

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 28.08.19. Ред. рег. № 2750

The article has entered in publishing office 28.08.19. Ed. reg. No. 2750

УДК 621.039.5

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ И В РОССИИ*

С.З. Жизнин¹, В.М. Тимохов²

¹Московский государственный институт международных отношений (МГИМО МИД РФ)

д. 76, просп. Вернадского, Москва, 119454, Россия
тел.: +7(495)229-54-18; e-mail: s.zhiznin@rambler.ru

²Центр энергетической дипломатии и геополитики
д. 17, Гоголевский бульвар, Москва, 119019, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.40-59

Заключение совета рецензентов: 16.09.19 Заключение совета экспертов: 10.10.19 Принято к публикации: 01.11.19

Водород, при его использовании в качестве горючего, оказывает самое минимальное воздействие на окружающую среду и является жизнеспособным, многообещающим, но недостаточно изученным на практике альтернативным горючим. Мировой спрос на его производство может увеличиться в десятки и сотни раз, и для его удовлетворения необходимы альтернативные источники энергии – возобновляемые и невозобновляемые, – в том числе ядерные.

В работе рассмотрены характеристики этих источников, показана важная роль ядерной энергии.

Развитие производства водорода стимулирует развитие симбиоза ядерной и водородной энергетики совместно с ВИЭ и позволяет формировать новую устойчивую систему мировой энергетики – альтернативную энергетику.

Ключевые слова: ядерно-водородная энергетика; возобновляемые источники энергии; выбросы; гибридная система; низкоуглеродные технологии; водород; симбиоз.

ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR AND HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN THE WORLD AND RUSSIA

S.Z. Zhiznin¹, V.M. Timokhov²

^aMoscow State Institute of International Relations University (MGIMO)

76 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
tel.: +7(495)229 54 18, e-mail: s.zhiznin@rambler.ru

^bCenter of Energy Diplomacy and Geopolitics
17 Gogolevsky Ave., Moscow, 119019, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.40-59

Referred 16 September 2019 Received in revised form 10 October 2019 Accepted 1 November 2019

*Жизнин С.З., Тимохов В.М. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;01-06:40-59.

Hydrogen, when used as a fuel, has the most minimal impact on the environment and is a viable, promising, but insufficiently studied alternative fuel. World demand for its production may increase by tens and hundreds of times, and alternative energy sources — renewable and non-renewable, including nuclear ones — are needed to meet it.

The paper discusses the characteristics of these sources, shows the important role of nuclear energy.

The development of hydrogen production stimulates the development of the symbiosis of nuclear and hydrogen energy in conjunction with renewable energy and allows the formation of a new sustainable global energy system — alternative energy.

Keywords: nuclear-hydrogen; energy; renewable energy sources; emissions; hybrid system; low-carbon technologies; hydrogen; symbiosis.



Станислав Захарович
Жизнин
Stanislav Zhiznin

Сведения об авторе: д-р эконом. наук, профессор кафедры международных проблем ТЭК им. Н.П. Лаверова МГИМО (У) МИД РФ.

Образование: Авиационный институт (1969 г.); Дипакадемия МИД РФ (1977 г.).

Область научных интересов: энергетическая дипломатия; экономика энергетики; ядерная энергетика; водородная энергетика.

Публикации: более 300, включая 8 книг, 5 учебников.

H-index 12

ORCID: 0000-0003-3433-8600

Information about the author: D.Sc. in Economics, Prof. of International Issues of Energy Complex Chair of MGIMO (U) MFA of RF named after N.P. Laverov.

Education: Aviation Institute, 1969; Diplomatic Academy of the MFA of RF, 1977.

Research interests: energy diplomacy; energy economics; nuclear energy; hydrogen energy.

Publications: 300, including 8 books, 5 textbooks.



Владимир Михайлович
Тимохов
Vladimir Timokhov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, исполнительный директор Центра энергетической дипломатии и геополитики.

Образование: МИФИ, Обнинский филиал (1975 г.).

Область научных интересов: вопросы возобновляемой, водородной, ядерной и термоядерной энергетики.

Публикации: более 65.

H-index 10

ORSID: 0000-0001-5803-9707

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Executive Director of the Center for Energy Diplomacy and Geopolitics.

Education: МЭФТИ (Obninsk branch), 1975.

Research interests: issues of renewable, hydrogen, nuclear and thermonuclear energy.

Publications: more than 65.

1. Введение

В 2006 г. в «Столетнем меморандуме» [1] группа ученых предложила активно использовать возобновляемые и невозобновляемые источники энергии и универсальный энергоноситель – водород – в целях предотвращения климатической катастрофы.

Будущее мировой водородной энергетики в большой степени зависит от эффективного освоения надежных и дружелюбных для окружающей среды источников, способных вырабатывать огромное количество электрической и тепловой энергии, что связывают в первую очередь с широкомасштабным развитием невозобновляемых источников – ядерной энергии с учетом повышенных требований к технологическим и экологическим стандартам энергетической безопасности [2].

Использование ядерной энергии и получение альтернативных энергоносителей с помощью атомно-

водородного цикла открывает дополнительные возможности для транспортной инфраструктуры в переходный период 2020–2050 гг. [3].

Создание плавучих АЭС и перспективных энергопромышленных комплексов позволит генерировать водород в ядерно-водородном цикле в больших количествах для энергодефицитных районов [4].

К настоящему времени в ряде стран наблюдается тенденция сокращения количества действующих ядерных реакторов, а также свертывание программ строительства новых. В частности, в Соединенных Штатах Америки, по данным Минэнерго США, с 2013 г. раньше срока закрылись 7 ядерных блоков, а также было объявлено о возможном закрытии еще 12-ти, что может привести к существенному уменьшению доли атомной энергии в энергетическом балансе страны (по данным МЭА [5]). Кроме того, известно, что свертываются программы развития ядерной энергетики в Японии, Германии, Франции и ряде

других государств. Это связано с проблемами обеспечения ядерной безопасности, особенно после аварии в Фукусиме, а также с тем, что в межтопливной конкуренции ядерная энергия проигрывает в краткосрочном плане традиционным источникам энергии (газ, нефть и уголь), цена на которые существенно снижается. Это приводит к тому, что многие энергетические компании, несмотря на ухудшение рыночной конъюнктуры, предпочитают инвестировать в традиционные энергоресурсы, что с коммерческой точки зрения более надежно. Помимо этого, многие компании привлекает возобновляемая энергетика, которая развивается во многом благодаря существенным дотациям, льготам со стороны государства и нередко широкой общественно-политической поддержке.

В то же время в мире и в России наблюдается рост интереса к развитию водородной энергетике для ряда отраслей экономики, в частности, кондитерской промышленности, транспортных средств, нефтепереработки, металлургии, теплоснабжения и пр. [6] Пока для производства водорода применяются традиционные источники энергии. Так, в США более 95 % водорода производится с использованием природного газа; в ряде стран – с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (незначительное количество). Что касается ядерной энергетике для получения водорода, то пока созданы только экспериментальные установки. В то же время в США, ряде других стран, включая Россию, ученые ведут разработку новых технологий для эффективного наращивания производства водорода с помощью всех источников энергии, особенно ядерной. Это связано с тем, что в ближайшие десятилетия ожидается многократное наращивание глобального спроса на водород, учитывая в первую очередь его экологические преимущества. Эта тенденция может способствовать формированию глобального и региональных рынков водорода. Однако существующая инфраструктура не готова для удовлетворения прогнозируемого спроса, и прежде всего потому, что использование традиционных, а также в определенной степени ВИЭ для получения огромных объемов водорода ограничено ввиду, например, экологических факторов. В этой связи может существенно вырасти роль ядерной энергии. АЭС могут производить водород различными способами, что значительно сократит вредные выбросы. При этом ядерные установки, используя тепловую энергию и электроэнергию для получения водорода, существенно превосходят в экологическом плане традиционные энергоустановки, что может быть особенно заметно при широкомасштабном использовании АЭС в водородной энергетике.

В этой связи, по нашему мнению, именно перспективы водородной энергетике могут не только спасти ядерную энергетике, но также дать мощный стимул для ее дальнейшего развития. В сочетании с ВИЭ ядерная энергетика, одним из приоритетов которой будет производство водорода, может привести к формированию мощной ядерно-водородной отрасли в мировой энергетике, которая будет привлекательна для инвестиций не только со стороны государства, но и бизнеса. По сути, речь идет о симбиозе ядерной и водородной энергетике совместно с ВИЭ для формирования новой устойчивой системы мировой энергетике, что предполагает активизацию сотрудничества между академическими и деловыми кругами заинтересованных стран, включая Россию. Это возможно только в условиях ослабления геополитической нестабильности и турбулентности на глобальном и региональном уровнях, а также развития международного многостороннего и двустороннего сотрудничества. Поскольку основное внимание ученых сосредоточено на теоретических и технологических проблемах ядерно-водородной энергетике, изучение экономических и коммерческих аспектов формирования такого симбиоза, включая перспективы международного сотрудничества, по нашему мнению, содержит определенную научную новизну.

Авторы данной статьи употребляют термин «симбиоз», широко распространенный в исследовании многих взаимовыгодных биохимических процессов в растительном и животном мире, для экономической оценки процессов в области ядерно-водородной энергетике. Впервые в России понятие «симбиоз ядерно-водородной энергетике» было введено в 2002 г. [7].

Авторы попытались изучить некоторые экономические аспекты ядерно-водородной энергетике, понимая, что ряд экономических проблем требует более глубоких исследований, которые, учитывая их масштабность, трудно провести в рамках одной статьи. В частности, это касается перспектив водородной энергетике в условиях межтопливной конкуренции, ядерно-водородной энергетике для достижения целей устойчивого развития, проблем и перспектив международного сотрудничества в этой области.

В настоящей работе будут рассмотрены общие подходы к развитию водородной энергетике в мире, особенности производства водорода, перспективы использования ядерной энергии в водородной энергетике, экономика получения водорода на АЭС, концептуальные и практические аспекты развития ядерно-водородной энергетике в России, а также перспективы симбиоза ядерно-водородной энергетике.



Список обозначений	
<i>Аббревиатуры</i>	
CCUS	Carbon capture, utilization and storage (Улавливание, утилизация и хранение углерода)
HTE, HTSE	High temperature electrolysis, High Temperature Steam Electrolysis (Высокотемпературный электролиз, высокотемпературный паровой электролиз)
IEA	International Energy Agency
IAEA	International Atomic Energy Agency (Международное агентство атомной энергии при ОЭСР)
PEM	Proton Exchange Membrane (электролизная установка)
SCWR-CANDU	Supercritical Water Cooled Reactor – Canada Deuterium Uranium Сверхкритический водоохлаждаемый реактор – (Канада-дейтерий-уран)
АТР	Азиатско-Тихоокеанский регион
АЭС	Атомные электростанции
АЭС	Атомная энерготехнологическая станция
ВВИЭ	Вторичные возобновляемые источники энергии (промышленные, бытовые отходы, биомасса и пр.)
ВТГР	Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МЭА	Международное энергетическое агентство
ПГ	Парниковый газ
РУ	Реакторная установка
ТЭ	Тепловая электростанция
ЯЭ	Ядерная энергия
<i>Единицы измерения</i>	
GtCO ₂	Гигатонна диоксида углерода
В	Вольт
кВт · ч	Киловатт в час
МВт · ч	Мегаватт в час
Мпа/ МПа	Мегапаскаль
М т н.э.	Миллион тонн нефтяного эквивалента
Нм ³	Нормальный кубический метр
ТВт · ч	Тераватт в час

2. Общие подходы к развитию водородной энергетики в мире

Водородная энергетика сформировалась как одно из перспективных направлений развития отрасли народного хозяйства в середине 70-х гг. XX в. Примерно тридцать пять лет назад (особенно после нефтяного кризиса 1973 г.) водород был определен как «критический и незаменимый элемент декарбонизированной устойчивой энергетической системы», обеспечивающей безопасную, экономически эффективную и экологически чистую энергию [8].

