



ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.А. Челтыбашев, Я.М. Караченцева

Мурманский государственный технический университет,
г. Мурманск, Россия
cheltybashevaa@mstu.edu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Провести анализ перспектив развития водородной энергетики на территории Мурманской области. Рассмотреть возможности реализации проектов для отработки технологии получения «зеленого» водорода для промышленного использования. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод анализа литературных источников в области водородной энергетики, а также метод обобщения полученной информации. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, изучена мировая тенденция по переходу к «зеленой» энергетике. Рассмотрены виды водорода по способам его получения. Выявлен наиболее экологичный и эффективный способ производства промышленного водорода, рассмотрены возможные источники его получения. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В результате анализа перспектив развития водородной энергетики в Мурманской области выявлены предпосылки для получения «зеленого» водорода в промышленных масштабах. Перечислены возможные источники для его производства. В статье приведен пример реализации проекта по созданию на территории Мурманской области международной научной исследовательской станции, для функционирования которой планируется использовать водородные топливные элементы.

Ключевые слова: «Зеленый» водород; ветровая станция; безуглеродные технологии; водородная энергетика; водородные топливные элементы.

Для цитирования: Челтыбашев А.А., Караченцева Я.М. Возможности развития водородной энергетики в Мурманской области // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 93-103. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-93-103.

OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN ENERGY IN THE MURMANSK REGION

AA Cheltybashev, IaM Karachentseva

Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia
cheltybashevaa@mstu.edu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To analyze the perspectives for the development of hydrogen energy in the Murmansk region. To consider the possibility of implementing projects for producing "green" hydrogen for industrial using. *METHODS.* The method of analysis of literature sources in the field of hydrogen energy was used, as well as the method of generalizing the information obtained. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, studies the global trend towards the transition to "green" energy. The methods of producing hydrogen are considered. The most environmentally friendly and efficient method for the production of industrial hydrogen has been identified, and possible sources of its production have been considered. *CONCLUSION.* As a result of the analysis of the prospects for the development of hydrogen energy in the Murmansk region, the prerequisites for the production of "green" hydrogen on an industrial scale are revealed. Possible sources for its production are listed. The article provides an example of the implementation of a project to create an international scientific research station on the territory of the Murmansk region, where hydrogen fuel cells will be used.

Key words: "Green" hydrogen; wind station; carbon-free technologies; hydrogen energy; hydrogen fuel cells.

For citation: Cheltybashev AA, Karachentseva IaM. Opportunities for the development of hydrogen energy in the Murmansk region. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2): 93-103. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-93-103.

Введение

Проблема глобального потепления и, как следствие, рост среднегодовой температуры нуждается в серьезном замедлении. Для этого необходим поэтапный переход от углеродной энергетики к безуглеродной. Одним из ключевых элементов такой энергетики должен стать водород. При получении энергии из водорода путем его сжигания в качестве продукта сгорания образуется безвредный пар. На сегодня существует два пути получения водорода. Первый способ заключается в получении данного топлива с помощью «зеленой» энергетики путем электролиза, и такой водород называют зеленым. Второй способ получения водорода - из ископаемого топлива.

Как пишет *EnergyNet* «Водородная энергетика – ключевой фактор глобальной энергетической трансформации, позволяющий снизить парниковые выбросы. Для того чтобы замедлить рост потепления до 2 градусов к 2050 г., нужно перевести 400 млн. частных автомобилей, 15–20 млн грузовиков и 5 млн единиц общественного транспорта на водородное топливо», – сказано в отчете аналитического центра *Hydrogen Council* [6]. Переход на водород потребует ежегодных инвестиций в размере \$20–25 млрд по всему миру, говорится в исследовании.

В настоящее время Правительством РФ утвержден план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Его основной целью является организация процесса по формированию в стране высокоэффективной экспортно-ориентированной отрасли водородной энергетики, которая развивается на основе современных технологий и для которой должны быть подготовлены высококвалифицированные кадры.

В преамбуле плана отмечается, что одним из вызовов энергетической безопасности для России является изменение структуры спроса на энергоресурсы, включая замещение углеводородов другими видами энергетических ресурсов, в том числе водородом. Наша страна в этом смысле следует мировой тенденции, ведь практически все развитые страны – США, Япония, Китай, страны ЕС - приняли свои стратегии развития водородной отрасли и ставят перед собой весьма амбициозные цели. В нашей стране также имеется серьезный потенциал для организации масштабного производства водорода, развития водородной энергетики и использования данного вида топлива в различных областях экономики.

Согласно принятого плана, в нашей стране водородная энергетика должна сформироваться в 2025–2035 гг., но для этого необходимы инвестиции в \$2,2–3,9 млрд в год, однако это также может принести и доход от \$1,7млрд в год. При этом ожидается, что мировой рынок водородного топлива достигнет не менее \$26 млрд. в год, пишет *EnergyNet* [26].

