

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 661.961,662.769.2(045)
© Романов А. С., 2023

Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода



Алексей Сергеевич Романов, студент факультета экономики и бизнеса, Финансовый университет, Москва, Россия

Alexey S. Romanov, student, Faculty of Economy and Business, Financial University, Moscow, Russia
poromol928@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Развитие водородной энергетики рассматривается одним из вариантов замещения традиционных углеводородов в рамках реализации политики энергоперехода. В долгосрочной перспективе развитие водородной энергетики может оказать существенное влияние на страны-экспортеры углеводородного сырья, в том числе и на Российскую Федерацию. В этой связи важно определить приоритетные направления развития технологий водородной энергетики, которые обеспечат нашей стране конкурентные преимущества. В статье приведены результаты сравнительного анализа способов получения водорода (газификация угля, паровой риформинг, риформинг с секвестированием CO₂, пиролиз метана, традиционный и высокотемпературный электролиз) с точки зрения их технико-экономических параметров и углеродного следа. В заключение сделаны выводы о приоритетных для России технологиях производства в среднесрочной (получение водорода из природного газа) и долгосрочной (получение водорода высокотемпературным электролизом) перспективе.

Ключевые слова: климатическая повестка; водородная энергетика; водород; способы получения водорода

Для цитирования: Романов А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода. *Научные записки молодых исследователей*. 2023;11(3):73–80.

ORIGINAL PAPER

Hydrogen Energy: Comparative Analysis of Methods for Producing Hydrogen

ABSTRACT

The hydrogen energy growing is the option of replacing traditional hydrocarbons as a part of implementing the energy transition policy. Hydrogen energy could significantly affect hydrocarbon exporting countries, including Russia. In this regard, it is important to identify priority areas to improve hydrogen energy technologies that will provide our country with a competitive advantage. The paper

Научный руководитель: **Петров И.В.**, доктор экономических наук, профессор департамента отраслевых рынков факультета экономики и бизнеса, Финансовый университет, Москва, Россия / Scientific supervisor: **Petrov I.V.**, Dr. Sci. (Econ), Professor, Department of Industry Markets, Faculty of Economy and Business, Financial University, Moscow, Russia.

presents the results of a comparative analysis of hydrogen production methods (coal gasification, steam reforming, reforming with CO₂ sequestration, methane pyrolysis, traditional and high-temperature electrolysis) in terms of their technical and economic features and carbon footprint. In conclusion, the author highlighted the priority production technologies for Russia in the medium-term perspective (obtaining hydrogen from natural gas), and the long-term one (obtaining hydrogen by high-temperature electrolysis).

Keywords: climate agenda; hydrogen energy; hydrogen; hydrogen production methods

For citation: Romanov A. S. Hydrogen energy: Comparative analysis of methods for producing hydrogen. *Nauchnye zapiski molodykh issledovatelei = Scientific notes of young researchers*. 2023;11(3):73–80.

Введение

Климатическая повестка и высокие цены на традиционные энергоресурсы привели к активизации усилий стран – импортеров энергии по расширению использования возобновляемых источников энергии и постепенному отказу от использования ископаемых углеводородов (так называемая «политика энергоперехода»). Одним из вариантов замещения традиционных энергоресурсов рассматривается использование в качестве энергоносителя водорода [1, 2]. Водород можно получить из низкоуглеродных источников, а при его сжигании отсутствуют выбросы парниковых газов (образуется вода).

Текущая ситуация нестабильности на энергетических рынках повышает привлекательность водородных проектов как альтернативы традиционным углеводородным решениям. В связи с этим водородные проекты получили дополнительный импульс развития.

В средне- и долгосрочной перспективе развитие водородной энергетики может оказать влияние на энергобаланс всех развитых стран, вовлеченных в климатическую повестку. Практически все они в настоящее время разработали собственные государственные программы развития отрасли и оказывают активную государственную поддержку развитию водородных проектов. При этом развитие рынка водородных энергоносителей окажет влияние и на страны – экспортеры углеводородного сырья, в том числе и на нашу страну.

