

Научная статья

УДК 662.769.21

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_227_01_9

EDN: TUUMJC

Получение альтернативного вида топлива на нефтегазоконденсатных месторождениях: водород

И.С. Чемакина[✉], Н.А. Девлешова, Е.В. Андрусенко

Ирина Сергеевна Чемакина

младший научный сотрудник

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

i.s.chemakina@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1745-1735>

Наталья Алексеевна Девлешова

лаборант-исследователь 2 категории

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

n.a.devleshova@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7844-6131>

Елена Владимировна Андрусенко

кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

e.v.andrusenko@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0588-4960>

Аннотация. Использование любого топлива истощает содержание кислорода в атмосфере, за одним исключением: водород, получаемый из воды. Актуальность исследований водорода как энергоносителя в мире значительно увеличилась, так как современные тенденции к снижению негативного воздействия на окружающую среду, а также текущие проблемы нефтегазовой отрасли стимулируют глобальный переход на возобновляемые источники энергии. Водород как энергоноситель имеет ряд преимуществ перед альтернативными источниками топлива: высокие экологические показатели, длительный срок хранения, а также совместимость со многими видами транспорта. На текущий момент в Российской Федерации нет промышленно реализуемых технологий получения водородного топлива, поскольку практическая реализация подобных проектов традиционно ассоциирована с рядом вызовов как с технологической, так и с экономической точки зрения (отсутствие локально отработанных технологий и высокий уровень капитальных и операционных затрат). Несмотря на это, подобные проекты представляют особый интерес для частных компаний нефтегазового сектора, поскольку продажа водорода может быть рассмотрена как дополнительная возможность для монетизации.

В данном аналитическом обзоре рассмотрены классификация видов водорода по методам получения и особенности обозначенных методов, а также сформулирова-

ны наиболее перспективные технологии для разработки на месторождениях. Выделены проблемы, затрудняющие сегодня развитие проектов по получению водородного топлива в Российской Федерации, а также проведена оценка применимости существующих методов получения водорода к российским практикам. Показано, что особый интерес для России представляют «желтый» и «голубой» виды водорода. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований по проведению пиролиза в пластовой воде и улавливанию и удерживанию углерода при пиролизе метана.

Ключевые слова: водород, водородная энергетика, электролиз воды, пиролиз метана, паровая конверсия метана, газификация угля

Для цитирования: Чемакина И.С., Девлешова Н.А., Андрусенко Е.В. Получение альтернативного вида топлива на нефтегазоконденсатных месторождениях: водород // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 1. С. 112–121. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_227_01_9.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Тюменской области в рамках реализации Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидии некоммерческим организациям № 89-ДОН от 07.12.2020 г.

Original article

Extraction of an alternative type of fuel at the oil/gas-condensate field: hydrogen

I.S. Chemakina, N.A. Devleshova, E.V. Andrusenko

Irina S. Chemakina

Junior Researcher

Tyumen State University, Tyumen, Russia

i.s.chemakina@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1745-1735>

Natalia A. Devleshova

Second Grade Research Assistant

Tyumen State University, Tyumen, Russia

n.a.devleshova@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7844-6131>

Elena V. Andrusenko

Candidate of Science in Chemistry, Senior Researcher

Tyumen State University, Tyumen, Russia

e.v.andrusenko@utmn.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0588-4960>

Abstract. The use of any fuel depletes the oxygen content in the atmosphere, with one exception: hydrogen produced from water. The relevance of hydrogen research as an energy carrier in the world has increased significantly, as current trends towards reducing the negative impact on the environment, as well as current problems of the oil and gas industry, stimulate the global transition to renewable energy sources. Hydrogen as a fuel has a number of advantages over alternative energy sources: high environmental performance, long shelf life, as well as compatibility with

many types of transport. Currently, there are no commercially available technologies for producing hydrogen fuel in the Russian Federation, since the practical implementation of such projects is traditionally associated with a number of challenges both from technological and economical point of view (absence of locally proven technologies and high level of capital and operating expenses). Despite this, such projects are of particular interest to private companies in the oil and gas sector since the sale of hydrogen can be considered as an additional opportunity for monetization.

In this analytical review, the classification of hydrogen species by production methods and the features of these methods are considered, as well as the most promising technologies for field development are formulated. The problems hindering the development of hydrogen fuel production projects in the Russian Federation today are highlighted, and the applicability of existing methods of hydrogen production to Russian practices is assessed. It is shown that “yellow” and “blue” hydrogen are of particular interest to Russia. The conclusion is made about the need for further research on pyrolysis in reservoir water and carbon capture and retention during methane pyrolysis.