По мере расширения области исследований, связанных с получением, хранением, транспортировкой и применением водорода, становились все более очевидными его экологические преимущества [9].

Успехи в развитии некоторых водородных технологий, таких как топливные элементы, транспортные системы на водороде, системы хранения и др., показали, что использование водорода приводит к качественно новым показателям в работе установок и систем. Техно-экономические исследования выявили: несмотря на то что водород является вторичным энергоносителем и стоит дороже, чем природные виды топлива, его применение в ряде случаев экономически целесообразно. Поэтому работы по водородной энергетике во многих промышленно

развитых странах относятся к приоритетным направлениям развития науки и техники и находят все большую финансовую поддержку как со стороны государства, так и со стороны частного капитала. В настоящее время доказано, что водород оказывает минимальное воздействие на окружающую среду и является жизнеспособным, многообещающим, но недостаточно изученным (апробированным) альтернативным топливом; последнее обстоятельство представляет серьезную проблему, стоящую перед глобальной энергетической системой [10, 11]. Водород может играть важную роль в краткосрочной перспективе, поскольку имеет низкий уровень выбросов диоксида углерода, его можно легко хранить и транспортировать, что в значительной степени позволяет создавать более безопасную энергетическую систему с существенно меньшей зависимостью от ископаемого топлива [12–15]; с удобной транспортировкой [16] и получением тепла [17]; в промышленности [18]; электроэнергетике [19]. Без водорода все эти составляющие дают две трети глобальных выбросов CO₂.

Экономика, построенная путем частичной или полной замены углеводородного топлива водородным, получила название «водородная экономика». Одними из первых этот термин использовали американские ученые Джон Бокрис и Лоуренс У. Джонс в 1970 г. [20].



В январе 2017 г. в Давосе был сформирован Совет по водородным технологиям («The Hydrogen Council») [21]. Участники Совета подготовили дорожную карту развития водородных технологий путем их инвестирования. 13 компаний-учредителей готовы ежегодно вкладывать в отрасль приблизительно \$ 25 млрд в год, что к 2030 г. составит \$ 280–300 млрд. По оценке Совета, к 2050 г. ежегодный оборот средств в водородной энергетике будет равен \$ 2,5 трлн.

В настоящее время водород находит основное применение в промышленности. В 2018 г. для его производства использовались: природный газ (196 млн т н.э.), уголь (75 млн т н.э.), нефть (2 млн т н.э.), электроэнергия [22]. Спрос на водород в мире в 2018 г., согласно оценки МЭА [21], превысил 73 млн т (рис. 1). Потребление водорода со значительными примесями других газов, как побочного продукта, составило около 42 млн т. Крупнейшими потребителями водорода, как видно на рис. 1, являются: нефтепереработка (33 % совокупного спроса); производство аммиака

(27 %); производство метанола (11 %) и черная металлургия (3 %). Востребованность водорода в этих секторах обусловлена такими его характеристиками, как легкость, активность, высокая теплота сгорания, возможность производства и хранения в промышленных масштабах.

Потенциал его дальнейшего распространения, в том числе в энергетике, в условиях набирающего силу тренда на декарбонизацию связывается с дополнительными свойствами водорода – отсутствием прямых выбросов вредных или парниковых газов и возможностью получения водорода посредством низкоуглеродных источников энергии [22, 23], таких как возобновляемая и ядерная энергия.

Перспектива роста объемов производства водорода при соответствующей государственной политике состоит в увеличении его востребованности в традиционных секторах потребления, а также освоении новых сфер, где он практически незаметен: транспорт, тепло- и электроэнергетика.

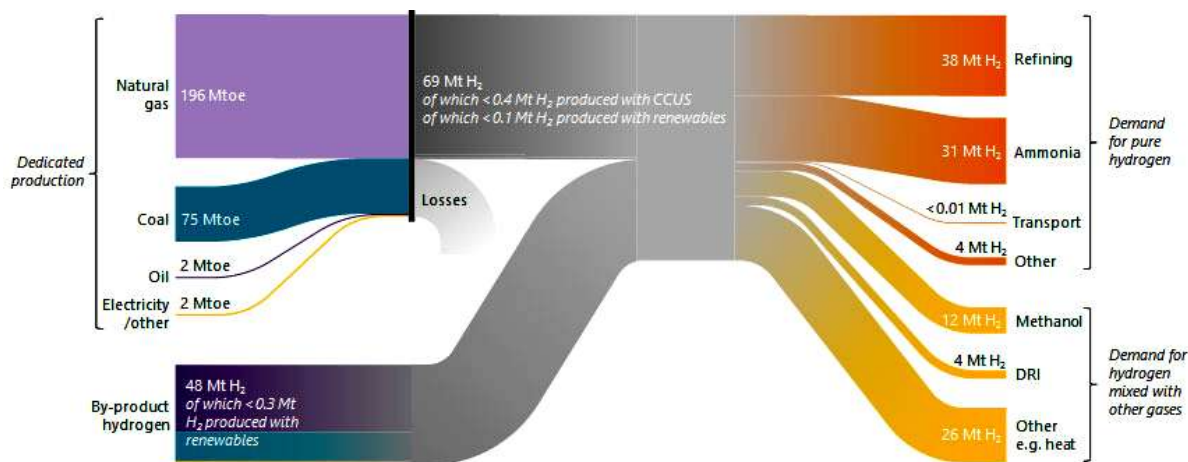


Рис. 1 – Структура производства и потребления водорода в мире в 2018 г. [22, 23]
 Fig. 1 – The structure of the production and consumption of hydrogen in the world in 2018 [22, 23]

Следует отметить, что, по состоянию на середину 2019 г., МЭА заявило о наличии примерно 50 государственных программ (целей, обязательств, стимулов), направленных на продвижение водорода – в основном на транспорте (пассажирские автомобили, заправочные станции, автобусы, грузовики и другие транспортные средства) [22, 23].

3. Производство водорода

Выбор наиболее приемлемого способа производства водорода зависит от различных факторов, в том числе: 1) наличия энергетических ресурсов, таких как вода, природный газ и уголь; 2) стоимости производства энергии; 3) мощности производства энергии; 4) оценки воздействия на окружающую среду в процессе производства.

В настоящее время водород производится двумя способами: переработкой ископаемого топлива и с

помощью электролиза воды. Рассмотрим их более подробно.

3.1. Ископаемое топливо

Почти весь водород (~ 95–97 %) получают из ископаемого топлива. Из произведенных в 2018 г. 70 млн т водорода 76 % приходится на природный газ, остальное – на уголь. Этот способ дает около 10 кг CO₂ на 1 кг водорода в случае его получения из природного газа, и это количество удваивается при газификации угля [16]. На ежегодное мировое производство водорода расходуется около 205 млрд м³ природного газа (6 % мирового потребления) и 107 млн тонн угля (2 % мирового потребления). В результате образуется 830 млн т выбросов CO₂ в год, что соответствует годовым выбросам CO₂ в Индонезии и Великобритании вместе взятых. С точки зрения энергии, общая годовая потребность в водороде во всем мире

составляет около 330 млн тонн нефтяного эквивалента (Мтн.э.) [22].

В связи с растущей осведомленностью мировой общественности о глобальном потеплении, в развитых странах появилась заинтересованность в переходе к таким технологиям производства водорода, которые помогают сократить выбросы парниковых газов, то есть электролизу, термическому расщеплению воды или схеме улавливания углерода в установках по переработке ископаемого топлива [16].

3.2. Электролиз воды

Впервые электролиз воды был реализован в 1860 г. Первая коммерческая технология получения водорода этим способом была разработана еще в 1920-х гг., но в 1960-х гг. она начала смещаться в сторону ископаемых источников.

На долю электролиза в настоящее время приходится, по разным оценкам, от 2 % до 5 % мирового производства водорода, но электролиз в сочетании с ВИЭ или ядерной энергией приобретает значительные преимущества.

В то же время технологические возможности производства водорода путем электролиза сегодня существенно уступают первому способу. Так, если бы весь водород производился путем электролиза воды, это привело бы к ежегодной потребности в ~3 600 ТВт·ч, что больше, чем годовая выработка электроэнергии в Европейском союзе. Потребность в воде составила бы 617 млн м³, или 1,3 % потребления воды в глобальном энергетическом секторе в настоящее время, что примерно вдвое больше текущего расхода воды на водород из природного газа.

Следует также отметить, что при производстве водорода существуют огромные региональные различия в затратах, и будущая экономика этих регионов зависит от факторов, которые будут продолжать варьироваться, включая цены на ископаемое топливо, электроэнергию и углерод. В настоящее время природный газ без технологии CCUS (Carbon capture, utilization and storage) является наиболее экономичным вариантом для производства водорода в большинстве регионов мира.

Разновидности электролиза могут стать конкурентоспособными по стоимости с природным газом с CCUS (в зависимости от местных цен на газ), если цены на электроэнергию будут оставаться в интервале 10÷40 долл. США / МВт·ч, а часы полной нагрузки – 3 000÷6 000, что пока недостижимо. Но для регионов с развитыми возобновляемыми и ядерными ресурсами электролиз является привлекательным вариантом, особенно по сравнению с относительно дорогостоящим импортом природного газа.

4. Особенности производства водорода с использованием ядерной энергии

Для энергетического баланса будущего необходим такой источник энергии, который может обеспе-

чить постоянную стабильную нагрузку без выбросов парниковых газов. Потенциал генерации энергии из ВИЭ является достаточным для удовлетворения энергетических потребностей человечества, но относительно высокая стоимость ограничивает его масштабное применение. Кроме того, существуют и другие недостатки ВИЭ. Так, основная проблема солнечной энергии – это изменение интенсивности излучения днем и ночью. В среднем солнечную энергию можно получать в течение примерно одной трети суток, и даже тогда ее интенсивность меняется от слабой по утрам и вечерам до максимальной в полдень. Поэтому солнечную энергию необходимо аккумулировать. Эффективность солнечно-водородной технологии достигает нескольких процентов [25]. Энергия ветра также колеблется и характеризуется небольшим коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ). Массовое использование энергии биомассы имеет этические проблемы, связанные с дилеммой «посевы для производства энергии или посевы для производства продуктов питания». Представляет интерес производство водорода из вторичных возобновляемых источников (ВВИЭ) [26, 27], однако этот ресурс также ограничен [28].

Ядерная энергия идеально подходит для решения вопросов безуглеродной и стабильной энергетики. Рассмотрим возможности ядерно-водородной энергетики более подробно.

По данным международного энергетического агентства (МЭА), ядерная энергетика вносит значительный вклад в мировое производство электроэнергии (обеспечила 10 % мирового энергоснабжения в 2018 г.). По состоянию на май 2019 г., в 31 стране мира действовало 452 крупных ядерных энергетических реактора с суммарной мощностью около 400 ГВт.