Методы получения «зеленого» водорода

В ноябре 2020 года был создан российский консорциум «Технологическая водородная долина», который будет проводить исследования и разрабатывать водородные технологии. В созданный консорциум вошли: Томский политехнический университет, Институт катализа СО РАН, Институт проблем химической физики РАН, Институт нефтехимического синтеза РАН, Самарский государственный технический университет и Сахалинский государственный университет. Основными заказчиками исследований в области водородной энергетики являются крупные российские компании: «Газпром», «Газпромнефть», «СИБУР», «РЖД», «Северсталь», «Росатом», «НОВАТЭК».

Проведенные Московской школой управления «Сколково» исследования показали, что в настоящее время в России и мире уже существует промышленное производство водорода, но область его применения пока далека от энергетики. У нас он широко используется в космической отрасли, где были созданы производственные мощности, а также средства доставки и хранения этого газа. В настоящее время у нас в стране ведутся серьезные научные и технологические разработки по применению водорода в первую очередь в энергетике, чтобы соответствовать мировой тенденции на переход к «зеленой» энергетике, которая приобретает все более четкие очертания. Для осуществления такого

перехода, в первую очередь, планируется постепенно отказаться от углеводородной энергетики, заменяя её возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ).

Несмотря на то, что многие технологии уже отработаны, сделать это быстро не получится. Ведь для этого необходимо построить гигантское количество ветрогенераторов, солнечных батарей, приливных и геотермальных станций. Но существует возможность принять промежуточные решения, основываясь на которых водород может стать промежуточным энергоносителем на время перехода к возобновляемым источникам тока.

Для этого необходимо постепенно внедрять водород в те области промышленности и техники, где это возможно. Однако это потеряет смысл, если при производстве водорода не будут использоваться «зеленые» технологии. В зависимости от способа его получения водород делят на 6 видов представленных на рис.1.



Рис. 1. Градация водорода в зависимости от способа его производства
 Fig. 1. Gradation of hydrogen depending on the method of its production

Анализируя способы получения водорода, представленные на рис. 1., можно сделать вывод, что к экологически чистым способам получения водорода относится только электролиз.

Одной из наиболее вероятной и наиболее востребованной области применения водорода является наземный транспорт. Учитывая описанную в отчете аналитического центра *Hydrogen Council*, потребность перевести не менее 400 млн. частных автомобилей, 15–20 млн. грузовиков и 5 млн. единиц общественного транспорта на водородное топливо к 2050 году, можно сделать вывод о наличии больших возможностей для применения водорода на транспорте [6]. Согласно имеющейся программы, мы постепенно будем переходить на электрический транспорт, что является экологически и климатически обоснованным. В настоящее время электротранспорт в основном использует аккумуляторные системы обладающие массой недостатков, ключевым из которых является не очень большая энергоёмкость. Для самого совершенного литий-ионного аккумулятора данная характеристика равна 250 ватт-часов на килограмм, что совсем не применимо для большого электротранспорта, где требуется ёмкость минимум 600–700 ватт-часов на килограмм. Достижение данных характеристик на сегодня практически невозможно. Однако, использование на автомобилях водородных топливных элементов уже сейчас позволяет заменить любой аккумулятор, которым мы сейчас пользуемся. Поэтому использование водородных элементов в электротранспорте сможет сделать настоящую революцию, но для успешной реализации данной программы необходимо уже сейчас начать производить водород в промышленных масштабах.

Как уже было написано выше, на сегодня самым экологически чистым методом получения «зеленого» водорода является электролиз воды. Однако это и самый дорогой способ. В нашей стране для электролиза водорода идеально подходят мощности незагруженных ГЭС, ВЭС или АЭС. Наличие такой присоединенной нагрузки как электролизное производство водорода очень выгодно для АЭС, так как обеспечивает работу станции на постоянном уровне мощности, сглаживая «синусоиду» нагрузки в периоды низкой загруженности.

Проведенный анализ источников энергии, необходимой для производства водорода показал, что у нас существуют мощности, которые можно использовать для производства водорода. В частности, для этого можно использовать незагруженные Усть-Среднеканскую ГЭС в Магадане, Ленинградскую и Кольскую АЭС для генерации водорода, что позволяет нам нарастить производство водорода практически сразу. Как показали расчеты, для установки на Кольской АЭС генераторов водорода потребует инвестиций на 55 млрд руб.

Стратегия развития нашей атомной энергетики до 2050 года предусматривает производство не менее 50 млн. тонн водорода в год, что должно составить не менее 10 % его мирового потребления.