В Российской Федерации развитие водородной энергетики в качестве стратегического направления нашло отражение в таких документах, как:

- Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденная

распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р¹;

- Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р²;

- государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики», в состав которой вошел федеральный проект «Чистая энергетика», содержащий мероприятия по развитию производства, транспорта и потребления водорода³;

- дорожная карта развития высокотехнологического направления «Развитие водородной энергетики», утвержденная протоколом заседания Межведомственной рабочей группы по развитию в Российской Федерации водородной энергетики под руководством заместителя Председателя Правительства Российской Федерации А. В. Новака от 28.12.2022 № 3.

Уже сейчас водород достаточно широко используется в качестве промышленного сырья в химической промышленности и нефтепереработке. В перспективе водород может обеспечить декарбонизацию на транспорте (автомобильный,

¹ Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/ (дата обращения: 12.03.2023).

² Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-р «Об утверждении Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_392518/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/ (дата обращения: 12.03.2023).

³ Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 (ред. от 02.02.2023) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162194/ (дата обращения: 12.03.2023).

кроме легкового, железнодорожный, авиа- и морской), в металлургии, а также в энергетике.

При этом наблюдается рост мирового спроса не только на сам водород, но и на производные вещества на его основе — аммиак, метанол и др. Наличие экспортных поставок аммиака и метанола в будущем позволит российским компаниям диверсифицировать способы монетизации запасов природного газа, что крайне важно для развития топливно-энергетического комплекса России и в связи с расширением использования природного газа внутри страны.

Российской Федерации, обладающей целым рядом конкурентных преимуществ для развития водородной энергетики (большие запасы необходимых для производства водорода ресурсов — воды, газа, угля, дешевая энергия, большой научно-практический опыт в сфере водородных технологий), важно правильно использовать имеющийся потенциал, в первую очередь в целях развития собственных технологий, достижения технологического суверенитета в этой сфере и приоритетного обеспечения водородом внутреннего рынка.

Одним из инструментов, позволяющим определить конкурентные преимущества нашей страны в этой сфере, является сравнительный анализ способов получения водорода.

В общем виде процесс производства водорода можно представить как разложение исходного сырья (вода, метан, уголь и др.) с применением внешней энергии на водород и другие составляющие (кислород, углекислый газ, углерод и др.).

Следует отметить, что в зависимости от способа получения выделяют несколько видов водорода, сама классификация получила название «цветной». Традиционно выделяется 7 видов водорода⁴:

- зеленый — водород, полученный способом электролиза воды с использованием возобновляемых источников энергии (далее — ВИЭ), при таком способе получения водорода выбросы углекислого газа на этапе производства водорода отсутствуют;
- бирюзовый — водород, полученный разложением метана на водород и твердый углерод методом пиролиза;

- желтый (или оранжевый) — водород, полученный способом электролиза воды, но с использованием в качестве источника энергии АЭС;

- изумрудный — водород, полученный разложением биометана и природного газа с помощью термоплазменного электролиза;

- серый — водород, полученный способом паровой конверсии природного газа (метана);

- голубой — по способу производства полностью идентичен серому водороду, главное отличие состоит в том, что на этапе производства происходит улавливание углерода, что дает снижение выбросов примерно в 2 раза;

- коричневый (или бурый) — водород, полученный способом газификации угля.

Следует отметить, что указанная «цветная» классификация водорода, по мнению многих специалистов, достаточно предвзята. Дело в том, что любой способ получения водорода может обеспечить околонулевые выбросы CO₂ при условии применения технологий улавливания (Carbon capture, use, and storage — далее CCUS) или компенсационных мероприятий (например, высадки лесов). Однако западным странам, продвигающим указанную «цветную» классификацию водорода, принципиально важно заложить в основы мировой водородной энергетики превосходство одних технологий производства водорода над другими. Нетрудно догадаться, что такими «приоритетными» должны стать технологии производства водорода на основе ВИЭ, так как именно в производстве оборудования для ВИЭ западные страны пока имеют технологическое преимущество. Правда, никто при этом не считает выбросы CO₂ на этапах производства оборудования для ВИЭ, в том числе при добыче используемых в указанном оборудовании редких и редкоземельных металлов.

