самой важной (а иногда и критичной) характеристикой топлива, наряду с технически-возможным КПД его использования. Это условие диктовало и диктует отказ от таких топлив, как каменный уголь и мазут, в пользу дизельного топлива и дистиллятов (бензин, керосин). Немного лучше них по нетто- и хуже них по брутто-энергоемкости природные газы (метан, этан, пропан, бутан). При этом на конкурентоспособность топлив влияет также такой фактор, как экологичность (в том числе углеродный след). Учитывая эти обстоятельства, а также возможность получения энергии из водорода и водородосодержащих топлив более эффективным (при КПД 60% и выше) и экологичным (с нулевыми выбросами оксидов) путем, логичным является переход в моторных топливах ко все более водородосодержащим энергоносителям, включая 100% водород.

Предполагается, что крупные морские суда будут ориентироваться в качестве судового топлива на аммиак [Global Hydrogen Review ... , 2021, р. 44]. По оценкам МЭА, к 2030 г. доля аммиака в качестве судового топлива может достигнуть 8%, доля водорода как моторного топлива – 2% [Global hydrogen review ... , 2021]. Стратегия развития электротранспорта РФ предусматривает строительство 1000 водородных заправок к 2030 г. [Концепция по развитию ... , 2021]. При суточной мощности заправки 1,4–1,6 т [Hydrogen fueling stations ... , 2021] годовую потребность в водороде для автотранспорта в России к 2030 г. можно оценить в 0,5 млн тонн.

Несмотря на ряд работ по разработке водородных ДВС [Toyota developing hydrogen ... , 2021], водородный автотранспорт будет, очевидно, преимущественно использовать электродвигатели, электроэнергия на которые поступает от аккумуляторной батареи с водородо-воздушными топливными элементами (ТЭ) – ввиду их большего КПД, чем у ДВС. С учетом того, что для водородного автомобильного электротранспорта не требуются ТЭ с длительным периодом работы (более 10 тыс. часов ресурса или 400 тыс. км пробега при средней скорости 40 км/час), основной проблемой для них, по мнению авторов, будут размеры и электрический КПД.

В железнодорожном транспорте до 2030 г. водород будет использоваться в небольшом количестве в отдельных проектах. Примером служат водородные электропоезда Alstom в Германии и Франции, пригородные электропоезда на о. Сахалин в России (которые собирается производить АО «Трансмашхолдинг»). На сахалинские водородные электропоезда потребуется 224 т водорода в год [Сахалин первым в России ... , 2021].

Развитие водородной авиации, включая беспилотную, также произойдет, по мнению МЭА, после 2030 г. [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 81, 184].

Следует подчеркнуть, что водородный рынок – это не только сам водород, но и средства его производства, транспорта, использования. Это большой зарождающийся рынок разнообразной продукции машиностроения, химии и новых материалов. Оценка его объемов на нынешнем этапе – весьма приблизительная. На сегодня этого рынка, по сути, нет. Почти все 90 млн тонн производимого водорода используются на месте, экзистенциально (т.е. для удовлетворения собственных нужд). Согласно сценарию APS (Announced Pledges Scenario) МЭА [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 112, 184], заложенный в водородных стратегиях государств объем годового производства должен вырасти до 150 млн т в 2035 г. и 250 млн т в 2050 г. Основные характеристики рынка водорода приведены в таблице 4.

Таблица 4
Водородный рынок мира и России в 2020–2050 гг.**

	Ед. измерения	2020	2025	2035	2050
Производство энергии*	ЭксаДжоуль	589	620*	661*	674
Производство водорода	млн т	90	105	150	250
Доля энергетического водорода	%	1	5	25	50
Себестоимость взвешенная	долл/кг	1,22	1,55	2,05	2,37
Общая себестоимость	млрд долл	1	8	77	296
Экспорт из РФ водорода	млн т	0	0,2	2–12	15–50
Доля экспорта РФ на мировом рынке водорода	%	0	4	5–32	12–40

* Расчеты авторов на основе данных МЭА [World Energy Outlook ... , 2021, p. 299].

** Источники: [Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 44; Концепция развития водородной энергетики ... , 2021; Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 112; Global Hydrogen Review ... , 2021, p. 113].