Keywords: hydrogen, hydrogen energy, electrolysis of water, pyrolysis of methane, steam conversion of methane, coal gasification

For citation: Chemakina I.S., Devleshova N.A., Andrusenko E.V. Extraction of an alternative type of fuel at the oil/gas-condensate field: hydrogen. *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(1):112-121. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_227_01_9.

Funding. The study was carried out with the financial support of the Tyumen Region as part of the implementation of the Grant Agreement in the form of a grant to non-profit organizations No. 89-DON dated 07.12.2020.

Введение

Водородная энергетика с каждым годом приобретает всю большую популярность ввиду усиления тренда на декарбонизацию в промышленности, истощения легко извлекаемых запасов углеводородов и нерентабельного освоения трудно извлекаемых запасов [1]. Многие нефтегазовые компании заявляют о строительстве установок промышленного назначения и масштаба получения водорода к 2025–2026 гг., однако к данному моменту ни одна из них не запустила вышеупомянутые проекты. Основные трудности для ввода таких установок связаны со слабой изученностью процессов, сложностью транспортировки водорода и улавливания углекислого газа. Водородная энергетика имеет ряд преимуществ: экологичность, эффективность, универсальность (подходит для множества видов транспорта) [2]. Во многих нефтегазовых компаниях получение водорода рассматривается как дополнительный метод монетизации и бизнес-возможность в условиях удорожания нефтяных кейсов и дестабилизации нефтяного рынка, что повышает спрос на новые возможности увеличения экономической эффективности проектов и добывающих активов.

Однако нахождение водорода в свободном виде на Земле ограничено. Как правило, он присутствует в составе вулканических газов, в некоторых породах земной коры, на угольных и нефтегазоносных бассейнах, а также, в следовых количествах, в атмосфере [3]. В связи с этим необходимо развивать технологии его получения. В данной работе рассматривается мировой опыт добычи водорода как энергетического ресурса, а также оценивается применимость данного опыта к российским практикам на нефтегазконденсатных месторождениях, где

присутствуют газообразные углеводороды в виде попутного нефтяного газа либо основного добываемого флюида. Необходимые условия месторождения: развитая инфраструктура, средняя обводненность скважин, присутствие в добываемом флюиде газа без содержания сероводорода. Подобным требованиям в Российской Федерации соответствуют месторождения Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов.

Мировой опыт получения водорода

В зависимости от методов получения и их экологичности водород классифицируют на шесть разновидностей: «зеленый», «желтый», «бирюзовый», «серый», «голубой» и «бурый».

«Зеленый» водород получают с помощью электролиза воды, используя возобновляемые источники энергии: ветрогенераторы, солнечную либо гидроэнергию [4–6]. Под электролизом воды подразумевают ее разложение на кислород и водород при помощи электрического тока. В странах ЕС соотношение «зеленого» водорода и природного газа для обеспечения бытовых потребностей граждан в газотранспортной системе составляет 1:9. Основным ресурсом для получения водорода является озерная или морская вода. К сожалению, в данный момент получение «зеленого» водорода на нефтегазоконденсатных месторождениях в условиях Крайнего Севера затруднено ввиду недостаточных масштабов производства возобновляемых источников энергии [7].

«Желтый» водород получают таким же способом, как и «зеленый», но в качестве источника энергии используют атомные электростанции (АЭС). В перспективе генерация «желтого» водорода может получить широкое распространение в России, поскольку проект его получения разрабатывается компанией «Росатом» и планируется к запуску в 2024 г. [8]. Данный вариант получения не является абсолютно экологичным, так как предполагает тепловое загрязнение.

Получение «бирюзового» водорода предполагает пиролиз метана, т.е. его термическое разложение при повышенной температуре в инертной атмосфере. Продуктами данного процесса являются водород и твердый углерод. Привлекательность этого способа двоякая: во-первых, он не требует технологий улавливания и хранения выбросов, во-вторых, вместо углекислого газа производится дополнительный материал, от продажи которого можно получать дополнительную прибыль [6, 9]. Крупные корпорации изучают возможность реализации процесса пиролиза на нефтегазоконденсатных месторождениях, однако чаще его рассматривают для получения углерода (сажи), нежели как источник водорода [10]. Пиролиз – ключевой процесс нефтехимии ввиду простоты процесса, аппаратурного оформления технологии, универсальности сырьевой базы и технической реализуемости на месторождении. Недостатками данного метода можно считать высокие капитальные затраты на установку и высокую температуру, которая приводит к увеличению операционных затрат и повышенному уровню опасности.