Существующее промышленное производство водорода в основном основано на использовании в качестве сырья угля и газа (см. *рисунок*). При этом процесс производства водорода сопровождается выделением достаточно большого количества CO₂.

Рассмотрим наиболее распространенные способы получения водорода с точки зрения их технико-экономических параметров и углеродного следа.

⁴ Классификация водорода по цвету. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/> (дата обращения: 12.03.2023).

Структура мирового производства водорода



Рис. Структура мирового производства водорода за 2021 г.

Источник: Global Hydrogen Review 2022.

Газификация угля

Газификация угля – высокотемпературный физико-химический процесс превращения угля в горючий газ с помощью кислорода или других газов⁵.

Суть технологии заключается в нагреве мелкозернистого или пылевидного угля в присутствии окислителей (кислород или обогащенный им воздух, водяной пар и др.). В результате процесса получают горючие газы, в том числе водородсодержащие (H₂, CO, CH₄).

В зависимости от параметров процесса и вида окислителя (водяной пар или кислород) в качестве продуктов газификации могут быть получены три типа газа: горючий, синтез-газ и восстановительный. Горючий газ содержит больше метана, не имеет нежелательных продуктов полукоксования угля и используется для технологического и энергетического сжигания. Синтез-газ является химическим сырьем для производства метанола, аммиака и жидкого топлива. В его составе содержится наибольшее количество водорода. Восстановительный газ применяется в металлур-

гической промышленности для восстановления железной руды и других материалов.

Энергия для обеспечения процесса газификации получается в результате сжигания части угля. Газификация может преобразовать до 80% органической части твердого топлива в газовую фазу. Этот метод подходит для переработки низкосортных видов топлива, так как он нечувствителен к его качеству и наличию балластов, например влаги и минеральных примесей. Выбросы вредных веществ при сжигании продуктов газификации значительно ниже, чем при прямом сжигании исходного твердого топлива.

Одной из разновидностей данного способа является подземная газификация угля, при которой уголь не добывается, а сжигается под землей. В угольном пласте создаются необходимые каналы, в которые нагнетается воздух и водяной пар. По мере выгазовывания угольного пласта огненный забой перемещается. Полученная под землей смесь газов выкачивается на поверхность, где происходит ее очистка и, при необходимости, разделение на водород и иные газы [3].

В настоящее время промышленная подземная газификация угля применяется в Узбекистане на Ангренской ГРЭС (около 1 млн м³ синтетического газа в сутки).

⁵ Газификация угля. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/147407-vnutritsiklovaya-gazifikatsiya-uglya/> (дата обращения: 12.03.2023).

Газификация угля как способ получения водорода характеризуется высоким углеродным следом, высокими капитальными затратами и сравнительно низким выходом водорода. В то же время способ промышленно освоен и позволяет использовать в качестве сырья очень широкий спектр углеродсодержащих веществ. По себестоимости производства водорода с подземной газификацией не может поспорить ни одна другая технология. Вместе с тем нельзя не отметить, что одной из проблем при подземной газификации угля является образование фенола, что в ряде случаев может приводить к загрязнению подземных вод.

Традиционный паровой риформинг

Традиционный паровой риформинг — это каталитическая конверсия углеводородов в присутствии водяного пара.

В качестве сырья используется природный газ.

В ходе реакции разогретого метана в присутствии водяного пара происходит распад природного газа на составляющие: углекислый газ и водород. На выходе получается «серый водород».

Паровой риформинг — это наиболее распространенная (около 70% от общего объема производства водорода в мире) технология производства водорода [4]. Она характеризуется высокой эффективностью процесса и низкой стоимостью водорода. Однако и при этом способе наблюдается значительное выделение CO_2 , что не позволяет рассматривать данный процесс как отвечающий требованиям декарбонизации.

Риформинг с секвестрированием углекислого газа (CO_2)

Разновидностью традиционного риформинга является риформинг с секвестрированием (захоронением) CO_2 .

В отличие от традиционного парового риформинга данный способ подразумевает наличие дополнительных процессов улавливания, захоронения и последующего хранения CO_2 .