Результаты

В настоящее время на территории Мурманской области планируется реализовать исследовательский проект в виде международной научной станции «Снежинка-2». Эта станция будет второй, после пилотной безуглеродной арктической станции на Ямале. Цель данного проекта заключается в тестировании и демонстрации российскими и международными партнерами природосберегающих технологий жизнеобеспечения, а также систем «умный дом/поселение», робототехники, телекоммуникаций, медицины, биотехнологий, новых материалов, решений с искусственным интеллектом. Предполагается, что круглогодично и полностью автономно данная станция будет производить энергию на основе возобновляемых источников, и этой энергии должно хватить не только на самообеспечение станции, но и на заправку различного транспорта, как электрического, так и транспорта на водородном топливе.

Создание и открытие международной арктической станции «Снежинка» на безуглеродной энергетике планируется в период председательства Российской Федерации в Арктическом совете в 2021-2023 годах. Данный проект был инициирован Российской Федерацией и внесен в Арктический совет в конце 2019 года под названием «Арктическая водородная энергетика: применение и демонстрации» (*AHEAD, Arctic Hydrogen Energy Applications and Demonstrations*). 8 июня 2020 года на сессии Рабочей группы по устойчивому развитию (*SDWG*) Арктического совета его единогласно поддержали страны-участницы. Страны-организаторами проекта являются Россия и Норвегия. Предполагается, что его реализация позволит создать научную и образовательную платформу для международной кооперации инженеров, исследователей, ученых и научной молодежи.

Первоначально планировалось создать только одну станцию на территории Ямала в районе п. Лаборовая (фактория «Земля Надежды»). Однако, в процессе разработки проекта поступило предложение от МФТИ о его расширении за счет создания второй научно-образовательной станции «Снежинка-2» на территории Мурманской области в районе п. Териберка наряду со строительством основной арктической научно-образовательной станции «Снежинка-1».

В рамках данного предложения предлагается построить станцию «Снежинка-2» в Мурманской области и разместить её в 5 куполах, которые будут идентичны базовому проекту станции на «Снежинка-1» на Ямале. Согласно данного предложения конструктивные и архитектурные решения будут максимально одинаковыми. Однако на каждой из станций планируется реализовывать свои научные программы.

Предварительно предлагается рассмотреть возможность и целесообразность реализовать проект с учетом Федерального закона от 29.07.2017 №216-ФЗ «Об инновационных научно-технологических центрах и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Данное предложение возникло на основе положительного опыта Дальневосточного Федерального Университета по созданию инновационного научно-технического центра на о. Русский, с целью исключения необходимости бюджетных дотаций на содержание объектов научной инфраструктуры.

При этом за счет создания особого правового режима, предполагается, что площадка станции в формате «живой лаборатории» станет технологической и экономической базой для тиражирования новых решений мирового уровня в нашу жизнь. Модульность комплекса позволит постепенно развивать станцию. К числу основных модулей, входящих в состав станции, относятся:

- Лабораторные модули и мастерские для проведения исследований и разработок, тестирования и демонстрации технологий.
- Презентационный модуль для проведения конференций, телемостов и форумов.
- Обзорный модуль, включающий в себя библиотеку и обзорную площадку 360°.
- Центральный модуль с кухней-столовой, мини-кафе, медицинским кабинетом.
- Жилые модули с гостиничными номерами, мини-спортзалом и сауной.
- Технологические модули, представляющие собой системы автономного жизнеобеспечения, склады и вспомогательные помещения.
- Водородные модули как системы длительной аккумуляции энергии.

В рамках реализации данного проекта планируется проводить научные исследования по следующим направлениям:

- разработка и реализация инновационных технологий транспортировки, хранения и использования водорода, производимого на предприятиях Мурманской области за счет энергоресурсов Кольской АЭС и строящихся ветропарков;
- разработка и реализация инновационных технологий транспортировки, хранения и использования водорода для энергообеспечения станции «Снежинка-2», удаленных поселков и поселений;
- разработка и реализация инновационных технологий транспортировки, хранения и использования водорода для поставки на экспорт.

Обсуждение

Выбор Мурманской области для создания проекта «Снежинка-2» был не случаен. В нашем регионе имеются необходимые мощности для производства так называемого «зеленого» водорода.

Чтобы обеспечить потребителей энергией, необходимой как для обеспечения жизнедеятельности станции, так и для электролиза водорода, необходимо иметь как минимум один источник энергии, систему преобразования энергии и систему передачи энергии на расстояние. Все это уже в избытке имеется на территории Мурманской области.