Получение «серого» водорода реализуется путем паровой конверсии метана, который является основным компонентом природного газа. В ходе данного процесса метан нагревается паром в присутствии катализатора, в результате чего образуется синтез-газ (смесь монооксида углерода и водорода). Синтез-газ используется во многих сферах жизнедеятельности: органический синтез, энергетика и др. Реализация паровой конверсии на месторождении возможна ввиду высокой

каталитической активности никелевого катализатора и низких капитальных затрат на установку данной технологии. Паровая конверсия – хорошо отработанный процесс в промышленности. Стоит отметить, что использование данного типа водорода по эмиссии углеводородов сопоставимо с природным газом, вследствие чего применение «серого» водорода в качестве топлива неэкологично [11].

«Голубой» водород получают так же, как и «серый», – паровой конверсией метана совместно с улавливанием и хранением выделившегося углерода. Принято считать данный метод наиболее перспективным по сравнению со всеми остальными ввиду наличия богатой сырьевой базы, значительного опыта предприятий, а также высокого потенциала развития методов получения водорода с помощью мембранных технологий [5, 12].

«Бурый» водород синтезируется с помощью газификации бурого угля, при этом образуется смесь газов: углекислый газ, монооксид углерода, водород, метан, этилен и др. Данный процесс невозможно рассматривать для применения на месторождении нефтегазоконденсатных ввиду несоответствия исходного сырья. Кроме того, такой способ получения водорода оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Краткие характеристики видов водорода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики видов водорода

Источник	Вид водорода	Метод получения	Ресурс
Вода	«Зеленый»	Электролиз	Возобновляемые источники энергии
	«Желтый»		Атомная энергия
Полезные ископаемые	«Бирюзовый»	Пиролиз	Метан
	«Серый»	Паровая конверсия	-«-
	«Голубой»	Паровая конверсия с удерживанием углерода	-«-
	«Бурый»	Газификация	Бурый уголь

Перспективы внедрения технологий добычи водорода в России на месторождениях

Повышенный спрос на водородные энергоносители в мире стимулирует интерес нефтедобывающих компаний к внедрению новых методик получения водорода с целью овладения новым источником прибыли, а также управления рисками в условиях волатильности рынка. В рамках данной работы проведен анализ видов водорода на предмет пригодности для внедрения на российских месторождениях. Критериями для оценки перспективности методов являлись следующие количественные характеристики экологичности процесса: количество прямых выбросов CO₂ и энергоемкость процесса, а также факторы увеличения его себестоимости. Результаты анализа приведены в табл. 2 [13–16].

Как видно из табл. 2, каждый вид водорода обладает рядом преимуществ и недостатков с точки зрения экологичности и рентабельности процесса. Так, водород, получаемый с помощью электролиза, может быть охарактеризован как высокоэкологичный энергоноситель, не требующий дополнительных инвестиций, с одной стороны, однако обладающий высокой себестоимостью – с другой,

Характеристика видов водорода с точки зрения экологичности и рентабельности процесса

Вид	Прямые выбросы CO ₂ , кг CO ₂ /кг H ₂	Минимальное энергопотребление, кДж/моль H ₂	Увеличение себестоимости процесса, %
«Зеленый»	0	286	0
«Желтый»	0	286	0
«Бирюзовый»	0	37	0
«Серый»	8,85	27	20–40
«Голубой»	0	27	20–40
«Бурый»	1780	118,5	0

поскольку подразумевает колоссальные по сравнению с другими методами затраты. Несмотря на то что «серый» и «голубой» виды водорода являются более энергетически выгодными, обязательные для данных видов технологии улавливания углекислого газа влекут за собой увеличение себестоимости процессов до 40 %. Технология получения «бурого» водорода, хоть и является относительно дешевым и хорошо изученным процессом, крайне неблагоприятна для окружающей среды в связи с большим количеством прямых выбросов CO₂ и потому далее не рассматривается. Отдельно стоит отметить, что появление самого экологичного, «зеленого», водорода на месторождениях в России может стать возможным при обеспечении в стране возобновляемых источников энергии. Таким образом, наиболее перспективными видами водорода для получения на нефтегазоконденсатном месторождении могут стать «голубой» и «желтый».