Ядерная энергетика играет большую роль в странах с развитой экономикой, где она составляет 18 % от общей выработки. В 2018 г. она обеспечивала более половины потребителей во Франции, Словацкой Республике и Венгрии. Европейский Союз получил 25 % своей электроэнергии от ядерных реакторов. В Корею и Соединенных Штатах ядерная энергия составила примерно одну пятую всей произведенной электроэнергии. В Японии атомная энергетика выработала около 5 % электроэнергии в 2018 г. До аварии на Фукусиме в 2011 г. атомная энергия была наравне с углем и газом, как крупнейший источник электроэнергии в Японии – около 30 %.

В странах с развитой экономикой в целом атомная энергетика является крупнейшим низкоуглеродным источником электроэнергии, обеспечивая 40 % всей низкоуглеродной генерации. Выработка электроэнергии за счет атомной энергии в 2018 г. составила немногим более 2 000 ТВт·ч, что на треть опережает гидроэнергетику и почти вдвое превышает совокупную мощность проектов в области солнечной и ветровой энергии. Ядерная энергетика является крупнейшим низкоуглеродным источником электро-



энергии в 13 отдельных странах с развитой экономикой: Бельгии, Болгарии, Чешской Республике, Финляндии, Франции, Венгрии, Корею, Словацкой Республике, Словении, Испании, Швеции, Великобритании и США.

Кроме того, ядерная энергетика помогла замедлить долгосрочный рост выбросов CO₂ за последние полвека, особенно в странах с развитой экономикой. Во всем мире в период с 1971 г. по 2018 г. в результате производства ядерной энергии удалось избежать выброса 63 Гт диоксида углерода.

За последние полвека без ядерной энергетики выбросы CO₂ от производства электроэнергии были бы почти на 20 % выше, а общие выбросы, связанные с энергией, на 6 % выше. Почти 90 % предотвращенных выбросов приходилось на страны с развитой экономикой. ЕС и США избежали около 22 Гт выбросов, что составляет более 40 % от общего объема выбросов в энергетическом секторе в ЕС и четверть в США. За 1971–2018 гг. без ядерной энергии выбросы от производства электроэнергии были бы на 25 % выше в Японии, на 45 % – в Корею и более чем на 50 % – в Канаде. Эксперты МЭА даже делают вывод о том, что снижение доли ядерной энергетики в мировом энергетическом балансе в последние годы является одной из основных причин того, почему не удалось остановить увеличение выбросов CO₂ несмотря на быстрое расширение использования ВИЭ [5].

Однако будущее ядерной энергетике неопределенно, поскольку в странах с развитой экономикой стареющие АЭС начинают закрываться, отчасти ввиду политики поэтапного отказа от них, а также в результате экономических и регулирующих факторов. В связи с этим развитые страны могут потерять ~25 % своего ядерного потенциала уже к 2025 г. и две трети к 2040 г. Резкое снижение мощности ядерной энергетике в странах с развитой экономикой будет иметь серьезные последствия. Например, для того чтобы возобновляемые ветровые и солнечные системы смогли восполнить дефицит ядерной энергии, их рост должен будет ускориться до беспрецедентного уровня. За последние 20 лет мощность ветровой и солнечной энергетике в странах с развитой экономикой выросла примерно на 580 ГВт, но в течение следующих 20 лет потребуются увеличить мощность почти в пять раз.

По мнению авторов, это потребует существенного расширения инфраструктуры ВИЭ с резким увеличением площадей для новых генерирующих электростанций, которые к тому же, особенно солнечные электростанции, могут быть удалены от источников воды (основного водородного сырья), а также от основных потребителей водородного топлива. Кроме того, такое широкомасштабное увеличение производства возобновляемой энергии может привести к негативному воздействию на окружающую среду в региональном и глобальном плане.

Такое значительное увеличение производства возобновляемой энергии создаст серьезные проблемы

для интеграции новых источников в более широкую энергетическую систему. Переход на чистую энергию в странах с развитой экономикой также потребует дополнительных инвестиций в размере \$1,6 трлн в течение того же периода, что в конечном итоге нанесет значительный ущерб потребителям из-за увеличения тарифов на электроэнергию [29]. Поэтому ядерная энергетика, по мнению авторов, необходима, и ее резкое падение недопустимо.

Водород, как уже отмечалось, является энергоносителем, который может использоваться для хранения огромного количества энергии, устойчивости и безопасности энергосети, а также в качестве сырья для большей части химической промышленности. В то же время мировой спрос на его производство и новые области применения может увеличиться в десять раз, и, для того чтобы его удовлетворить, необходимы новые технологии с использованием всех низкоуглеродных источников энергии в мире, особенно ядерных. В этой связи важно отметить, что потребность в увеличении производства водорода будет в значительной степени влиять на развитие самой ядерной энергетике.

Атомные электростанции (АЭС) могут производить водород различными способами при минимальных выбросах в атмосферу, используя при этом постоянную тепловую энергию и электроэнергию, которые она надежно обеспечивает. Получение водорода с помощью ядерной энергии [30] имеет следующие преимущества:

- АЭС и особенно специализированные атомные энерготехнологические станции (АЭТС) могут использоваться для получения водородного топлива не только электроэнергию, но также и тепловую энергию.

- Создается новый рынок – водородный, в котором водород можно продавать или в качестве электроэнергии (через топливные элементы) в пиковые периоды, когда цена выше, или в качестве топлива для транспортировки, или в качестве химического сырья для промышленности, в зависимости от того, что более выгодно.

- Происходит выравнивание профиля спроса на электроэнергию в сети.

- ЯЭ позволяет более эффективно вырабатывать энергию другим, кроме ядерных, производителям, работающим в основном в пределах их номинальной нагрузки.

- ЯЭ уменьшает загрязнение, связанное с производством электроэнергии, потому что АЭС работают с более высокой эффективностью.

- ЯЭ помогает развитию возобновляемых источников энергии, которые нуждаются во временном хранении энергии (например, водород), путем сглаживания колебаний энергии.

- ЯЭ делает атомные электростанции более конкурентоспособными и безопасными за счет интеграции с высокотемпературным электролизом и термохимическими циклами.

Водород на АЭС может производиться пятью способами: 1) радиолиз; 2) электролиз; 3) высокотемпературный паровой электролиз; 4) гибридное термохимическое расщепление воды; 5) термохимическое расщепление воды.

В первом методе применяется ядерное излучение для прямого расщепления молекулы воды на водород и кислород; во втором – используется электричество, полученное из ядерной энергии для электролиза воды; третий и четвертый методы называются гибридными, потому что здесь задействуют электричество и высокую температуру, чтобы разделить воду; в последнем методе – непосредственно высокотемпературное тепло. Более подробно об этих методах написано в работе [19].

Все атомные электростанции, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, предназначены для постоянной генерации электрической энергии в режиме базовой нагрузки электрической сети. Поэтому коэффициент нагрузки, определяемый как отношение генерируемой мощности к производственной мощности генератора, количественно определяет степень частичной нагрузки. Этот коэффициент для ядерной энергии квазипостоянный и составляет около 0,98. Для угольных электростанций нагрузка колеблется от 0 до 0,75; для природного газа – от 0,20 до 0,60; для гидроэнергетики начинается с 0,40 по утрам и достигает 0,60 по вечерам и 0,05 по ночам; солнечная энергия доступна только в течение дня и достигает своего максимального коэффициента нагрузки примерно в полдень. Работа при частичной нагрузке любой электростанции не может быть оптимальной, следовательно, любое изменение нагрузки может привести к потерям эффективности, то есть для выработки единицы электрической энергии необходимо больше топлива. Это отражается в колебаниях цен на электроэнергию [19].

5. Экономика получения водорода с использованием ядерной энергетики

АЭС могут производить водород различными способами, все они значительно уменьшают выбросы в атмосферу, вырабатывая при этом постоянную тепловую и электрическую энергию.

Существующие ядерные установки могут производить пар высокого качества при меньших затратах, чем котлы на природном газе, и могут использоваться во многих промышленных процессах, включая паровую конверсию метана.

Тем не менее для ядерной энергетики наиболее подходящим является вариант, когда произведенный высококачественный пар подвергается электролизу и расщепляет воду на чистый водород и кислород. При этом один ядерный реактор мощностью 1 000 МВт может производить более 200 000 т водорода в год, соответственно, десять ядерных реакторов – около 2 млн т в год, или одну пятую от водорода, используемого в настоящее время в Соединенных Штатах [31].

Этот процесс позволит коммунальным предприятиям производить и продавать водород на региональном уровне в качестве товара в дополнение к обеспечению чистой и надежной электроэнергией в сети, а новый поток доходов может помочь создать экономическую основу для поддержания работоспособности реакторов.

Ожидается, что усовершенствованные реакторы будут работать при значительно более высоких температурах и позволят АЭС более эффективно производить водород, что значительно увеличит масштабы промышленности и улучшит экономические показатели.

Высокотемпературные реакторы могут также способствовать значительному сокращению выбросов, производимых при традиционном методе паровой конверсии метана, путем замены природного газа, сжигаемого для производства пара и создания необходимого количества тепла для риформинга смесей природного газа и пара.

Кроме того, разрабатываются новые электрохимические процессы с использованием атомной энергии для прямого преобразования природного газа в водород и пластмассы, что позволит полностью избежать выбросов в атмосферу и достичь значительно более высокой эффективности и экономичности. Наконец, ядерная энергия может поддержать обрабатывающую промышленность стран во многих секторах, обеспечивая чистую энергию для производства водорода, топлива, удобрений, стали, пластмасс и химикатов [31, 32].

Следует также отметить, что водород, полученный посредством ядерной энергии, имеет преимущества по сравнению с другими источниками энергии по некоторым важным показателям. Во-первых, это более качественный процесс производства, поскольку только такой водород обладает самой высокой эффективностью получения энергии без выбросов парниковых газов; во-вторых, есть возможность создания крупномасштабного производства водорода; в-третьих, эксплуатационные расходы станций менее подвержены волатильности цен на топливо, чем электростанции, работающие на ископаемом топливе. Так, повышение стоимости топлива на 50 % приводит только к ~5 % увеличению общей стоимости производства ядерной электроэнергии, то есть ядерная экономика производства водорода более стабильна. Далее, АЭС предоставляют услуги по обеспечению надежности в качестве диспетчерского оперативного контроля, то есть выходные данные могут быть представлены в систему по мере необходимости. В совокупности ядерная энергетика помогает укрепить энергетическую безопасность [2, 5].

Таким образом, можно констатировать: водород, получаемый на АЭС – это относительно дешевый чистый продукт, производимый в больших объемах. В то же время водород является аккумулятором энергии, и увеличение объемов производства водорода увеличивает и мощности ядерной энергии, то есть решаются некоторые проблемы атомной энергетики.



При этом для получения водорода могут быть использованы все виды ядерных реакторов, поскольку они могут производить электрическую энергию и технологическое тепло. Важным фактором, который следует учитывать при выборе реактора для получения водорода, является мощность. Современные легководные реакторы большой мощности лучше подходят для получения электричества и производства

водорода (особенно при непииковой мощности), а реакторы малой и средней мощности на основе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) являются привлекательным вариантом только для производства водорода. На рис. 2 схематически показана технология производства водорода с использованием АЭС [24].