Основная энергия, которая должна поступать на станцию - это энергия ветра, получаемая от Кольской ветроэлектростанции, а с апреля по сентябрь еще и солнечная энергия. Это планируется реализовать совместно с АО «Россети» в качестве пилотного энергорезима удаленного автономного объекта со слабой тупиковой связью, при котором станция «Снежинка-2» будет подключена к центральным электрическим сетям в пос. Териберка (линия 10 кВ, трасса до 10 км.) и организован переток энергии как из сети на станцию «Снежинка-2», так и обратно. При этом юридически из сети будет поставляться «зеленая» энергия Кольской ветростанции согласно «свободного двустороннего договора купли/продажи электрической энергии» с применением механизма «зеленых сертификатов». Исходя из данных опубликованных открытых источниках, следует, что работы планируют проводить совместно с Институтом проблем химической физики РАН и ГК «Росатом». В рамках проекта предполагается, что избыточная энергия от ветряков поступив на электролизеры используется для получения из воды водорода, который хранится в сжатом виде.

При проведении исследовательских работ на станции планируется широко использовать идеологии «умной» энергосистемы *Smart Grid* к передающей электрической сети, а также к генерации энергии. Для нашей страны эта технология наиболее важна с точки зрения развития уровня распределения электроэнергии, обеспечивающего снижение потерь, а также повышения наблюдаемости и автоматизации распределительной электрической сети. Технология современной и надежной энергосистемы требует развития и интеграции в единый комплекс инновационного оборудования и технологий различного назначения: управляемых устройств компенсации – для повышения пропускной способности линий, высоковольтных устройств – для быстрого регулирования напряжения, энергоемких накопителей энергии и т.п. При создании подобной энергосистемы будут использованы современные средства и технологии управления, новые диагностические системы, высокоскоростные коммуникационные системы, а также созданы возможности интеграции в электроэнергетические системы ВИЭ: солнечных батарей, малых гидроэлектростанций, мини- и микрогенерации, преобразователей и накопителей энергии на основе водорода, в том числе, химических источников тока и других локальных источников электроэнергии [1, 4, 5, 19–21].

В описании проекта также говорится, что созданный при Институте арктических технологий МФТИ инжиниринговый центр «Автономная арктическая энергетика» является инициатором и исполнителем создания первой в России гибридной коммерческой энергостанции, которая в 2020 году будет введена в поселке Лаборовая ЯНАО с целью модернизации старой неэффективной дизельной генерации и снижения стоимости производства электроэнергии за счет использования энергии ветра и солнца, литий-ионных накопителей энергии, термоаккумуляторов, дизель-генераторных установок на переменных оборотах, а также передовых систем силовой электроники и автоматизированных систем управления (АСУ) с технологиями искусственного интеллекта.

На базе опыта проекта «Лаборовая» готовится программа по модернизации десятков подобных неэффективных дизельных энергокомплексов в энергоизолированных поселках в Арктике, на Дальнем Востоке и Сибири России за счет средств частных инвесторов.

При планировании исследований в области водородной энергетики в рамках проекта *AHEAD* для безуглеродного и комфортного проживания на Арктических территориях были сформулированы следующие цели:

- Разработка региональных и международных рекомендаций по организации безуглеродного энергоснабжения и транспорта на территориях Арктического региона.
- Выявление наилучших практик и наилучших доступных технологий безуглеродного энергоснабжения поселений и промышленных объектов с высокой степенью автономности (на базе использования ВИЭ и технологий водородной энергетики).
- Выявление наилучших практик и наилучших доступных технологий организации безуглеродного местного и специального транспорта (на базе электрического и водородного).
- Обмен опытом и видениями развития в части организации безуглеродного энергоснабжения поселений, промышленных объектов и местного/специального транспорта на территориях Арктического региона.
- На основании сформулированных целей были поставлены следующие задачи:
- Изучение международных норм, регулирующих вопросы энергоснабжения Арктических территорий.
- Разработка методики изучения и оценки практик и технологий безуглеродного энергоснабжения поселений и промышленных объектов с высокой степенью автономности.
- Разработка методики изучения и оценки практик и технологий безуглеродного местного и специального транспорта для циркумполярных условий.
- Сбор кейсов применения практик и технологий безуглеродного энергоснабжения поселений и промышленных объектов с высокой степенью автономности со стран участников Арктического совета. Проведение экспертной оценки и выявление лучших практик и технологических решений.
- Проведение совместных визитов представителей заинтересованных стран – участников Арктического совета на объекты, где реализованы лучшие практики и технологии безуглеродного энергоснабжения поселений и промышленных объектов с высокой степенью автономности для их более подробного изучения.
- Проработка на основе изученных практик вопросов гибкой (*Plug&Play*) интеграции распределенных энергетических ресурсов для обеспечения инкрементального развития автономного энергоснабжения удаленных территорий.
- Разработка экспертно-аналитического доклада с международными рекомендациями по вопросам безуглеродного энергоснабжения на территориях Арктического региона.
- Проведение международной конференции для обмена опытом и видениями развития в части организации безуглеродного энергоснабжения и транспорта на территориях Арктического региона.
- Разработка предложений и рекомендаций по декарбонизации энергоснабжения арктических территорий, вынесение данных предложений на Арктический совет.