Из приведенных данных (табл. 1 и 4) видно, что официально декларируемая доля водородной энергетики в мировом масштабе в 2050 г. в лучшем случае составит 0,5% в массовом (в пересчете на тонны условного топлива), 2% в энергетическом и 2,5% в денежном исчислении [World

Energy Outlook ... , 2021, p. 282]. Много ли это? С финансовой точки зрения такая доля соответствует уровню сегодняшнего рынка каменного угля; с точки зрения энергоемкости – находится на уровне сегодняшней гидроэнергетики. Есть за что бороться!

Это новый развивающийся рынок, и России необходимо на нем работать, контролируя его условия на своей территории и прилегающих регионах Евразии. Для этого следует уже сегодня создавать научные и инженерные заделы, развивать производство, растить кадры. Через 10 лет будет поздно – рынок водородной энергетики займут те же страны, которые сейчас контролируют рынок СПГ: Австралия, США, Катар. От СПГ до водорода путь гораздо ближе, чем от традиционных технологий в нефтяной и газовой отраслях.

Заключение

Настоящий, четвертый по счету, энергопереход – это не просто переход к солнечным и ветровым электростанциям с замещением ими электро- и тепловой генераций на угле и других ископаемых видах топлива. Подобный взгляд представляется поверхностным и неточным. История развития энергетики показывает, что новые виды энергии не замещали, а дополняли предыдущие. Современный энергопереход – это переход при сохранении старых к новым более энергоэффективным источникам, видам и формам энергии. Водород – один из них, причем самый энергоемкий и мобильный одновременно. В этом его главное преимущество, которое делает его драйвером процесса.

Водородную промышленность нужно рассматривать как новый «локомотив» научно-технического прогресса, в качестве которого ранее выступали ядерная и космическая отрасли. Она в состоянии «вытянуть» мировую и отечественную экономику из ресурсного «тупика» на «рельсы» энергоэффективного и экологичного развития, в котором заинтересовано все человечество.

Распространение водородных технологий прямо способствует достижению ЦУР ООН. Использование водорода как энергоносителя позволяет перейти на действительно «чистую» энергию, так как конечным продуктом реакций является дистиллированная вода. Доступность такой энергии зависит от совершенствования технологий и их удешевления.

Россия не может, а должна занять ключевую позицию в начинающемся энергетическом переходе, иначе с позиции энергетической державы она скатится до уровня ряда африканских стран – «энергетических» колоний.

Список литературы

1. 17 целей для преобразования нашего мира. Цели в области устойчивого развития / ООН. – 2015. – URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/news/communications-material/> (дата обращения: 30.12.2021).
2. Алексеева О.К., Козлов С.И., Фатеев В.Н. Транспортировка водорода // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 3(21). – С. 18–24. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transporirovka-vodoroda> (дата обращения: 30.12.2021).
3. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа / Пономарев-Степной Н.Н., Алексеев С.В., Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Кузнецов Л.Е., Фатеев С.А., Кодочигов Г.Н. // Газовая промышленность. – 2018. – № 11(777). – С. 94–102. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/atomnyu-energotehnologicheskii-kompleks-s-vysokotemperaturnymi-gazoolazhdaemyimi-reaktorami-dlya-masshtabnogo-ekologicheskii> (дата обращения: 30.12.2021).
4. Атращенко А. Накопители электрического заряда для электротранспорта: на пути к литий-металлическим батареям // Control engineering Россия. – 2020. – № 2(86). – URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/8628.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник / под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – Москва : Химия, 1989. – 672 с.
6. ГОСТ 31369–2008 «Газ природный». Введ. 01.01.2010. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 58 с.
7. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года / Правительство РФ. – 2021. – URL: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJt.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
8. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации / Правительство РФ. – 2021. – URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
9. Многослойные углеродные нанотрубки // ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова. – 2021. – URL: https://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1513 (дата обращения: 30.12.2021).
10. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России : аналитический доклад // Аналитический центр при Правительстве РФ. – Москва, 2020. – URL: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/генерации_в_ИТТ.pdf (дата обращения: 30.12.2021).
11. Родичкин И., Карасевич В. «Северный поток – 2» для водорода // Нефтегазовая вертикаль. – 2021. – № 9. – С. 23–29 – URL: <http://www.ngv.ru/magazines/article/severnyu-potok-2-dlya-vodoroda/> (дата обращения: 30.12.2021).
12. Сахалин первым в России начал переход на водородное топливо // Российская газета. – 2021. – 25.11. – URL: <https://rg.ru/2021/11/25/reg-dfo/sahalin-pervym-v-rossii-nachal-perehod-na-vodorodnoe-toplivo.html> (дата обращения: 30.12.2021).
13. Термодинамические свойства метана : серия монографий / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко [и др.] ; ГСССД. – Москва : Издательство стандартов, 1979. – 348 с.