Очевидно, что развитие водородной энергетики влечет за собой интенсивное исследование таких направлений, как добыча водорода в составе газа из недр Земли, подготовка смеси газов, химический процесс, транспортировка получившегося соединения. Подготовка должна учитывать эффективное разделение имеющихся компонентов на фракции, отделение воды от других компонентов. Для пластовой воды требуется полный цикл подготовки: отстаивание, обессоливание, дегазация воды. Для электролиза данные этапы подготовки должны быть полностью осуществимы. Реализацию синтеза водорода на нефтегазоконденсатном месторождении необходимо рассматривать с учетом простоты аппаратуры, высокой конверсии и селективности технологии, условий химического процесса и капитальных и операционных затрат получения водорода. Хранение и транспортировка водорода подразумевает его сжижение до состояния, которое позволит использовать не дорогостоящий трубопровод, а более экономичный вариант – цистерны для железнодорожного транспорта.

«Желтый» водород в перспективе может получить наиболее широкое распространение на российских месторождениях, поскольку его можно получать электролизом пластовой воды, которая извлекается попутно при добыче флюида и источника энергии около месторождений. Предположительно, альтернативой АЭС может выступать либо попутно добываемый газ, либо близлежащие электрические сети, делая данный метод еще более устойчивым.

Как сказано, исходным сырьем в мире для получения «зеленого» и «желтого» водорода является озерная и морская вода. В России для получения рассматриваемых типов водорода можно использовать морскую (океаническую) воду на Крайнем Севере ввиду ее доступности, однако суровый климат предполагает здесь дополнительные капитальные и операционные затраты для оптимальной работы установки. Также рассматривается вариант использования воды рек и озер.

Однако многие водные ресурсы в стране уже используются для нужд человека: генерация электричества (ГЭС), аграрная отрасль, химическая промышленность, быт и др. Вследствие этого пластовая вода, добываемая попутно вместе с углеводородным флюидом, могла бы быть перспективным сырьем для получения «зеленого» и «желтого» водорода. Стоит отметить, что данный тип воды необходимо предварительно подготовить ввиду наличия в ней органических и механических примесей и высокой минерализации. Проблему с примесями любой природы можно решить с помощью подготовки воды прямо на месторождении, данный процесс хорошо изучен и постоянно совершенствуется. Тем не менее требующей дополнительных исследований остается проблема высокой солености пластовой воды. Блок ее подготовки не предполагает аппараты обессоливания воды, так как пресную воду использовать в системе поддержания пластового давления не рекомендуется: порода в ней подвержена разбуханию, и размер пор в ней уменьшается, что негативно сказывается на процессе добычи.

Вопрос о высокой минерализации нуждается в изучении: неподготовленную пластовую воду подвергать электролизу непосредственно на месторождении нельзя, поскольку соли (в частности хлориды), содержащиеся в ней, также могут вступать в процесс разложения электрическим током, что сегодня осложняет процесс не только с точки зрения технологии, но и со стороны капитальных и операционных затрат. В качестве решения проблемы подготовки пластовых вод для электролиза предлагается рассмотреть возможность адаптации технологии обессоливания морской воды, которая уже показала готовность к промышленной реализуемости. В настоящее время для опреснения данного природного объекта применяется два способа: термический [17–19] и мембранный [20–22]. В условиях нефтегазового промысла термическое обессоливание нерентабельно, поскольку операционные затраты на оборудование для дистилляции превышают возможную прибыль при продаже «желтого» водорода, поэтому возможность внедрения подобных технологий подробнее не рассматриваем. Среди мембранных методов удаления анионов из морской воды особое место занимает обратный осмос – процесс пропускания высокоминерализованной воды через полупроницаемые мембраны под воздействием давления, существенно превышающего разницу осмотических давлений обессоленной и минерализованной воды [23]. Несомненно, внедрение методик обратного осмоса для опреснения высокоминерализованных пластовых вод требует высоких затрат электроэнергии для поддержания необходимого давления. Перспективным направлением здесь может стать подача попутно добываемого на месторождении природного газа – побочного продукта нефтедобычи для генерации электроэнергии, способного питать осмотические установки. Внедрение подобного производственного цикла позволит дополнительно снизить углеродный «след» в отрасли, избегая сжигания ПНГ в факельных системах на установке подготовки нефти и газа на месторождении с целью утилизации газа. Таким образом, наиболее капиталоемким вложением при внедрении данной технологии останется содержание осмотической установки.