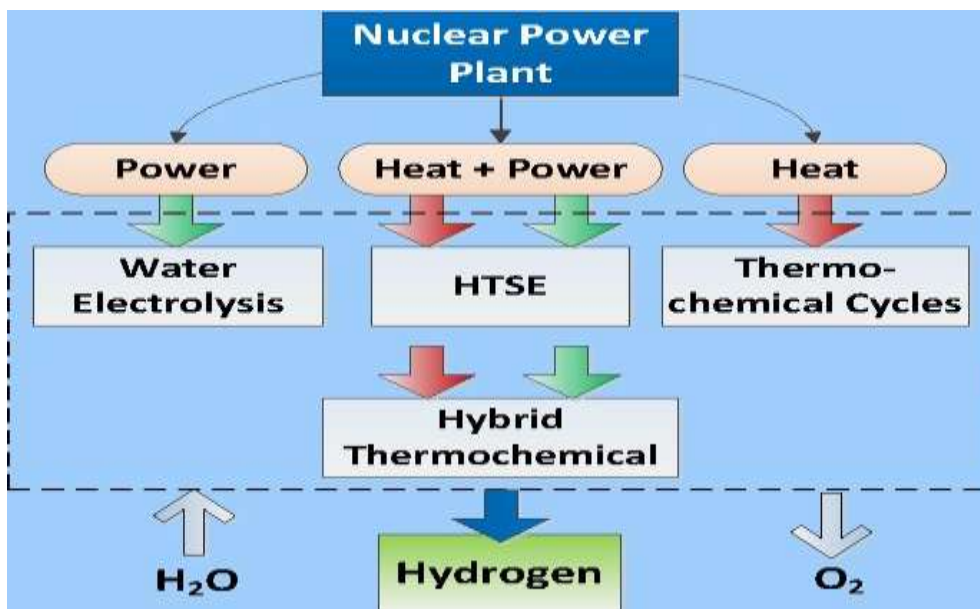


Рис. 2 – Схема технологий производства неуглеродного водорода [24]
Fig. 2 – Diagram of technologies for the production of non-carbon hydrogen [24]

Рассмотрим некоторые, наиболее важные технологии, более подробно.

5.1. Низкотемпературный электролиз

В настоящее время низкотемпературный электролиз (или электролиз воды) является наиболее доступным и простым способом получения водорода непосредственно из воды. Теоретические расчеты показывают, что минимальный потенциал элемента, необходимый для этого процесса, составляет 1,229 В при 0,1 МПа, что эквивалентно минимальной энергии 3,56 кВт·ч / Нм³, или 39,61 кВтч / кг произведенного водорода. Однако практические значения составляют около 1,7~2,1 В с энергией 44,5~50,1 кВт·ч / кг Н₂. Необходимый запас воды составляет около 11,1 л / кг Н₂. Водород может быть получен при атмосферном или более высоком давлении, однако последний вариант снижает эффективность производства. Главным образом применяется электролиз: щелочной (<150 °С, но обычно около 90 °С); неорганическая щелочь (90÷120 °С); твердый полимер (80÷150 °С); PEM (200÷400 °С).

Необходимо отметить, что внепииковое производство такого водорода позволяет улучшить его экономическую составляющую за счет непииковой электрической энергии для производства электролитического водорода, который впоследствии может быть

использован в топливных элементах или двигателях внутреннего сгорания для производства энергии во время высокой нагрузки [32, 33]. Эта схема доступна только для стран / электрических сетей с высокой долей ядерной энергии. Одним из недостатков является стоимость электролизеров в часы пик, когда эти устройства не используются.

Процессом с высокой эффективностью преобразования (КПД) является генерация водорода при разложении жидкостей в низкотемпературной плазме [34].

5.2. Производство водорода с применением новых технологий

При высокотемпературном паровом электролизе (НТЕ, НТСЕ) используется как тепловая, так и электрическая энергия, поэтому он более эффективен, чем низкотемпературный электролиз. Количество энергии, необходимое для разрыва связей молекул воды, является постоянным, но в НТЕ часть предоставленной энергии находится в тепловой форме, что позволяет избежать потери энергии в процессе преобразования тепловой энергии в электрическую. Существуют различные варианты НТЕ: расплавленный карбонат (300÷600 °С); твердооксидное топливо (800÷1 000 °С).

Термохимическое расщепление воды – эффективный и экономичный способ производства водорода. Различные химические реагенты вступают в химические реакции, приводящие к расщеплению воды. Реагенты рециркулируют и регенерируют таким образом, что в качестве общей реакции на входе будут выделяться тепло и вода, а на выходе – водород и кислород.

Обширные исследования этого направления начались в конце 1960-х гг., и к началу 1970-х гг. поя-

вилось более 100 публикаций, касающихся термохимических циклов, и в последнее время исследования сосредоточены на нескольких из них. Среди наиболее перспективных циклов, имеющих высокий потенциал эффективности и низкий уровень сложности с точки зрения протекания химических реакций и разделения [35], являются циклы семейства серы, такие как цикл серного йода (S-I) – один из наиболее изученных, в котором используется тепло в качестве входных данных (рис. 3).

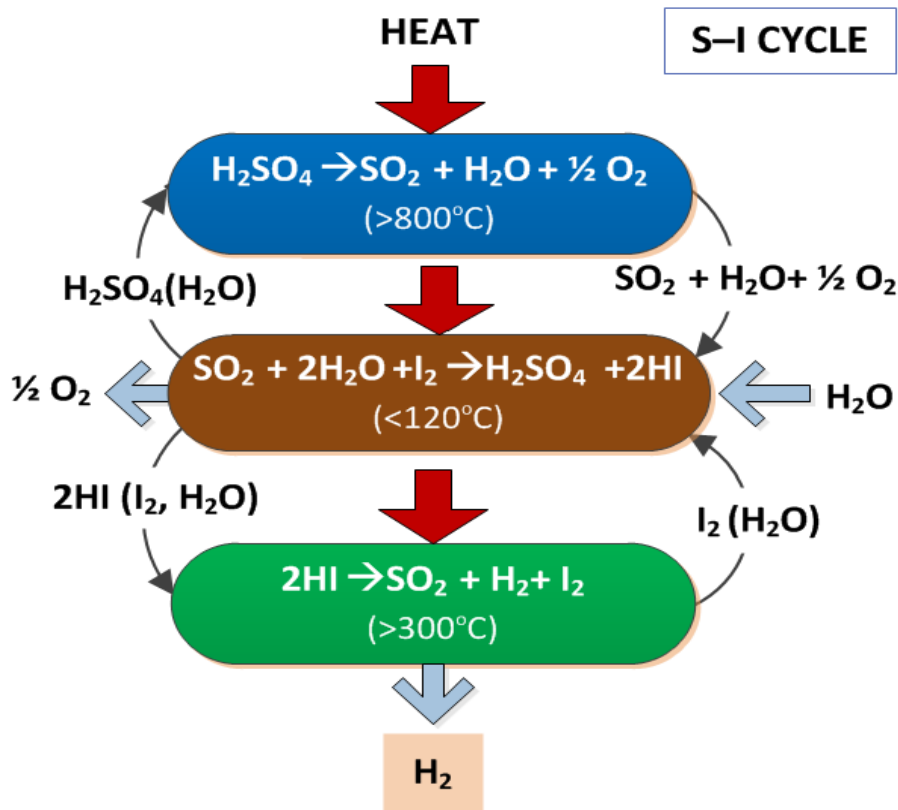


Рис. 3 – Термохимический цикл серного йода (S-I) [35]
 Fig. 3 – The thermochemical cycle of sulfuric iodine (S-I) [35]

Гибридный термохимический цикл медь-хлор (Cu-Cl) также широко исследуется и регулируется реакциями с тепловым возбуждением и процессами с электрическим приводом при температуре около 500 °С. Для гибридного Cu-Cl существует 3, 4 или 5 ступенчатых циклов. Перспективными и многообещающими являются также гибридные циклы серы (HyS) и магния-хлора (Mg-Cl), показанные на рис. 4.

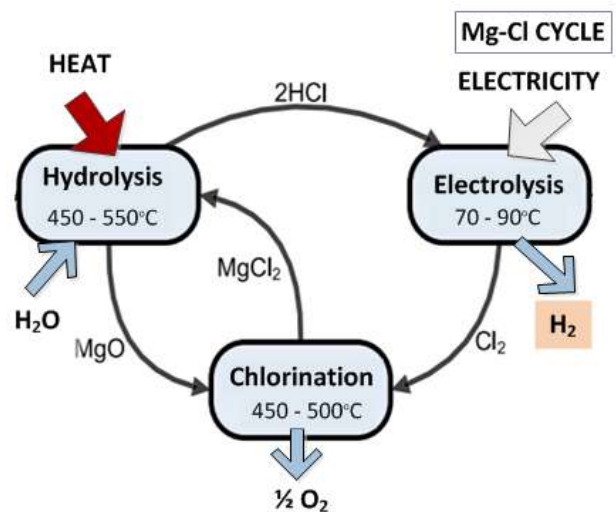


Рис. 4 – Гибридные циклы серы (HyS) и магния-хлора (Mg-Cl) [35]

Fig. 4 – Hybrid cycles of sulfur (HyS) and magnesium-chlorine (Mg-Cl) [35]

Преимущество термохимических циклов заключается в использовании тепла, более низкого качества по сравнению с электричеством, поэтому большинство современных АЭС работают с тепловой эффективностью около 35 %.

Сложная часть термохимических циклов – высокая температура. Пар в ядерных реакторах составляет около 300 °С, что недостаточно для термохимических циклов. Тем не менее реакторы с высокой и очень высокой температурой являются удобными для термохимических и гибридных циклов при производстве водорода.

5.3. Производство водорода на АЭС из ископаемого топлива

Наиболее распространенным методом получения водорода из ископаемого топлива является паровой риформинг природного газа. В этом процессе пар при температуре 500–900 °С реагирует с природным газом в присутствии никелевого катализатора. Химическая реакция может быть описана как: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{тепло}$, $\text{CO} + 3\text{H}_2$.

Этот процесс может поддерживаться либо высокотемпературным атомным реактором (НТР), либо обычным ядерным реактором с использованием дополнительных нагревателей. Однако на сегодняшний день высокотемпературный процесс осуществляется посредством сжигания огромного количества ископаемого топлива. На практике данная реакция обычно сопровождается реакцией газового сдвига при более низкой температуре, которая может быть описана как: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{тепло}$, где выделяемое тепло намного меньше, чем тепло, подаваемое на первом этапе.

Газификация угля является еще одной технологией, основанной на ископаемом топливе, и составляет около 18 % мирового производства водорода. Этот H_2 входит в состав производимого синтез-газа, который также проходит описанную выше реакцию газового сдвига. Однако угольная отрасль – одна из самых вредных с точки зрения выбросов, хотя предпринимаются меры по улучшению экологических показателей с помощью внедрения «чистых угольных технологий» [36].

6. Ядерно-водородная энергетика в России

6.1. Концепция ядерно-водородной энергетики

Россия имеет огромный опыт в решении ключевых проблем ядерной энергетики XX в. и способна внести достойный вклад и в XXI в. [28]. Концепция производства водорода с помощью ядерной энергии была разработана в СССР еще в начале 1970-х гг. В данной концепции отмечались преимущества подхода, который объединяет достоинства ядерной энергетике (неограниченные ресурсы топлива и минимальное воздействие на окружающую среду при производстве электричества, тепла и водорода) и полезные свойства водорода (неограниченные запасы сырья для его производства (воды), удобство использова-

ния и транспортировки, экологическая чистота в качестве топлива, востребованность в химической промышленности, возможность использования в качестве аккумулятора энергии). Констатировалось, что такая энергетика сохранит нефть и газ для неэнергетических нужд и обезопасит атмосферу от выбросов продуктов сгорания [37].

Недостатком крупнотоннажного производства водорода и водородсодержащих продуктов путем паровой конверсии природного газа (метана) является расход газа – около половины от исходного газа расходуется на проведение данного эндотермического процесса.