Среди технологий улавливания CO_2 выделяют⁶ технологии поглощения углерода растительными культурами с последующим его удалением из продуктов сгорания биомассы (BECCS — биоэнер-

гетика с утилизацией углерода) и технологии прямого захватывания углерода из воздуха (DACCS).

В обоих случаях захваченный CO_2 сжимается, а затем закачивается в слои пористой породы на глубину одного километра или более под непроницаемые породы (как правило, это закачка CO_2 в подземные полости или нефтяные пласты).

Себестоимость риформинга с секвестрированием CO_2 выше за счет дополнительных затрат на улавливание и захоронение CO_2 . Затраты при методе BECCS оцениваются от 50 до 200 долл. за тонну удаленного и хранимого CO_2 , DACCS — примерно вдвое дороже. Однако при этом можно добиться снижения выбросов парниковых газов при производстве водорода.

Для распространения данного метода необходимы разработка и промышленное внедрение технологий улавливания и утилизации углекислого газа. Кроме того, нельзя не упомянуть про долгосрочные экологические риски, с которыми связано захоронение CO_2 .

Пиролиз метана

Пиролиз метана представляет собой способ получения водорода, при котором под воздействием внешней энергии образуется твердый углерод и водород.

Существует несколько основных классов пиролиза метана — термический, каталитический, плазменный, а также пиролиз в жидких средах (в расплавах металлов) [5].

Термический пиролиз метана протекает при высокой температуре (1200–1500 °C) с последующим быстрым охлаждением продуктов реакции. В результате пиролиза образуется ацетилен и водород.

Перспективными видами пиролиза метана являются плазменный катализ и расплавный метод получения водорода. Главные преимущества этих технологий:

- оптимальный температурный диапазон процесса — 600–1500 °C;
- высокая производительность (до 5000 $\text{нм}^3 / \text{час} \cdot \text{м}^3$) и при сравнительно низких температурах (1000 °C и ниже) за счет эффекта катализа в расплаве;
- возможность осуществления процессов парового и углекислотного риформинга;
- потенциальная возможность переработки практически любых видов углеводородного сырья.

⁶ Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS). URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf (дата обращения: 12.03.2023).

Пиролиз метана — это одна из наиболее перспективных технологий получения водорода на сегодняшний день. Она характеризуется низким углеродным следом и низкой прогнозной стоимостью водорода. Однако технология весьма энергоемка: для получения 1 т H₂ требуется около 26 ГДж (7,23 МВт ч) энергии, что требует наличие достаточно мощного источника энергии в непосредственной близости к месту производства водорода.

Электролиз

Электролиз воды — физико-химический процесс, при котором под действием постоянного электрического тока дистиллированная вода разлагается на кислород и водород⁷.

Из 9 т воды получается 8 т кислорода и 1 т H₂, однако при этом по объему водорода получается вдвое больше, чем кислорода.

Сам процесс электролиза воды для получения водорода характеризуется высокими энергозатратами, поэтому он оправдан только в тех случаях, когда имеется источник электрической энергии с крайне низкой себестоимостью.

Также указанный способ применим в случае выработки «излишней» электроэнергии, которую необходимо запасти, пусть даже и с невысоким КПД. Потенциально водород может обеспечить хранение большего количества энергии, чем современные промышленные накопители энергии.

Данная технология характеризуется минимальным углеродным следом. Однако для нее характерна высокая стоимость водорода, большие капитальные затраты и большая энергоемкость.

Перспективы технологии зависят от стоимости электрической энергии (операционные затраты) и самих установок-электролизеров (капитальные затраты).

Высокотемпературный электролиз

В качестве новой технологии производства низкоуглеродного водорода рассматривается получение водорода различными способами с использованием тепловой энергии атомной энерготехнологической станции.

Высокотемпературный электролиз (ВТЭ) — это разновидность обычного электролиза. Часть энергии, необходимой для расщепления воды, расходуется на нагрев пара, что делает процесс более эффективным (в теории на 30–40%) [6]. При электролизе пара под давлением 3 МПа и 800 °С удельное потребление электроэнергии составляет 2,5 кВт ч/нм³.