Анализ имеющейся информации о МАС «Снежинка» позволяет сделать вывод, что, данный проект, в случае его успешной реализации, станет живым драйвером развития и применения технологий будущего, а также научно-исследовательской международной инфраструктурой для ученых и инженеров новых технологий в области энергетики, тепло- и водоснабжения, утилизации стоков и мусора, а также гибридного транспорта на базе водородных топливных элементов.

Заключение

В последнее время все больше внимания уделяется созданию более экологичных и безопасных источников энергии. При этом водород в чистом виде в природе практически не встречается и его приходится получать искусственно через тот же электролиз, используя энергию ветра или солнца для расщепления воды. Получаемый при этом водород принято называть «зеленым». Правда есть еще серый водород, черный водород, т.е. полученные на базе паровой конверсии метана, газа, других углеводородных технологий, и он точно не зеленый. «Зеленый» водород сегодня получают на возобновляемых экологически чистых источниках, но пока это дорого. Поэтому в рамках реализации проекта на территории Мурманской области и планируется отработать технологию получения именно «зеленого» водорода, для получения которого будет использоваться энергия Кольской ВЭС.

Литература

1. Tiwari G.N., Mishra R.K. Advanced renewable energy sources. RSC Publishing, Cambridge, 2012. 562 p.
2. Antropov A.P., Ragutkin A.V., Yashtulov N.A. Micropower composite nanomaterials based on porous silicon for renewable energy sources // Int. J. Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2016. V. 10. № 12. pp. 1346–1349.
3. Bagotsky V.S., Skundin A.M., Volfkovich Yu. M. Electrochemical Power Sources:

Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors. John Wiley & Sons, 2015. 400 p.

4. Basu S. Recent trends in fuel science and technology. New York: Anamaya Publ.; New Delhi, India, 2007. 375 p.

5. Cheng X., Shi Z., Glass N., et al. A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation // J. Power Sources. 2007. V. 165. № 2. pp. 739–756.

6. Gandia L.M., Arzamedi G. Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety. Elsevier, 2013. 472 p.

7. Ghenciu A.F. Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems // Current opinion in solid state and materials science. 2002. V. 6. № 5. pp. 389–399.

8. Ghenciu A.F. Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems // Current opinion in solid state and materials science. 2002. V. 6. № 5. pp. 389–399.

9. Global Storage Market to Double Six Times by 2030. Bloomberg New Energy Finance. 2017. URL: <https://cleantechnica.com/2017/11/21/global-energy-storage-market-double-six-times-2030-bnef/>

10. Hartnig C., Roth C. Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology. Vol. 2: In-situ characterization techniques for low temperature fuel cells. Woodhead Publ. Ltd., 2012. V. 2. 516 p.

11. Hydrogen Council Update: Council Priorities & Hydrogen Cost Report Presented By Traci Kraus, Hydrogen Council Member & Director of Government Relations at Cummins <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/05-Kraus-H2%20Council%20Update.pdf>

12. Leung D.Y.C., Xuan J. Micro & Nano-Engineering of Fuel Cells. CRC Press, 2015. 338 p.

13. Liam Stoker. Storage secures 3.2GW of Capacity Market contracts in auction success. 2016. URL: <https://www.energy-storage.news/news/storage-projects-secure-3.2gw-in-uks-capacity-market>

14. Misak S., Prokop L. Green energy and technology. Operation characteristics of renewable energy sources (1 ed.). Springer Int. Publ. Switzerland. 2017. 235 p.

15. Popel' O.S., Tarasenko A.B. Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (Обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 27–44.

16. Rabis A., Paramaconi R., Schmidt T.J. Electrocatalysis for polymer electrolyte fuel cells: Recent achievements and future challenges // ACS Catal. 2012. V. 2. № 5. P. 864–890.

17. Savard C., Яковлева Э.В. Развитие технологий накопления электрической энергии // Молодой ученый. 2017. № 50. С. 76–82.

18. Stolten D., Emonts B. Fuel cell science and engineering: materials, processes, systems and technology. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2012. 1268 p.