С целью экономии природного газа и снижения нагрузки на окружающую среду была разработана технологическая схема паровой конверсии метана с подводом тепла от ядерного ВТГР. Далее, в долгосрочной перспективе наибольший интерес представляют способы получения водорода из воды с помощью тепловой и электрической энергии ядерных реакторов, к которым относятся перечисленные замкнутые термохимические и термоэлектрохимические циклы, высокотемпературный электролиз, а также различные комбинированные способы получения водорода из воды.

Стыковка высокотемпературных ВТГР с высокотемпературными электролизерами сможет дать суммарный КПД производства водорода до 50 %.

Переменный график нагрузок энергосистем и особенно ночной провал электрической нагрузки – одна из важнейших проблем энергетике, в том числе ядерной. Характерная для АЭС высокая капитальная стоимость производимой энергии, а также стремление к повышению эксплуатационной надежности основного оборудования и главным образом топлива делают желательными их функционирование в базовом режиме нагрузки. Эта задача может быть решена путем применения водородной технологии по следующей схеме: во время ночного провала происходит производство и накопление водорода, который при пиковых нагрузках вновь превращается в электроэнергию.

Энергоноситель (чистый водород или синтез-газ), производимый на атомном энерготехнологическом комплексе, может использоваться для дальнего теплоснабжения коммунально-бытового и коммерческого сектора. В этом случае реализуется хемотермическая передача энергии.

6.2. Инициативы России по ядерно-водородной энергетике

Высокотемпературные реакторы, способные нагревать гелиевый теплоноситель до 1 000 °С, могут быть использованы для производства электроэнергии с высоким КПД в прямом газотурбинном цикле и снабжения теплом и электричеством водородных и иных химических производств, а также металлургических производств и установок опреснения воды.

Преимуществом гелия перед другими теплоносителями, применяемыми в ядерной энергетике, явля-

ется его химическая и нейтронная инертность, а также неизменность фазового состояния [37].

Для получения чистого водорода в России были разработаны: топливо к ВТГР, конструкция модульного реактора, высокотемпературные парогенераторы и теплообменники, циркуляторы с гелиевым теплоносителем, системы пассивной безопасности; технология гелиевого теплоносителя, системы расхолаживания, система преобразования энергии, модели и коды. В опытно-промышленном производстве отработаны технологии адиабатической конверсии метана, мембранного выделения водорода. Уровень готовности технологий позволяет в короткие сроки реализовать проект АЭС с ВТГР в России [37].

Экспериментальная база существует и действует в различных институтах и центрах, таких как НИЦ «Курчатовский институт», НИИ НПО «Луч», ОКБМ им. И.И. Африкантова, ООО НТЦ «ТАТА» и других институтах, где имеются экспериментальные стенды и установки. Информация по этим направлениям была соответствующим образом суммирована, законсервирована в различных материалах и сейчас доступна для использования.

Россия может и должна взять на себя инициативу крупномасштабного экологически чистого промышленного производства водорода и поставок его на рынок с высокой добавочной стоимостью. Ядерное производство водорода будет способствовать декарбонизации,кратно увеличит ядерную долю в энергетике, решит проблему углеродных ресурсов.

Предлагается создать крупномасштабное экологически чистое производство водорода на базе разработанных в России технологий атомно-водородной энергетики. Масштаб производства водорода сравним в энергетическом эквиваленте с традиционным продуктом Росатома – производством электроэнергии. При этом возрастет доля атомной энергии в глобальном энергетическом балансе, потребуются кратное увеличение объемов производства и количества высококвалифицированных рабочих мест.

В настоящее время стоимость водорода ~ \$6 за 1 кг [38]. При этом АЭС с реакторной установкой (РУ) ВТГР для производства водорода окупается даже при \$2 за 1 кг. АЭС в составе 4 блоков по 600 МВт (тепл.) производит около 1 млн т водорода в год, или 50 млн т водорода в год для 50 АЭС.

Проект крупномасштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа представляет интерес для зарубежных партнеров, особенно для стран АТР, и может разрабатываться как совместный проект.

Актуальной может быть инициатива создания в России Международного центра: «Атомный энерготехнологический комплекс на Дальнем Востоке» с участием стран АТР, в котором ключевым должен стать проект «Атомный энерготехнологический комплекс с модульными ВТГР для производства водорода из воды и природного газа».

Среди стран АТР одним из наиболее заинтересованных партнеров является Япония, которая хочет отказаться от сжигания ископаемого топлива и перейти на водород.

Участие в международном сотрудничестве (Hydrogen Council) по водородным технологиям и топливным элементам будет способствовать привлечению внешних и внутренних инвесторов, откроет новые возможности для зарубежного бизнеса. Атомно-водородная энергетика – стабильный путь для глобального энергетического перехода и технологического прорыва. Развитие водородной энергетики – важный элемент решения задачи вхождения госкорпорации «Росатом» в число технологических лидеров мира [37].

6.3. Состояние и перспективы практического развития

ядерно-водородной энергетики в России

В то же время Россия пока не имеет специализированной программы продвижения водородной экономики, но водородные технологии упоминаются в ряде стратегических документов, в том числе в энергетике. Так, в действующей Энергетической стратегии России на период до 2030 г., Прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 г. и разработанном с их учетом Плане мероприятий (дорожной карте) «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [38] в качестве одного из приоритетных направлений научно-технологического развития ТЭК России обозначено освоение технологий водородной экономики, включая: развитие технологий производства водорода (в том числе жидкого) из воды с помощью электроэнергии от АЭС, ТЭС и энергоустановок на ВИЭ; создание водородных систем аккумулирования энергии и покрытия неравномерностей графика нагрузки на объекты генерации; разработку технологий безопасного и эффективного хранения и транспортировки водорода.

«Водородная энергетика» рассматривается Минэнерго России как одно из наиболее перспективных направлений развития рынка систем хранения электроэнергии (согласно «Концепции развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации» [23]).

Россия обладает значительным потенциалом производства водорода. По оценкам Инфраструктурного центра EnergyNet, производство водорода только на действующих российских генерирующих объектах может позволить России претендовать на горизонте до 2030 г. на весомую долю глобального рынка водородного топлива. Совокупный производственный потенциал России, оцененный Инфраструктурным центром EnergyNet на основе величины выпускаемого и невыпускаемого резервов мощности в энергосистеме страны, составляет около 2 млн т водорода в год (при КИУМ на уровне 46 %), но может возрасти до 3,5 млн т в год (при увеличении КИУМ до 85 %) [38].



Определенный интерес к развитию технологий промышленного производства водорода в России проявляет корпоративный сектор, особенно ГК «Росатом» и ПАО «РусГидро».

Попытку коммерциализации водородных технологий в 2005 г. предприняло ПАО «ГМК «Норильский Никель» – с этой целью компания совместно с Российской академией наук учредила ООО «Национальная инновационная компания “Новые энергетические проекты”» для разработки и внедрения топливных элементов. Однако в 2009 г. было принято решение о ее ликвидации в рамках реализации политики компании по избавлению от непрофильных и убыточных активов.

ПАО «РусГидро», начиная с июня 2013 г., взаимодействует с Kawasaki Heavy Industries и Правительством Магаданской области по вопросу определения технологической и экономической возможности реализации проекта по промышленному производству сжиженного водорода на территории Дальнего Востока.

Водородная энергетика включена в перечень стратегических направлений научно-технологического развития ГК «Росатом» и ее программу поисковых научных исследований. При этом приоритетным механизмом финансирования развития водородной энергетике, по заявлению госкорпорации, мог бы стать национальный проект в области атомной науки и техники.

В августе 2018 г. АО «Концерн Росэнергоатом» (оператор всех российских АЭС, входит в Электроэнергетический дивизион ГК «Росатом») заключила контракт с АО «ОКБМ Африкантов» (входит в Машиностроительный дивизион ГК «Росатом») на обоснование разработки проектных предложений по энергоэффективному и экологически чистому промышленному производству водорода на атомной энерготехнологической станции (АЭС). Согласно материалам госкорпорации [23], инвестиции в создание головной АЭС для крупномасштабного производства водорода могут составить около 275 млрд руб. (из которых 230 млрд руб. – капитальные вложения в строительство АЭС и топливо), а ее сооружение может быть завершено к 2030 г.

Ранее в апреле 2018 г. сообщалось о намерении ГК «Росатом» создать в России сеть водородных АЭС и ядерно-водородных комплексов для генерации водородного топлива, при этом производство товарного водорода по технологии электролиза воды с использованием атомной энергии предполагалось локализовать на базе существующих и строящихся российских АЭС. Кроме того, в январе 2019 г. сообщалось о разработке в АО «ВНИИАЭС» (входит в Электроэнергетический дивизион ГК «Росатом») технических предложений и проведении технико-экономической оценки создания и использования в составе отдельных АЭС автономных модулей по производству и накоплению водорода для энергообеспечения, промышленности и транспорта [23].

7. Гибридные системы ядерной и возобновляемой энергии

Как было показано, в настоящее время существуют два основных источника с низким уровнем выбросов парниковых газов: 1) ВИЭ (солнечная, ветровая, геотермальная, гидро-, биомассы, геотермальные и другие технологии); 2) ядерная энергетика. Оба источника имеют достоинства и недостатки и оказывают весомое воздействие на мировой баланс энергоресурсов, а также на производство водорода. Важно отметить, что во многих странах с развитой экономикой как ВИЭ, так и ЯЭ присутствуют и рассматриваются как конкурентные технологии, однако, как показал анализ этой работы, для глобального перехода на водородные энергоносители необходимо развивать обе технологии, причем не как конкурирующие, а в симбиозе. Ядерная энергетика сможет обеспечивать необходимую, в зависимости от спроса, электроэнергию, тепло и водород, стабильную регулируемую мощность, в то время как возобновляемая задействуются периодически. Получается гибкая система эксплуатации в так называемом режиме следования за нагрузкой, то есть ядерная энергия позволяет повышать эффективность возобновляемой. В результате такая система даст определенный синергетический эффект. Необходимость создания аналогичной гибридной системы, состоящей из ядерной энергетике и традиционной на ископаемом топливе, мы рассматривали два года назад в работе [39]. Роль возобновляемой и ядерной энергии в устойчивом развитии, изменении климата более подробно рассмотрена в монографии [40, с. 182–192]. Вывод, сделанный на основе исследований, представленных в монографии и других наших работах, состоял в том, что «только ядерная энергия способна устойчиво и надежно поставлять большие объемы стабильной, чистой и экономичной энергии» [40, с. 195].

Идея совмещения технологий ядерной и возобновляемой энергетике была рассмотрена на совещании международных экспертов МАГАТЭ, состоявшегося в октябре 2018 г. [41]. На совещании было отмечено, что такие совмещенные (гибридные) системы ядерной и возобновляемой энергии представляют собой комплексные установки, включающие ядерные реакторы, генерацию возобновляемой энергии и промышленные процессы, позволяющие одновременно выполнять задачи обеспечения гибкости энергосистемы, уменьшения выбросов парниковых газов и оптимального использования инвестированного капитала. Во многих развитых странах существуют программы по разработке ядерных реакторов четвертого поколения. Эти реакторы можно применять для создания гибридной энергетике, в которую будут входить высокотемпературное тепло, электроэнергия и водород. Кроме того, их можно использовать для опреснения морской воды, централизованного теплоснабжения, охлаждения и другого.