Для производства водорода предлагается использовать тепло, выделяемое высокотемпературными газоохлаждаемыми ядерными реакторами (ВТГР) (температура до 950–1000 °С). Эффективность метода достигается за счет того, что, с одной стороны, АЭС обеспечивают одну из самых низких себестоимостей выработки электроэнергии, а с другой — за счет использования тепла, которое в обычном режиме работы АЭС не имеет полезного применения и сбрасывается в теплообменник.

Также тепло, выделяемое ВТГР, может использоваться для снижения расхода метана в процессе парового риформинга. В частности, использование внешнего источника тепла позволяет снизить расход газа на нагрев, необходимый для поддержания реакции.

Для реализации таких технологий необходимо создать ядерный реактор с температурой нагрева теплоносителя выше 850 °С. В настоящее время усилия сосредоточены на устранении проблем соединения ядерной энергоустановки с термохимическим производством водорода (паровая конверсия метана или ВТЭ). Также возможно объединение ядерного реактора с установкой по производству водорода в единую систему когенерации, чтобы производить электроэнергию, теплоэнергию и водород [7].

Однако использование ядерной энергетики в производстве водорода на текущий момент ограничивается не только технологическими сложностями, но и вопросами безопасности, так как водород является особо взрывоопасным газом. Если на предприятии по производству водорода вблизи АЭС произойдет чрезвычайная ситуация, то это может представлять серьезную угрозу для безопасности самой АЭС.

Использование атомной энергетики в производстве водорода позволит расширить рынок ядерных технологий на неэлектрическую часть (производство водорода, аммиака, удобрений),

⁷ Получение водорода электролизом воды. URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovye-tehnologii-svjaz-izmerenija/5287/> (дата обращения: 12.03.2023).

Таблица

Сравнительный анализ способов производства водорода

Метод	Сырье	Источник энергии	Выбросы парниковых газов, кг CO ₂ / кг H ₂	Производственная себестоимость
Газификация угля	Уголь	Уголь	18–26	2–2 €/кг H ₂
Традиционный паровой риформинг	Природный газ	Природный газ	9–13	1–1,5 €/кг H ₂
Риформинг с секвестрированием CO ₂	Природный газ	Природный газ	1–7	1,5–2 €/кг H ₂
Пиролиз метана	Природный газ	Природный газ	0–5	2,6–3,2 €/кг H ₂
Электролиз с помощью ВИЭ	Вода	ВИЭ	0–1	3–7 €/кг H ₂
Электролиз с помощью атомной энергии (ВВЭР, ВТГР)	Вода	АЭС	0–1	3–5 €/кг H ₂

Источник: составлено автором по данным НИЦ «Курчатовский институт» [8].

которая ранее была для них закрыта. При этом указанное направление обладает серьезным экспортным потенциалом.

Выводы

Результаты сравнительного анализа способов производства водорода (см. таблицу) показывают, что в большинстве случаев использование новых низкоуглеродных технологий водородной энергетики в настоящее время дороже их традиционных альтернатив, основанных на ископаемых топливах.

Учитывая объем разведанных запасов углеводородов и наличие большого опыта работы в нефте- и газохимической отраслях, в качестве приоритетного сырья для производства водорода в России в среднесрочной перспективе следует рассматривать природный газ.

В более долгосрочном периоде интерес представляет технология производства низкоуглеродного водорода посредством электролиза. И здесь, по моему мнению, приоритетным являются технологии с использованием тепловой и электрической энергии АЭС. Именно в этой отрасли у нашей страны есть большой технологический задел.

Потенциально для высокотемпературного электролиза возможно использование реакторов нового поколения проекта «Прорыв», которые разрабатываются Государственной корпорацией «Росатом». Проект направлен на достижение новых стандартов в ядерной энергетике, разработку, создание и внедрение замкнутого цикла использования ядерного топлива на базе реакторов с быстрыми нейтронами⁸.