19. The Next Five Years in Energy Storage According to 500 Energy Professionals. GTM Research. 2015. 15 p. URL: <https://ru.scribd.com/document/396777482/The-Next-Five-Years-in-Energy-Storage-According-to-500-Energy-Professionals>

20. Tiwari J.N., Tiwari R.N., Singh G., Kim K.S. Recent progress in the development of anode and cathode catalysts for direct methanol fuel cells (review) // Nano Energy. 2013. V. 2. pp. 553–578

21. Vielstich W., Lamm A. Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications. Wiley, 2003. 3826 p.

22. Vielstich W., Yokokawa H., Gasteiger H.A. Handbook of fuels: Fundamentals, technology and applications. Vol. 6. John Wiley & Sons: New York, 2009. 728 p.

23. Zhang J. PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers. Fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2008. – 1137 p.

24. Альтернативные источники энергии / Режим доступа: <http://www.planetseed.com/ru/relatedarticle/alternativnyie-istochniki-enierghii-toplivnyie-eliemienty>

25. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М: Энергоиздат, 1981. 360 с.

26. Водородная энергетика и синергия отраслей / Режим доступа <https://energynet.ru/con2020#1/tab/256431881-3>

27. Водородная энергетика России / Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Водородная_энергетика

28. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5. С. 39-49.

29. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: Пер. с англ. под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ; 2010. 704 с.
30. Ерзнкян Б.А., Арутюнян С.М. ТЭК России на пороге четвертой промышленной революции // Экономический анализ: теория и практика. 2018. № 5. С. 836–855.
31. Жемлиханов Т. Аккумуляторные батареи. Российские внешнеторговые потоки // Электротехнический рынок. 2015. № 2 (62). С. 28–30.
32. Иваницкая Е.В., «Международная арктическая станция на безуглеродной энергетике» <https://www.safety.ru/novosti/mezhdunarodnaya-arkticheskaya-stanciya-na-bezuglerodnoy-energetike>(дата обращения: 01.03.2021 г.)
33. Коровин Н.В., Скудин А.М. Химические источники тока. М.: Издательство МЭИ, 2003. 740 с.
34. Мазуренко С.Н. Водородные технологии в энергетике. Доступно по: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-6/78.pdf>
35. Майорова Т.В. Трансформация Экономики: низкоуглеродный путь развития // Экономика и политика. 2017. № 1. С. 58–62.
36. Мастепанов А.М. Энергетический переход: к чему готовиться мировому нефтегазу // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. Научно-экономический журнал. 2019, № 10 (178). С. 5–14.
37. Международная Арктическая станция «Снежинка». <https://arctic-mipt.com/>(дата обращения: 17.03.2021 г.)
38. На водороде в будущее <https://expert.ru/expert/2020/51/na-vodorode-v-budushchee/>
39. Новые энергетические технологии. Исследование № 2. Ассоциация НП «Совет рынка», 2017. 150 с. URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf
40. Петрушенко Ю.Я., Марченко Г.Н., Юдина Н.А., Ахметова И.Г., Водородная энергетика как альтернатива углеводородному и иным энергообогатенным видам сырья // Энергетика Татарстана. 2007. № 4 (8). С. 49–61.
41. Петрушенко Ю.Я., Сулейманов Н.М., Матухин В.Л., и др. На пути к водородной энергетике // Энергетика Татарстана. 2007. № 1 (5). С. 14–23.
42. Подгорный Ю.В., Лавров П.П., Воротилов К.А., и др. Влияние изменения спонтанной поляризации на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических тонких пленок // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 3. С. 465–468.
43. Макарова А.А., Григорьева Л.М., Митровой Т.А. Прогноз развития энергетики мира и России 2016. ИНЭИ РАН–АЦ при Правительстве РФ. М., 2016.
44. Сигов А.С., Матюхин В.Ф., Мельников В.М. Космические солнечные лазерные электростанции для энергоснабжения северных регионов России // Энергетическая политика. 2016. № 4. С. 65–73.
45. Синяк Ю.В., Моделирование стоимости водородного топлива в условиях его централизованного производства. Материалы семинара лаборатории ВЭТО ИВТРАН. Москва, 2017.
46. Тарасевич М.Р., Кузов А.В. Топливные элементы прямого окисления спиртов // Альтернативная энергетика и экология. 2010. Т. 87. № 7. С. 86–108.
47. Топливный элемент. Википедия / Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Топливный_элемент.
48. Экспертно-аналитический доклад «Новая технологическая революция: Вызовы и возможности для России». ЦСР. 2017. URL: <https://strategy.csr.ru/user/pages/researches/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>.
49. Яштулов Н.А., Лебедева М.В., Флид В.Р. Наноккомпозиты на основе палладия – высокоэффективные катализаторы для химических источников тока // Известия РАН. Сер. химическая. 2015. Т. 64. № 1. С. 24–28. 17. Яштулов Н.А. Электронодефицитные наночастицы платины и палладия на пористом кремнии // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6. № 3. С. 87–90.
50. Яштулов Н.А., Патрикеев Л.Н., Зенченко В.О., и др. Формирование и каталитические свойства материалов на основе пористого кремния с наночастицами платины // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 11–12. С. 91–96.