Кроме того, рассматриваются лабораторные методы, которые требуют дополнительного изучения в практических и промышленных целях. Рассматривается мембранное обессоливание воды с помощью гибридных мембранных материалов нового поколения на основе графена, обладающего незначительной толщиной, сравнимой с толщиной атома, и, как следствие, позволяющего проводить более эффективную водоочистку в сравнении с традиционными полимерными

мембранами [24]. Помимо этого, в работе [25] рассмотрено мембранное обессоливание с помощью других материалов в качестве мембраны, например супергидрофобной поливинилиденфторидной мембраны. Однако принципиально новый физический процесс, лежащий в основе обессоливания, пока не определен. Разработан способ для предотвращения выделения хлора при электролизе: покрытие анода отрицательно заряженным веществом, вследствие чего будет происходить отталкивание ионов хлора (тоже обладающих отрицательным зарядом), тем самым снизится скорость распада металла [26].

«Голубой» водород представляет особый интерес с точки зрения относительной распространенности процесса паровой конверсии метана. Кроме того, возможность углубленной переработки с улавливанием выделяющегося углерода нивелирует главный недостаток этой технологии. Так, к настоящему времени проведены работы по моделированию процесса в специальных программных продуктах в рамках изучения возможности его запуска. Получена модель паровой конверсии природного газа с блоком выделения водорода из синтез-газа, которая позволяет рассчитать материальный и тепловой баланс процесса, а также показатели всех аппаратов в цепочке [27]. К сожалению, опыт применения технологий хранения выделившегося углерода на месторождении еще не внедрен, вследствие чего необходимо усилить поисковую работу, исследования и экспериментальные работы в рамках развития упомянутого направления.

Заключение

Таким образом, получение водорода является интеграцией нескольких технологических процессов: добыча флюида из недр Земли, подготовка к химическому процессу (очистка от примесей, разделение на фазы и др.), синтез водорода, улавливание углекислого газа во время химического процесса и транспортировка водорода. Стадии данного процесса до конца еще не изучены, поскольку практический интерес к получению водорода на месторождении возник не так давно. Еще несколько десятилетий назад адаптация подобных технологий под нефтепромысел представлялась не только нерентабельной, но и технически невыполнимой. Самый неразвитый участок данной технологической цепочки – снижение углеродного следа. Декарбонизация нефтегазовой отрасли является драйвером для адаптации методик получения водородных энергоносителей, однако для развития данного направления требуется большое участие компаний. Актуальным вопросом остается разработка технологий обессоливания пластовой воды, а также снижения эмиссии побочных продуктов – парниковых газов, что требует дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hermesmann M., Müller T.E. Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022. № 4. P. 1–28.
2. Белый Ю.И., Терегулов Т.Р. Водородная энергетика: преимущества и недостатки // *Вестн. науки и образования*. 2016. № 12 (24). С. 8–10.
3. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. К вопросу водородоносности угольных бассейнов Дальнего Востока // *Вестн. Камчат. рег. ассоциации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. 2010. № 1 (15). С. 19–32.