Гибридные энергосистемы, совмещающие технологии ядерной и возобновляемой энергетики, генерируют намного меньше парниковых газов по сравнению с системами, работающими на традиционном органическом топливе – один из выводов Совещания [43].

В будущем все энергетические системы должны быть гибридными и представлять комбинацию различных энергоресурсов и методов преобразования энергии, работающими как одна система с максимально оптимизированной эффективностью и минимальным воздействием на окружающую среду. Эта система будет устойчивой и экологически безопасной, а водород в данном случае станет связующим звеном.

Внедрение гибридных систем окажет значительное положительное воздействие на страны, обладающие большими запасами ископаемого топлива, поскольку эти ресурсы представляют высокую ценность и могут быть переработаны в различные химические вещества и материалы с большей выгодой, чем их использование для производства тепла, – также один из выводов совещания.

Особое значение для практической реализации гибридных систем ядерной и возобновляемой энергетики с водородом в качестве энергоносителя имеют отечественные разработки и опыт длительной эксплуатации крупнейшей криогенной водородной системы по накоплению, хранению и транспортировке к потребителю больших запасов криогенного водорода [42–48]. Этот опыт подтверждает возможность безопасного накопления, длительного хранения и транспортировки на большие расстояния значительных количеств криогенного водорода [49–52].

Большое значение имеют системы обеспечения водородной безопасности, основанные на газоаналитических и сенсорных системах [53]. Большое значение имеют разработанные и апробированные технологии тушения крупных техногенных пожаров с применением криогенного газифицирующегося азота, который используется в больших объемах для технологических целей на водородном комплексе [53].

Внедрение в промышленность гибридных систем ядерной и возобновляемой энергии в настоящее время находится на стадии научных исследований, которые необходимо интенсифицировать. Практическая реализация проектов в этой области может ускориться с учетом различных рыночных механизмов, включая повышение тарифов на выбросы, что приведет к росту цен на все виды ископаемого топлива. Крайне важно выполнить экономические расчеты для более точных оценок стоимости и конкурентоспособности, объемов выбросов парниковых газов и других технических характеристик таких гибридных систем.

8. Симбиоз ядерной и водородной энергетики

Авторы данной статьи термин «симбиоз» используют для описания сути экономических процессов формирования ядерно-водородной энергетической системы, в которой оба элемента получают взаим-

ную экономическую выгоду. Развитие водородной энергетики может принести большую экономическую прибыль компаниям, вкладывающим средства в эту отрасль. Одновременно это стимулирует развитие ядерной энергетики, которая может не только обеспечить энергоресурсами водородную энергетику, но также и существенно нарастить производство электроэнергии и тепла для других секторов экономики. Это может сделать ядерную энергетику более привлекательной для бизнеса с точки зрения рентабельности инвестиций.

Таким образом, формируется своеобразный экономический симбиоз, что может привести к созданию интегрированной ядерно-водородной системы и соответствующей инфраструктуры, для надежного функционирования которой потребуются огромные инвестиции, учитывая необходимость разработки новых технологий и производства различного оборудования. В результате участники этого процесса будут получать существенную прибыль и будут заинтересованы во взаимном сотрудничестве, которое принесет не только экономическую выгоду, но также внесет существенный вклад в устойчивое развитие, уменьшив роль невозобновляемых источников энергии из ископаемого топлива в мировой экономике и их вредное воздействие на экосистему.

Отметим также, что своеобразный симбиоз наблюдается и при формировании солнечно-водородной, ветро-водородной или любой ВИЭ-водородной энергетической системы, роль которых в мировой энергетике растет, но их значение и удельный вес, как было указано, в устойчивом развитии будет меньше, чем конкурирующей с ней ядерно-водородной энергетической системы. В то же время разумное сочетание и развитие обеих систем может оказать своеобразный синергетический эффект для низкоуглеродной энергетики в планетарном масштабе.

9. Заключение

Роль ядерной энергии в производстве чистого водорода значительна. Водород, полученный таким способом, улучшает экологические показатели, повышает эффективность производства и, соответственно, экономическую эффективность в различных отраслях промышленности.

Использование водорода в трех секторах (производство и распределение электроэнергии, нефтехимическая сфера и транспортный сектор) имеет большое значение для будущей водородной экономики. Вопросы использования газопроводов и соответствующей инфраструктуры для транспортировки и хранения водорода нередко вызывают интерес в научной среде. На наш взгляд, эта тема весьма перспективна, особенно в связи с реализацией ряда проектов, в частности «Северного потока – 2», основные проблемы которого рассмотрены в статье [54].

Ядерная энергетика, в отличие от других генераций, обеспечивает возможность стабильной базовой



нагрузки, поскольку остальные генераторы работают в условиях меняющихся нагрузок в зависимости от спроса и наличия топлива. Работа, даже при частично переменной нагрузке, не является оптимальной и приводит к увеличенному расходу топлива и большому количеству выбросов парниковых газов.

Роль ядерной энергетики имеет решающее значение при создании реакторов поколения IV (например, SWCR-CANDU, ВГТР) как источников выработки электроэнергии с базовой нагрузкой без выбросов парниковых газов в сочетании с термохимическими циклами (такими как цикл Cu-Cl) для генерации водорода в условиях базовой нагрузки.

Производство водорода таким способом может сочетаться с электролизом воды на децентрализованных станциях, которые интенсивно работают в непиковые периоды. В пиковые периоды водород может быть преобразован обратно в электроэнергию с помощью топливных элементов и, в случае коммерческой выгоды, может продаваться в качестве топлива для транспортного сектора или в качестве сырья в различных химических и других отраслях промышленности. Выравнивание нагрузки для энергосети с помощью этого водорода является очень полезным и важным результатом с лучшим соответствием спроса предложению.

Водород часто называется основным транспортным топливом будущего, поэтому необходимы дальнейшие разработки систем заправки и хранения, топливных элементов и инфраструктуры. При этом важно, чтобы он генерировался из чистых источников в целях уменьшения загрязнения от вредных примесей и парниковых газов, что, возможно, позволит снизить темпы глобального потепления.

Устойчивое и эффективное производство водорода может быть достигнуто путем объединения (симбиоза) ядерной и возобновляемой энергии с водородным энергоносителем в единую гибкую гибридную систему, в которой могут быть использованы все преимущества этих источников энергии. Создание такого энергетического симбиоза двух технологий является важным и необходимым условием развития будущей водородной экономики.

Прогнозируемый многократный рост спроса на водород в мире и формирование глобального и регионального рынков водорода предполагают развитие соответствующей инфраструктуры, включая создание мощных и стабильных источников производства энергии без дополнительной экологической нагрузки на окружающую среду. Это может превратить ядерную энергетика в основной элемент такой инфраструктуры, что, соответственно, может сделать ее привлекательной для бизнеса.

Формирование ядерно-водородной энергетической системы предполагает развитие международного сотрудничества академических и деловых кругов заинтересованных стран, что возможно только в условиях смягчения геополитической турбулентности, особенно в отношениях между Россией и США.

Примечательно, что сегодня учеными широко исследуются не только экономические и философские вопросы жизнеспособности водородно-энергетической системы в планетарном масштабе, ее концепция и философия, но и философские вопросы генезиса Вселенной. Так, в недавно вышедшей статье профессора Т.Н. Везироглу рассматривается новая водородная теория происхождения Вселенной – Спин-топ-теория (Spin-top-theory) [55]. По нашему мнению, эта теория более точно описывает возникновение Вселенной, чем теория Большого взрыва.

Эта теория основана на рассмотрении семени Вселенной, созданного из водорода (U-Seed). Со взрывом U-Seed, сделанного из водорода, водород и его продукты термоядерной реакции начинают распространяться и формировать растущий эллипсоид – центр Вселенной (U-Center). Затем в результате гравитационного притяжения небесные тела начинают двигаться к вселенскому центру (U-Center), чтобы реформировать U-Seed. Время этого расширения, периоды сокращения, границы Вселенной были вычислены с высокой точностью. Показано, что цикл Вселенной составляет около 148 млрд лет, и он повторяется вечно.

Список литературы

- [1] Гусев, А.Л. Столетний меморандум от 13 ноября 2006 года Главам Большой восьмерки / А.Л. Гусев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2007. – № 3. – С. 11.
- [2] Zhiznin, S.Z. Energy security: Theoretical interpretations and quantitative evaluation / S.Z. Zhiznin, V.M. Timokhov, V. Dineva // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2020. – Vol. 10. – No. 2. – P. 390–400.
- [3] Гусев, А.Л. Получение альтернативных энергоносителей с помощью атомно-водородного цикла и их применение / А.Л. Гусев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2007. – № 6. – С. 175–176.
- [4] Илькаев, Р.И. Создание энергетической инфраструктуры и перспективных энергопромышленных комплексов на базе плавучих АЭС / Р.И. Илькаев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2007. – № 4. – С. 205–206.
- [5] Nuclear power in a clean energy system 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/nuclear/>. – (Дата обращения: 18.08.2019.).
- [6] Шалимов, Ю.Н. Водород в системах традиционной и альтернативной энергетика / Ю.Н. Шалимов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2013. – № 5/1. – С. 10–44.
- [7] Гусев, А.Л. Экономическая, энергетическая, экологическая и геополитическая безопасность Рос-



сии в 21 веке. Нужна ли России Водородная энергетика? Экономика, экология и общество России в 21-м столетии / А.Л. Гусев, Ю.П. Дядюченко, В.М. Чертов // Труды 4-ой Международной научно-практической конференции. Т.1. Спб.: Нестор, 2002. – 400 с.

[8] US Department of Energy. The Green Hydrogen Report, NREL, 1995.

[9] Гольцов, В.А. Современное состояние водородной экономики и водородного транспорта: экономика, техника, инфраструктура / В.А. Гольцов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE): Спецвыпуск. – 2003. – Т. 21–22. – С. 172.

[10] World Energy Council, World Energy Issues Monitor, 2017.

[11] Cackett N., Honda Clarity FCV review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autocar.co.uk/car-review/honda/clarity-fcv>. – (Дата обращения: 11.08.2019.).

[12] Brandon, N.P. Clean energy and the hydrogen economy / N.P. Brandon, Z. Kurban // Philos. Trans. R. Soc. A. – 2017. – Vol. 375. – P. 1–17.

[13] Hydrogen Council, Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition, 2017. Электронный ресурс: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>. 2017. – (Дата обращения: 11.08.2019.).

[14] Hanley, E.S. The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives / E.S. Hanley, J.P. Deane, B.P.O' Gallachoir // Renewable Sustainable Energy Rev. – 2018. – Vol. 82. – P. 3027–3045.

[15] Pudukudy, M. Renewable Hydrogen Economy in Asia – Opportunities and Challenges: An Overview / M. Pudukudy [et al.] // Renewable Sustainable Energy Rev. – 2014. – Vol. 30. – P. 743–757.

[16] Sheffield, J.W. Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development / J.W. Sheffield, Ç. Sheffield. – Springer, Netherlands, 2007.

[17] Tollefson, J. Hydrogen vehicles: Fuel of the future? / J. Tollefson // Nature. – 2010. – Vol. 464. – P. 1262–1264.

[18] Dodds, P.E. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review / P.E. Dodds [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy. – 2015. – Vol. 40. – P. 2065–2083.

[19] Samsatli, S. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain / S. Samsatli, I. Staffell, N.J. Samsatli // Int. J. Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – P. 447–475.

[20] Hydrogen economy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy#History. – (Дата обращения: 12.08.2019.).

[21] Hydrogen Council. [Электронный ресурс]. – Режим доступа // <http://hydrogencouncil.com/>. – (Дата обращения: 12.08.2019.).