В заключение хотел бы отметить, что практически всем перспективным методам производства водорода необходим мощный источник энергии. Даже если сам процесс производства водорода не будет приводить к выделению CO₂, то выделением CO₂ будет сопровождаться производство энергии, необходимой для этого процесса.

Учитывая, что современная энергетика основывается на сжигании углеводородов, любое масштабное производство водорода приведет к росту общих выбросов CO₂. Поэтому для решения задач климатической повестки производство водорода должно сопровождаться соответствующим увеличением производства энергии из неуглеродных источников (АЭС, ГЭС, ВИЭ).

⁸ Проект «Прорыв». URL: <https://proryv2020.ru/> (дата обращения: 12.03.2023).

Список источников

1. Бушуев В.В., Горшкова А.А. Водород: мода или новый этап мировой энергетики? *Энергетическая политика*. 2021;3(157):5.
2. Новак А. Водород: энергия «чистого» будущего. *Энергетическая политика*. 2021;4(158):6–11. DOI: 10.46920/2409–5516_2021_4158_6
3. Петров И.В., Уткин И.И., Джайянт В.Б. Предложения по декарбонизации угольной промышленности и устойчивому развитию обособленных регионов на основе подземной газификации углей. *Уголь*. 2022;9(1158):41–46. DOI: 10.18796/0041–5790–2022–9–41–47
4. Телегина Е., Сергеев С. «Голубой» водород как долгосрочная экспортная стратегия РФ. *Энергетическая политика*. 2022;9(175):42–55. DOI: 10.46920/2409–5516_2022_9175_42
5. Ишков А.Г., Аксютин О.Е., Романов К.В., Тетеревлев Р.В. Роль российского природного газа в развитии водородной энергетики. *Энергетическая политика*. 2021;(3):6–19.
6. Столяревский А.Я. Производство альтернативного топлива на основе ядерных энергоисточников. *Рос. хим. журнал (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*. 2008;LII(6):73–77.
7. Matthew Fisher. More Than Just a Power Source. Hydrogen production using nuclear energy for a low carbon future. *Nuclear Power and the Clean Energy Transition*. 2020;(61–3):18–21.
8. Фатеев В.Н., Порембский В.И., Григорьев С.А., Баранов И.Е., Островский С.В., Коробцев С.В., Денисенко В.П., Николаев И.И., Кириллов И.А., Демкин С.А., Смирнов Р.В. Разработки и исследования водородных энергетических систем в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт». *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021;23(2):128–148.

References

1. Bushuev V.V., Gorshkova A.A. Hydrogen: Fashion or a new stage in world energy? *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2021;3(157):5. (In Russ.).
2. Novak A. Hydrogen: The energy of a “clean” future. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2021;4(158):6–11. (In Russ.). DOI: 10.46920/2409–5516_2021_4158_6
3. Petrov I.V., Utkin I.I., Jayant V.B. Proposals for the decarbonization of the coal industry and the sustainable development of isolated regions based on underground coal gasification. *Ugol’ = Coal*. 2022;9(1158):41–46. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041–5790–2022–9–41–47
4. Telegina E., Sergeev S. “Blue” hydrogen as a long-term export strategy of the Russian Federation. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2022;9(175):42–55. (In Russ.). DOI: 10.46920/2409–5516_2022_9175_42
5. Ishkov A.G., Aksyutin O.E., Romanov K.V., Teterlev R.V. The role of Russian natural gas in the development of hydrogen energy. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2021;(3):6–19. (In Russ.).
6. Stolyarevsky A. Ya. Production of alternative fuel based on nuclear energy sources. *Rossiiskij himicheskij zhurnal (ZHurnal Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva) = Russian chemical journal (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev)*. 2008;LII(6):73–77. (In Russ.).
7. Matthew Fisher. More Than Just a Power Source. Hydrogen production using nuclear energy for a low carbon future. *Nuclear Power and the Clean Energy Transition*. 2020;(61–3):18–21.
8. Fateev V.N., Porembskiy V.I., Grigoriev S.A., Baranov I.E., Ostrovskiy S.V., et al. Development and research of hydrogen energy systems at the National Research Center “Kurchatov Institute”. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = News of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(2):128–148. (In Russ.).