Авторы публикации

Челтыбашев Александр Анатольевич – канд.пед.наук, Мурманский государственный технический университет.

Караченцева Яна Марсильевна – старший преподаватель, Мурманский государственный технический университет.

References

1. Tiwari GN, Mishra RK. *Advanced renewable energy sources*. RSC Publishing, Cambridge, 2012. 562 p.
2. Antropov AP, Ragutkin AV, Yashtulov NA. Micropower composite nanomaterials based on porous silicon for renewable energy sources. *Int. J. Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2016;10(12):1346-1349.
3. Bagotsky VS, Skundin AM, Volfkovich YuM. *Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors*. John Wiley & Sons, 2015. 400 p.
4. Basu S. *Recent trends in fuel science and technology*. New York: Anamaya Publ.; New Delhi, India, 2007. 375 p.
5. Cheng X, Shi Z, Glass N, et al. A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation. *J. Power Sources*. 2007. V. 165. № 2. P. 739-756.
6. Gandia L.M., Arzamedi G. Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety. *Elsevier*. 2013. 472 p.
7. Ghenciu AF. *Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems*. Current opinion in solid state and materials science. 2002;6(5):389-399.
8. Ghenciu AF. *Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems*. Current opinion in solid state and materials science. 2002;6(5):389-399.
9. Global Storage Market to Double Six Times by 2030. *Bloomberg New Energy Finance*. 2017. Available at URL: <https://cleantechnica.com/2017/11/21/global-energy-storage-market-double-six-times-2030-bnef/>
10. Hartnig C, Roth C. *Polymer electrolyte membrane and direct methanol fuel cell technology*. In-situ characterization techniques for low temperature fuel cells. Woodhead Publ. Ltd., 2012;2:516.
11. *Hydrogen Council Update: Council Priorities & Hydrogen Cost Report Presented By Traci Kraus*. Hydrogen Council Member& Director of Government Relations at Cummins Available at <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/05-Kraus-H2%20Council%20Update.pdf>
12. Leung DY, Xuan J. *Micro & Nano-Engineering of Fuel Cells*. CRC Press, 2015. 338 p.
13. Liam Stoker. Storage secures 3.2GW of Capacity Market contracts in auction success. 2016. Available at URL: <https://www.energy-storage.news/news/storage-projects-secure-3.2gw-in-uks-capacity-market>
14. Misak S, Prokop L. Green energy and technology. Operation characteristics of renewable energy sources (1 ed.). *Springer Int. Publ. Switzerland*. 2017. 235 p.
15. Popel' OS, Tarasenko AB. Gibrinye nakopiteli elektricheskoy energii: ih osobennosti i primeneniye (Obzor). *Teploenergetika*. 2018;5:27-44.
16. Rabis A, Paramaconi R, Schmidt TJ. *Electrocatalysis for polymer electrolyte fuel cells: Recent achievements and future challenges*. *ACS Catal*. 2012;2(5):864-890.
17. Savard C, Yakovleva EV. Razvitie tekhnologiy nakopleniya elektricheskoy energii. *Molodoj uchenyj*. 2017;50:76-82.
18. Stolten D, Emonts B. *Fuel cell science and engineering: materials, processes, systems and technology*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2012. 1268 p.
19. *The Next Five Years in Energy Storage According to 500 Energy Professionals*. *GTM Research*. 2015. 15 p. Available at URL: <https://ru.scribd.com/document/396777482/The-Next-Five-Years-in-Energy-Storage-According-to-500-Energy-Professionals>
20. Tiwari JN, Tiwari RN, Singh G, et al. Recent progress in the development of anode and cathode catalysts for direct methanol fuel cells (review). *Nano Energy*. 2013;2:553-578.
21. Vielstich W, Lamm A. *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications*. Wiley, 2003. 3826 p.
22. Vielstich W, Yokokawa H, Gasteiger HA. *Handbook of fuels: Fundamentals, technology and applications*. John Wiley & Sons: New York, 2009;6:728 p.