[22] Hydrogen. IEA 2019.

[23] Водородная экономика: новые надежды на успех. Энергетический бюллетень № 73, июнь 2019. Аналитический центр при Правительстве России.

[24] Hydrogen production and the environment. Toolkit on Nuclear Hydrogen Production. Division of Nuclear Power. Department of Nuclear Energy IAEA Vienna International Centre P.O. Box 100 A-1400, Vienna, Austria, 2017–2018.

[25] Бокрис Б., Везироглу Н., Смит Д. Солнечно-водородная энергия. Сила, способная спасти мир [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.universalinternetlibrary.ru/book/smit/3.shtml>. – (Дата обращения 06.06.2019.).

[26] Zhiznin, S.Z. Economics of secondary renewable energy sources / S.Z. Zhiznin, S. Vassilev // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2018. – No. 31–36. – P. 279–284.

[27] Zhiznin, S.Z. Economics of secondary renewable energy sources with hydrogen generation / S.Z. Zhiznin, S. Vassilev, A.L. Gusev // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – No. 23. – P. 11385–11393.

[28] Велихов, Е.П. Эволюция энергетики в XXI веке / Е.П. Велихов [и др.]. – М.: ИздАТ, 2008. – 160 с.

[29] The Future of Hydrogen. 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iea.org/hydrogen2019/?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email. – (Дата обращения: 19.08.2019.).

[30] Naterer G.F., Dincer I., Zamfirescu C. Nuclear Energy and Its Role in Hydrogen Production, pp. 21–64. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-4938-5_2. – (Дата обращения: 12.08.2019.).

[31] Could Hydrogen Help Save Nuclear? November 26, 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogen-help-save-nuclear/>. – (Дата обращения: 15.08.2019.).

[32] Naterer, G.F. Synergistic roles of off-peak electrolysis and thermochemical production of hydrogen from nuclear energy in Canada / G.F. Naterer [et al.] // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2008. – 33. – P. 6849–6857.

[33] Mansilla, C. Economic competitiveness of off-peak hydrogen production today – A European comparison / C. Mansilla [et al.] // Energy. – 2013. – Vol. 55(C). – P. 996–1001.

[34] Булычев, Н.А. Получение водорода при разложении жидкостей в низкотемпературной плазме / Н.А. Булычев [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2013. – № 5/2 (126). – С. 10–13.

[35] Rosen, M.A. Advances in hydrogen production by thermochemical water decomposition: A review / M.A. Rosen // Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 2.

[36] Жизнин С.З. Экономические и экологические аспекты внедрения чистых угольных технологий в Китае / С.З. Жизнин, А.В. Черечукин // Уголь. – 2019. – №. 3. – С. 56–59.



[37] Пономарев-Степной, Н.Н. О роли атомной энергетике в структуре мирового энергетического производства XXI века и атомно-водородной энергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://potential.org.ru/Phys/ArtDt200504231615PH4J4>. – (Дата обращения: 02.08.2019.).

[38] Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energynet.ru/upload>. – (Дата обращения: 04.08.2019.).

[39] Жизнин, С.З. Влияние энергетике на устойчивое развитие / С.З. Жизнин, В.М. Тимохов // Мировая экономика и международные отношения. – 2017. – Т. 61. – № 11. – С. 34–42.

[40] Жизнин, С.З. Ядерные аспекты энергетической дипломатии / С.З. Жизнин, В.М. Тимохов. – М.: МГИМО-Университет, 2017. – 267 с.

[41] Изучение возможной синергии между ядерной и возобновляемой энергетикой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/izuchenievozmozhnoy-sinergii-mezhdu-yadernoy-ivozobnovlyayemyy-energetikoy-uchastnikisoveshchaniya-magate-obsudilivariantybezuglerodnogo-proizvodstva-energii-ikogeneracii>. – (Дата обращения: 08.08.2019.).

[42] Патент РФ № 2082911 МКИ F17C3/08. Криогенный резервуар / Гусев А.Л., Кудрявцев И.И., Кряковкин В.П., Куприянов В.И., Терехов А.С.; Авт. изобрет.; заявл. 13.11.91., № 05009089/25-075697, опублик. Бюл. № 18, 1997.

[43] Патент РФ № 2052158 МКИ F04B37/02. Способ работы вакуумного криоадсорбционного устройства в теплоизоляционной полости криогенного резервуара / Гусев А.Л., Исаев А.В., Куприянов В.И., Макаров А.А., Терехов А.С.; заявл. 13.11.91., №5009136/06, опублик. Бюл. №1, 1996.

[44] Патент РФ № 2113871 МКИ A62C2/00,3/00. Способ предупреждения пожара в замкнутых емкостях и трубопроводах и криогенный трубопровод / Гусев А.Л., Белоусов В.М., Куприянов В.И., Кудрявцев И.И., Кряковкин В.П., Ляшенко Л.В., Бочарикова И.В., Рожкова Э.В., Высоцкий А.Ф., Шванке Д.В.; заявл. 4.01.96., №96100184/12, опублик. в Бюл. № 18.

[45] Патент РФ № 2103598 МКИ F17D5/00, F16L59/06. Криогенный трубопровод / Гусев А.Л., Кудрявцев И.И., Турундаев А.Р.; заявл. 18.12.95., 95120543/06, опублик. Бюл. № 3, 1998.

[46] Патент РФ № 2027942 МКИ F16L59/00. Способ поддержания вакуума в теплоизоляционной полости трубопровода типа «труба в трубе» / Гусев А.Л., Куприянов В.И.; заявл. 8.07.91., № 5018602/05-061195; опублик. Бюл. № 3, 1995.

[47] Патент РФ №2082910 МКИ F17C3/00, 13/00. Криогенный резервуар и способ активации химического поглотителя перед размещением его в теплоизоляционной полости криогенного резервуара / Гусев А.Л., Кудрявцев И.И., Куприянов В.И., Кряковкин В.П., Терехов А.С.; заявл. 13.11.91., № 5009266/26, опублик. БИ №18, 1997.

[48] Патент РФ №2022204 МКИ F17C3/08. Криогенный резервуар и способ удаления водорода из его вакуумной полости / Гусев А.Л., Кудрявцев И.И., Кряковкин В.П., Куприянов В.И., Терехов А.С.; заявл. 24.06.91., №4954398/26, опублик. Бюл. № 20, 1994.

[49] Гусев А.Л., Куделькина Е.В., Чабан П.А. Ивкин А.В. Сенсоры водорода. Сборник тезисов отраслевого семинара «Пассивные системы и водородная безопасность АЭС». Обнинск, 28–29 апреля 2004 года, стр. 15, 2004.

[50] Гусев, А.Л. Тушение пожара на крупном водородном объекте / А.Л. Гусев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2005. – № 9. – С. 67–71.

[51] Гусев, А.Л. Системы пожаротушения на базе криогенного азота для крупных техногенных комплексов / А.Л. Гусев // Сборник тезисов отраслевого семинара «Пассивные системы и водородная безопасность АЭС». Обнинск, 28–29 апреля 2004 г. – 2004. – С. 11.

[52] Патент на изобретение RUS 2311937. Криогенная азотная установка для тушения пожара в замкнутых объектах / Гусев, А.Л., Чабан П.А., Кондырина Т.Н.; 10.10.2005.

[53] Высокоэффективные экологичные средства пожаротушения рудничных эндогенных пожаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nauchkor.ru/pubs/vysokoeffektivnyyeekologichnyesredstva-pozharotusheniya-rudnichnyhendogennyh-rozharov-5cf1904d7966e10545e7ff8>. – (Дата обращения: 02.10.2019.).

[54] Жизнин, С.З. Экономические и геополитические аспекты «Северного потока-2» / С.З. Жизнин, В.М. Тимохов // Балтийский регион. – 2019. – Т. 11. – №. 3. – С. 25–42.

[55] Veziroğlu, T.N. Hydrogen and hydrogen energy creating the universe: Spin-Top Theory / T.N. Veziroğlu // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45. – P. 6863–6873.

References

[1] Gusev A.L., Veziroglu T.N. et al. The Centennial Memorandum of November 13, 2006 to the Heads of the Big Eight (Stoletnii memorandum ot 13 noyabrya 2006 goda Glavam Bol'shoi vos'merki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2007;3:11 (in Russ.).

[2] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M., Dineva V. Energy security: Theoretical interpretations and quantitative evaluation. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020;10(2):390–400.

[3] Gusev A.L. Obtaining alternative energy carriers using the atomic-hydrogen cycle and their application (Poluchenie alternativnykh energonositelei s pomoshch'yu atomno-vodorodnogo tsikla i ih primeneniye). *International scientific journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2007;6:175–176 (in Russ.).

[4] Ilkaev R.I., Trutnev Yu.A., Aldoshin S.M., Mikhailov A.L., Tretyakov Yu.D. et al. Creation of energy



infrastructures and promising energy industrial complexes based on floating nuclear power plants (Sozдание ehnergeticheskoi infrastruktury i perspektivnykh ehnergo-promyshlennykh kompleksov na baze plavuchikh AEHS). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2007;4:205–206 (in Russ.).

[5] Nuclear power in a clean energy system 2019. Available on: <https://www.iea.org/publications/nuclear/> (08/18/2019).

[6] Shalimov Yu.N., Koifman O.I., Terukov E.I., Litvinov Yu.V., Gusev A.A. Hydrogen in traditional and alternative energy systems (Vodorod v sistemah traditsionnoi i al'ternativnoi energetiki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2013;5(1):10–44 (in Russ.).

[7] Gusev A.L., Dyadyuchenko Yu.P., Chertov V.M. Economic, energy, environmental and geopolitical security of Russia in the 21st century. Does Russia Need Hydrogen Energy? Economics, Ecology and Society of Russia in the 21st Century? (Ekonomicheskaya, energeticheskaya, ekologicheskaya i geopoliticheskaya bezopasnost' Rossii v 21 veke?. Nuzhna li Rossii Vodorodnaya energetika? Ekonomika, ekologiya i obshhestvo Rossii v 21-m stoletii). *Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. T.I. St. Petersburg: Nestor*, 2002; 400 p. (in Russ.).

[8] US Department of Energy. The Green Hydrogen Report, NREL, 1995.

[9] Goltsov V.A., Veziroglu T.N., Goltsova L.F., Gusev A.L. The current state of the hydrogen economy and hydrogen transport: economics, technology, infrastructure (Sovremennoe sostoyanie vodorodnoi ekonomiki i vodorodnogo transporta: ekonomika, tehnika, infrastruktura). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE): Special issue*, 2003;21–22:172 (in Russ.).

[10] World Energy Council, *World Energy Issues Monitor*, 2017.

[11] Cackett N. Honda Clarity FCV review [E-resource]. – Available on: <http://www.autocar.co.uk/car-review/honda/clarity-fcv> (08/11/2019).

[12] Brandon N.P., Kurban Z., Clean energy and the hydrogen economy. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 2017;375:1–17.

[13] Hydrogen Council, Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition. - Available on: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>. 2017 (08/11/2019).

[14] Hanley E.S., Deane J.P. and. Gallachoir B.P.O' The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2018;82:3027–3045.

[15] Pudukudy M., Yaakob Z., Mohammad M., Narayanan B., Sopian K. Renewable Hydrogen Economy in Asia – Opportunities and Challenges: An Overview. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2014;30:743–757.

[16] Sheffield J.W., Sheffield Ç. Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development. Springer, Netherlands, 2007.