14. Филиппов С., Голодницкий А., Кашин А. Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. – 2020. – № 11(153). – С. 28–39. – URL: https://www.eriras.ru/files/statya_s.p.filipova.pdf (дата обращения: 30.12.2021).
15. Coolegem J. Nedstack fuel cell technology / ICEA. – 2016. – URL: <https://demcomem-2mw.eu/download/publications/ICAE16-Nedstack.PDF> (дата обращения: 30.12.2021).
16. Global Hydrogen Review 2021 // International Energy Agency. – 2021. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
17. Heating Dutch homes with hydrogen // DNV. – 2019. – URL: <https://www.dnv.com/oilgas/perspectives/heating-dutch-homes-with-hydrogen.html> (дата обращения: 30.12.2021).
18. Hopper M. Grid-scale hydrogen energy storage: a techno-economic cost-benefit analysis for Sweden / KTH School of Industrial Engineering and Management. Master of science thesis. Energy technology. – Stockholm, 2017. – 43 p. – URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1197531/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
19. Hydrogen fueling stations cost. DOE hydrogen program record // USA. Department of energy. – 2021. – 02.11. – URL: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
20. Hydrogen pipelines // Hydrogen tools. – 2016. – URL: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-pipelines> (дата обращения: 30.12.2021).
21. Melaina M.W., Antonia O., Penev M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues // National renewable energy laboratory. U.S. Department of energy. Office of energy efficiency & renewable energy. – 2013. – URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
22. MHPS Selects “MEGAMIE” as the series name for its integrated fuel cell and gas turbine hybrid power generation system // Mitsubishi Power. – 2018. – 08.11, № 150. – URL: <https://power.mhi.com/news/20181108.html> (дата обращения: 30.12.2021).
23. Pre-feasibility study for a Danish-German hydrogen network // Gasunie&Energinet. – 2021. – 42 p. – URL: <https://en.energinet.dk/-/media/5E43188402D54575B20D13A876FE221A.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
24. PureCell® Model 400 Hydrogen // Doosan fuel cell Co Ltd. – 2021. – URL: <https://www.doosanfuelcell.com/en/prod/prod-0102/> (дата обращения: 30.12.2021).
25. Ritchie H., Roser M. Global direct primary energy consumption Retrieved // Our World in Data. – 2020. – URL: <https://ourworldindata.org/energy-mix> (дата обращения: 30.12.2021).
26. Toyota developing hydrogen engine technologies through motorsports // Toyota. – 2021. – 22.04. – URL: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/35209996.html> (дата обращения: 30.12.2021).
27. World Energy Outlook 2003 // International energy agency. – 2003. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/716b548d-60b7-4162-939a-4bf2a8f6156a/WorldEnergyOutlook2003.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
28. World Energy Outlook 2010 // International Energy Agency. – 2010. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/716b548d-60b7-4162-939a-4bf2a8f6156a/WorldEnergyOutlook2003.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).

29. World Energy Outlook 2011 // International Energy Agency. – 2011. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc401107-a401-40cb-b6ce-c9832bb88d85/WorldEnergyOutlook2011.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
30. World Energy Outlook 2021 // International Energy Agency. – 2021. – URL: <https://iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> (дата обращения: 30.12.2021).
31. World Energy Outlook 2021 // International Energy Agency. – 2021. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acac-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
32. World oil outlook 2021 // Organization of the petroleum exporting countries. – 2021. – URL: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm (дата обращения: 30.12.2021).
33. World Population Prospects 2019 // United Nations. Department of economic and social affairs. – 2019. – URL: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/> (дата обращения: 30.12.2021).

Статья получена: 30.11.2021

Одобрена к публикации: 25.12.2021