4. Сосна М.Х., Масленникова М.В., Крючков М.В., Пустовалов М.В. «Зеленый» и/или «голубой» водород // НефтеГазоХимия. 2020. № 3/4. С. 21–23.
5. Noussan M., Raimondi P.P., Scita R., Hafner M. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition // A Technological and Geopolitical Perspective. Sustainability. 2021. N 13 (1). P. 1–26.
6. Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region // Resources. 2021. N 10 (1). P. 1–18.
7. Барсук Н.Е., Хайдина М.П., Хан С.А. «Зеленый» газ в газотранспортной системе Европы // Газовая промышленность. 2018. № 10 (775). С. 104–109.
8. Попадько Н.В., Рожнятовский Г.И., Дауди Д.И. Водородная энергетика и мировой энергопереход // Инновации и инвестиции. 2021. № 4. С. 59–64.
9. Van Ressen S. The hydrogen solution? // Nature climate change. 2020. № 10. P. 799–801.
10. Бандалетова А.А., Димитриев А.С. Эффективное использование профицита попутного нефтяного газа для нефтегазовых месторождений на примере технологии получения технического углерода // PRO нефть. 2021. Т. 6, № 4. С. 131–137.
11. Лесюкова В.В. Характеристики водорода как топлива и накопителя энергии // Энергетика и цифровая трансформация: Тинчуринские чтения-2021. Казань, 2021. С. 528–531.
12. Дауди Д., Рожняковский Г., Ишмурзин А., Кодряну Н., Попадько Н. Перспективы «голубого» водорода в России // Энергетическая политика. 2021. № 2 (157). С. 34–43.
13. Конопляник А. Чистый водород из природного газа // Корпоративный журнал «Газпром». 2020. № 9. С. 20–29.
14. Водородная энергетика. – <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/hydrogen> (дата обращения: 12.07.2022).
15. Анализ рынка углерода технического в России // Маркетинговое агентство DISCOVERY Research Group. – https://club.cnews.ru/blogs/entry/analiz_rynka_ugleroda_tehnicheskogo_v_rossii (дата обращения: 12.07.2022).
16. Экологическая эффективность технологии газификации угля на примере Красноярской агломерации / О.В. Тасейко, С.В. Михайлюта, Т.П. Спицына, А.А. Леженин, В.С. Соколов, Р.Г. Хлебоброс // Современные проблемы. Красноярск: Библиотека им. Елены Евдокимовой, 2010. – <https://www.modernproblems.org.ru/ecology/24> (дата обращения: 12.07.2022).
17. Волков В.В., Мчедlishvili Б.В., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // Российские нанотехнологии. Обзоры. 2008. Т. 3, № 11–12. С. 67–99.
18. Лешков И.И. Опреснение соленой воды // Colloquium-journal. 2019. № 22-1 (46). С. 52–53.
19. Кулагин В.А., Ивченко О.А., Кулагина Л.В. Актуальные тенденции развития мембранных технологий // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. № 10 (1). С. 24–35.
20. Алиева О.О. Технология утилизационного опреснения морской воды // Вестн. науки и образования. 2022. № 1 (121). С. 26–41.
21. Qiblawey N.M., Banat F. Solar thermal desalination technologies // Desalination. 2008. N 220 (1-3). P. 633–644.
22. Mittelman G., Kribus A., Mouchtar O., Dayan A. Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems // Solar Energy. 2009. N 83 (8). P. 1322–1334.
23. Николенко И.В., Котовская Е.Е., Король И.В. Пути повышения энергетической эффективности при опреснении морской воды по технологии обратного осмоса // Экономика строительства и природопользования. 2017. № 3 (64). С. 80–87.
24. Raza A., Hassan J.Z., Mahmood A., Nabgan W., Ikram M. Recent advances in membrane-enabled water desalination by 2D frameworks: Graphene and beyond // Desalination. 2022. Vol. 531. P. 1–33.
25. Azeem M.A., Lawal D.U., Abdulgader H.A.I., Baroud T.N. Enhanced performance of superhydrophobic polyvinylidene fluoride membrane with sandpaper texture for highly saline water desalination in air-gap membrane distillation // Desalination. 2022. Vol. 528. Art. No. 115603.
26. Макаров В.. Водородное топливо из морской воды: теперь – дешево и просто // ПопМех. 2019. – <https://www.popmech.ru/technologies/news-470412-vodorodnoe-toplivo-iz-morskoy-vody-teper-deshevo-i-prosto>
27. Newborough M., Cooley G. Green hydrogen: The only oxygen and water balanced fuel // Fuel Cells Bull. 2021. N 3. P. 16–19.