[17] Tollefson J. Staffell I., Hawkes, A.D., Li F., Grunewald P., McDowall W., Ekins P Hydrogen vehicles: Fuel of the future? *Nature*, 2010;464:1262–1264.

[18] Dodds P.E. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2015;40:2065–2083.

[19] Samsatli S., Staffell I., Samsatli N.J. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016;41:447–475.

[20] Hydrogen economy / Available on: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy#History (08/12/2019).

[21] Hydrogen Council. Available on: <http://hydrogencouncil.com/> (08/15/2019).

[22] Hydrogen. *IEA* 2019.

[23] Hydrogen economics: new hopes for success (Vodorodnaya ekonomika: novye nadezhdy na uspeh. Energeticheskii byulleten'). *Energy Bulletin. Analytical Center under the Government of Russia № 73*, June 2019 (in Russ.).

[24] Hydrogen production and the environment. Toolkit on Nuclear Hydrogen Production. Division of Nuclear Power. Department of Nuclear Energy IAEA Vienna International Centre P.O. Box 100 A-1400, Vienna, Austria, 2017–2018.

[25] Bokris B., Veziroglu N., Smith D. Solar-hydrogen energy. The power that can save the world (Solnechno-vodorodnaya energiya. Sila, sposobnaya spasti mir). Available on: <http://www.universalinternetlibrary.ru/book/smit/3.shtml> (06.06.2019) (in Russ.).

[26] Zhiznin S.Z., Vassilev S. Economics of secondary renewable energy sources. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2018;31–36:279–284.

[27] Zhiznin S.Z., Vassilev S., Gusev A.L. Economics of secondary renewable energy sources with hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;44(23):11385–11393.

[28] Velikhov, EP Energy evolution in the 21st century (Evolyutsiya energetiki v XXI veke). Moscow: Publishing House, 2008; 160 p. (in Russ.).

[29] The Future of Hydrogen. 2019. Available on: https://www.iea.org/hydrogen2019/?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email. (08/19/2019).

[30] Naterer G.F., Dincer I., Zamfirescu C. Nuclear Energy and Its Role in Hydrogen Production, pp. 21–64. [E-resource]. Available on: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-4938-5_2 (08/12/2019).

[31] Could Hydrogen Help Save Nuclear? November 26, 2018. Available on:



<https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogenhelp-save-nuclear/> (08/15/2019).

[32] Naterer G.F., Fowler M., Cotton J., Gabriel K. Synergistic roles of off-peak electrolysis and thermochemical production of hydrogen from nuclear energy in Canada. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2008;33:6849–6857.

[33] Mansilla C., Louyrette J., Albou S., Bourasseau C., Dautremont S. Economic competitiveness of offpeak hydrogen production today – A European comparison. *Energy*, 2013;55(C):996–1001.

[34] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Chernov A.A., Gusev A.L. Hydrogen production during the decomposition of liquids in a low-temperature plasma (Poluchenie vodoroda pri razlozhenii zhidkostei v nizkotemperaturnoi plazme). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2013;5/2(126):10–13.

[35] Rosen M.A. Advances in hydrogen production by thermochemical water decomposition: A review. *Energy*, 2010;35:2.

[36] Zhiznin S.Z., Cherechukin A.V. Economic and ecological facet of introduction the clean coal technologies in China (Ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty vnedreniya chistyykh ugol'nykh tekhnologii v Kitae). *Ugol*, 2019;3:56–59 (in Russ.).

[37] Ponomarev-Stepnoy N.N. On the role of nuclear energy in the structure of world energy production of the 21st century and atomic-hydrogen energy (O roli atomnoy energetiki v strukture mirovogo energeticheskogo proizvodstva XXI veka i atomno-vodorodnoi energetike). Available on: <http://potential.org.ru/Phys/ArtDt200504231615PH4J4> (02.08.2019).

[38] Prospects for Russia in the global hydrogen fuel market (Perspektivy Rossii na global'nom rynke vodorodnogo topliva). Available on: <https://energynet.ru/upload>. (08/04/2019).

[39] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. The impact of energy on sustainable development (Vliyanie energetiki na ustoichivoe razvitie). *World Economy and International Relations*, 2017;61(11):34–42.

[40] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. Nuclear Aspects of Energy Diplomacy (Yadernye aspekty energeticheskoi diplomatii). Moscow: MGIMO-University, 2017; 267 p.

[41] Study of possible synergies between nuclear and renewable energy (Izuchenie vozmozhnoi sinergii mezhdu yadernoi i vozobnovlyaemoy energetikoi). Available on: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/izuchenievozmozhnoy-sinergii-mezhdu-yadernoy-ivozobnovlyaemoy-energetikoy-uchastnikisoveshchaniya-magat-obsudilivariantybezuglerodnogoiiergii> (08.10.2019).

[42] Gusev A.L., Kudryavtsev I.I., Kryakovkin V.P., Kupriyanov V.I., Terekhov A.S. RF patent No. 2082911 MKI F17C3 / 08. Cryogenic reservoir (Kriogennyy rezervuar /Avt. izobret.); publ. in bull. no. 18, 1997.

[43] Gusev A.L., Isaev A.V., Kupriyanov V.I., Markarov A.A., Terekhov A.S. RF patent No. 2052158 MKI F04B37 / 02. The method of operation of a vacuum

cryoadsorption device in a heat-insulating cavity of a cryogenic reservoir; declared 11/13/91 (Sposob raboty vakuumnogo krioadsorbtsionnogo ustroystva v teploizolyatsionnoi polosti kriogennogo rezervuara); publ. in bull., no. 1, 1996.

[44] Gusev A.L., Belousov V.M., Kupriyanov V.I., Kudryavtsev I.I., Kryakovkin V.P., Lyashenko L.V., Bocharikova I.V., Rozhkova E.V., Vysotsky A.F., Schwanke D.V. RF patent No. 21113871 MKI A62C2 / 00.3 / 00. A method of preventing fire in closed containers and pipelines and a cryogenic pipeline (Sposob preduprezhdeniya pozhara v zamknutyh emkostyakh i truboprovodah i kriogennyy truboprovod); publ. in bull. no. 18.

[45] Gusev A.L., Kudryavtsev I.I., Turundaev A.R. RF patent No. 2103598 MKI F17D5 / 00, F16L59 / 06. Cryogenic pipeline (Kriogennyy truboprovod); publ. in bull. no. 3, 1998.

[46] Gusev A.L., Kupriyanov V.I. RF patent No. 2027942 MKI F16L59 / 00. A method for maintaining a vacuum in a heat-insulating cavity of a pipe-in-pipe type pipeline (Sposob podderzhaniya vakuuma v teploizolyatsionnoi polosti truboprovoda tipa "truba v trube"); publ. in bull. no. 3, 1995.

[47] Gusev A.L., Kudryavtsev I.I., Kupriyanov V.I., Kryakovkin V.P., Terekhov A.S. RF patent No. 2082910 MKI F17C3 / 00, 13/00. Cryogenic reservoir and method for activating a chemical absorber before placing it in a heat-insulating cavity of a cryogenic reservoir (Kriogennyy rezervuar i sposob aktivatsii khimicheskogo poglotitelya pered razmeshcheniem ego v teploizolyatsionnoi polosti kriogennogo rezervuara); publ. in bull. no. 18, 1997.

[48] Gusev A.L., Kudryavtsev I.I., Kryakovkin V.P., Kupriyanov V.I., Terekhov A.S. RF patent No. 2022204 MKI F17C3 / 08. Cryogenic reservoir and method for removing hydrogen from its vacuum cavity (Kriogennyy rezervuar i sposob udaleniya vodoroda iz ego vakuumnoi polosti); publ. in bull. no. 20, 1994.

[49] Gusev A.L., Kudelkina E.V., Chaban P.A., Ivkin A.V. Hydrogen sensors. Abstracts of the industry seminar "Passive Systems and Hydrogen Safety of NPPs" (Sensory vodoroda. Sbornik tezisov otraslevogo seminar "Passivnye sistemy i vodorodnaya bezopasnost' AES") Obninsk, April 28–29, 2004, p. 15, 2004.

[50] Gusev A.L. Extinguishing a fire at a large hydrogen facility (Tushenie pozhara na krupnom vodorodnom ob'ekte). *International scientific journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2005;9:67–71.

[51] Gusev A.L. Fire extinguishing systems based on cryogenic nitrogen for large technogenic complexes (Sistemy pozhartusheniya na baze kriogennogo azota dlja krupnykh tehnogennykh kompleksov). Collection of theses of the industry seminar "Passive Systems and Hydrogen Safety of NPPs". Obninsk, April 28–29, 2004; p. 11.

[52] Gusev A.L., Chaban P.A., Kondryrina T.N. Patent for invention RUS 2311937 10/10/2005. Cryogenic nitrogen plant for extinguishing a fire in closed facilities (Kriogennaya azotnaya ustanovka dlya tusheniya pozhara v zamknutyh ob'ektah).

[53] Highly effective environmentally friendly fire extinguishing means for mine endogenous fires (Vysokoeffektivnye ekologichnye sredstva pozharotusheniya rudnichnyh endogennyh pozharov) [E-resource]. Available on: <https://nauchkor.ru/pubs/vysokoeffektivnyeekologichnye-sredstva-pozharotusheniya-rudnichnyhendogennyh-pozharov-5cf1904d7966e10545e7ff8> (02/10/2019).

[54] Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. Economic and geopolitical aspects of the Nord Stream 2 gas pipeline. *Baltic Region*, 2019;11(3):25–42.

[55] Veziroğlu T.N. Hydrogen and hydrogen energy creating the universe: Spin-Top Theory. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020;45:6863–6873.

Транслитерация по BSI



Maximizing commercial opportunities and partnerships in the hydrogen & fuel cells industry

With the world's gaze focusing more and more on reducing emissions, and the incredible advancements in Hydrogen taking place, the time is now to explore this growing industry; the latest innovations, the state of investment and the upcoming economic opportunities.

ACI's U.S. Hydrogen & Fuel Cells Energy Summit will be taking place in Boston, Massachusetts on the 15th & 16th July 2020. Join us for the two day event which will bring together key industry stakeholders from all corners of the Hydrogen industry to give you an insight to the latest regulations impacting on global transition in energy trends & the required economical and infrastructural innovations for a sustainable energy carrier.

This conference invites experts and senior executives across the whole Hydrogen and fuel cells industry value chain interested in meeting potential partners, create business opportunities and gaining knowledge on the latest advancements to aid growth in markets.

Representatives from hydrogen producers and suppliers, fuel cell companies, automotive OEMs, hydrogen storage companies, technology providers, component manufacturers & industrial end-users, financial stakeholders and investors, service providers, government officials & regulators, sustainability mobility technology providers and others will come to discuss perspectives & market opportunities for the hydrogen & fuel cells market.

Key Topics:

- U.S & Global Hydrogen and fuel cell market overview
- Assessing Government perspectives on U.S Hydrogen Policy
- A roadmap to a state-wide Hydrogen Market/Economy
- Feeling Blue: Hydrogen & CCS as an achievable stepping stone to a renewable future
- Achieving Volume: The need for large scale production of renewable H₂
- Pathway to improving Compression, Storage & Distribution capabilities
- Exploring Fuel Cell advancements in Heavy Duty Commercial Vehicles & Transport fleets
- Decarbonising Maritime Vessels & Ports: Transitioning Maritime Vessels & Ports to Hydrogen Energy

<https://www.wplgroup.com/aci/event/us-hydrogen-fuel-cells-energy-summit/>