REFERENCES

1. Hermesmann M., Müller T.E. Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022;(4):1-28.

2. Bely Yu.I., Teregulov T.R. Hydrogen energy: advantages and disadvantages. *Bulletin of Science and Education*. 2016;(12(24)):8-10. (In Russ.).
3. Gresov A.I., Obzhirov A.I., Yatsuk A. On the issue of hydrogen content of coal basins of the Far East. *Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center. Series: Earth Sciences*. 2010;(1(15)):19-32. (In Russ.).
4. Sosna M.H., Maslennikova M.V., Kryuchkov M.V., Pustovalov M.V. “Green” and/or “blue” hydrogen. *Oil and gas chemistry*. 2020;(3-4):21-23. (In Russ.).
5. Noussan M., Raimondi P.P., Scita R., Hafner M. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition. *A Technological and Geopolitical Perspective. Sustainability*. 2021;(13(1)):1-26.
6. Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region. *Resources*. 2021;(10(1)):1-18.
7. Barsuk N.E., Khaidina M.P., Khan S.A. “Green” gas in the gas transportation system of Europe. *Gas industry*. 2018;(10(775)):104-109. (In Russ.).
8. Popadko N.V., Rozhnyatovsky G.L., Daudi D.I. Hydrogen energy and the global energy transition. *Innovations and investments*. 2021;(4):59-64. (In Russ.).
9. Ressen S.V. The hydrogen solution? *Nature climate change*. 2020;(10):799-801.
10. Bandaletova A.A., Dimitriev A.S. Efficient use of the associated petroleum gas surplus for oil and gas fields on the example of carbon black production technology. *Pro OIL*. 2021;6(4):131-137. (In Russ.).
11. Lesyukova V.V. Characteristics of hydrogen as a fuel and energy storage. *Tinchurin Readings-2021 “Energy and digital transformation”*. 2021:528-531. (In Russ.).
12. Daudi D., Rozhnyakovskiy G., Ishmurzin A., Codreanu N., Popadko N. Prospects of “blue” hydrogen in Russia. *Energy Policy*. 2021;(2(157)):34-43. (In Russ.).
13. Konoplyanik A. Pure hydrogen from natural gas. *Gazprom Corporate Magazine*. 2020;(9):20-29. (In Russ.).
14. Hydrogen energy. – <https://www.gazprom.ru/sustainability/environmental-protection/hydrogen> (accessed: 12.07.2022).
15. Analysis of the carbon technical market in Russia. *DISCOVERY Research Group Marketing Agency*. – https://club.cnews.ru/blogs/entry/analiz_rynka_ugleroda_tehnicheskogo_v_rossii (accessed: 12.07.2022).
16. Taseyko O.V., Mikhaylyuta S.V., Spitsyna T.P., Lezhenin A.A., Sokolov V.S., Khlebopros R.G. (eds). Ecological efficiency of coal gasification technology on the example of the Krasnoyarsk agglomeration. *Modern problems*. Krasnoyarsk: Library named after. Elena Evdokimova, 2010. (In Russ.). – <https://www.modernproblems.org.ru/ecology/24> (accessed: 12.07.2022).
17. Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I., Ivanchev S.S., Yaroslavtsev A.B. Membranes and nanotechnologies. *Russian nanotechnologies. Reviews*. 2008;3(11-12):67-99. (In Russ.).
18. Leshkov I.I. Desalination of salt water. *Colloquium-journal*. 2019;(22-1(46)):52-53. (In Russ.).
19. Kulagin V.A., Ivchenko O.A., Kulagina L.V. Current trends in the development of membrane technologies. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017;(10(1)):24-35. (In Russ.).
20. Alieva O.O. Technology of utilization desalination of sea water. *Bulletin of Science and Education*. 2022;(1(121)):26-41. (In Russ.).
21. Qiblawey H.M., Banat F. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*. 2008;(220(1-3)):633-644.
22. Mittelman G., Kribus A., Mouchtar O., Dayan A. Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Solar Energy*. 2009;(83 (8)):1322-1334.
23. Nikolenko I.V., Kotovskaya E.E., Korol I.V. Ways to increase energy efficiency during desalination of seawater by reverse osmosis technology. *Economics of construction and environmental management*. 2017;(3(64)):80-87. (In Russ.).
24. Raza A., Hassan J.Z., Mahmood A., Nabgan W., Ikram M. Recent advances in membrane-enabled water desalination by 2D frameworks: Graphene and beyond. *Desalination*. 2022;531:1-33.
25. Azeem M.A., Lawal D.U., Abdulgader H.A.I., Baroud T.N. Enhanced performance of superhydrophobic polyvinylidene fluoride membrane with sandpaper texture for highly saline water desalination in air-gap membrane distillation. *Desalination*. 2022;528:11563.
26. Makarov V. Hydrogen fuel from seawater: now – cheap and simple. *PopMeh*. 2019. – <https://www.popmech.ru/technologies/news-470412-vodorodnoe-toplivo-iz-morskoy-vody-teper-deshevo-i-prosto> (accessed 12.07.2022) (In Russ.).
27. Newborough M., Cooley G. Green hydrogen: The only oxygen and water balanced fuel. *Fuel Cells Bulletin*. 2021;(3):16-19.