23. Zhang J. PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers. Fundamentals and applications. *Springer Science & Business Media*, 2008. 1137 p.
24. *Al'ternativnye istochniki energii*. Available at <http://www.planetseed.com/ru/relatedarticle/altiernativnyie-istochniki-enierghii-toplivnyie-eliemienty>.
25. Bagockij VS, Skundin A.M. *Himicheskie istochniki toka*. M: Energoizdat, 1981. 360 s.
26. *Vodorodnaya energetika i sinerhiya otraslej*. Available at <https://energynet.ru/con2020#1/tab/256431881-3>.
27. *Vodorodnaya energetika Rossii*. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Vodorodnaya_energetika.
28. Voropaj NI, Stennikov VA, Barahtenko EA. Integrirovannye energeticheskie sistemy: vyzovy, tendencii, ideologiya. *Problemy prognozirovaniya*. 2017;5:39–49.
29. Da Roza A. *Vozobnovlyaemye istochniki energii. Fiziko-tekhnicheskie osnovy: uchebnoe posobie*. Per. s angl. pod redakciej S.P. Malysenko, O.S. Popelya. Dolgoprudnyj: Izdatel'skij dom «Intellect»; M.: Izdatel'skij dom MEI; 2010. 704 p.
30. Erznkjan BA, Arutyunyan SM. TEK Rossii na poroge chetvertoj promyshlennoj revolyucii. *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*. 2018;5:836–855.
31. ZHemlihanov T. Akkumulyatornye batarei. Rossijskie vneshnetorgovye potoki. *Elektrotekhnicheskij rynek*. 2015;2(62):28–30.
32. Ivanickaya EV. Mezhdunarodnaya arkticheskaya stanciya na bezuglerodnoj energetike Available at <https://www.safety.ru/novosti/mezhdunarodnaya-arkticheskaya-stanciya-na-bezuglerodnoj-energetike>. Accessed to: 01.03.2021 g.)
33. Korovin NV, Skundin AM. *Himicheskie istochniki toka*. M.: Izdatel'stvo MEI, 2003. 740 p.
34. Mazurenko SN. Vodorodnye tekhnologii v energetike.: Available at <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-6/78.pdf>.
35. Majorova TV. Transformaciya Ekonomiki: nizkouglerodnyj put' razvitiya. *Ekonomika i politika*. 2017;1:58-62.
36. Mastepanov AM. Energeticheskij perekhod: k chemu gotovit'sya mirovomu neftegazu. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom. Nauchno-ekonomicheskij zhurnal*. 2019;10 (178):5-14..
37. *Mezhdunarodnaya Arkticheskaya stanciya «Snezhinka»*. Available at [https://arctic-mipt.com/\(data obrashcheniya: 17.03.2021 g.\)](https://arctic-mipt.com/(data+obrashcheniya:17.03.2021+g.))
38. *Na vodorode v budushchee*. Available at <https://expert.ru/expert/2020/51/na-vodorode-v-budushchee/>
39. *Novye energeticheskie tekhnologii*. Issledovanie № 2. Associaciya NP «Sovet rynka», 2017. 150 s. Available at URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tekhnologii.pdf
40. Petrushenko YUYA, Marchenko GN, YUdina NA, et al. Vodorodnaya energetika kak al'ternativa uglevodorodnomu i inym energoobogashchennym vidam syr'ya. *Energetika Tatarstana*. 2007;4 (8):49-61.
41. Petrushenko YUYA, Sulejmanov NM, Matuhin VL, et al. Na puti k vodorodnoj energetike. *Energetika Tatarstana*. 2007;1(5):14-23.
42. Podgornyj YUV, Lavrov PP, Vorotilov K.A., et al. Vliyanie izmeneniya spontannoj polarizacii na vol't-ampernye harakteristiki segnetoelektricheskikh tonkih plenok. *Fizika tverdogo tela*. 2015;57(3):465-468.
43. Makarova AA, Grigor'eva LM, Mitrovoj TA. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii* 2016. INEI RAN–AC pri Pravitel'stve RF. M., 2016.
44. Sigov AS, Matyuhin VF, Mel'nikov VM. Kosmicheskie solnechnye lazernye elektrostancii dlya energosnabzheniya severnykh regionov Rossii. *Energeticheskaya politika*. 2016;4:65-73.
45. Sinyak YUV, Modelirovanie stoimosti vodorodnogo topliva v usloviyah ego centralizovannogo proizvodstva. *Materialy seminarov laboratorii VETO IVTRAN*. Moskva, 2017.
46. Tarasevich MR, Kuzov AV. Toplivnye elementy pryamogo okisleniya spirtov // *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2010;87(70):86-108.
47. Toplivnyj element. Vikipediya. http://ru.wikipedia.org/wiki/Toplivnyj_element.
48. Ekspertno-analiticheskij doklad. *Novaya tekhnologicheskaya revolyuciya: Vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii*. CSR. 2017. URL: <https://strategy.csr.ru/user/pages/researches/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>

49. YAshtulov NA, Lebedeva MV, Flid VR. Nanokompozity na osnove palladiya – vysokoeffektivnye katalizatory dlya himicheskikh istochnikov toka. *Izvestiya RAN. Ser. himicheskaya*. 2015;64(1):24-028.

50. YAshtulov NA, Patrikeev LN, Zenchenko VO, et al. Formirovanie i kataliticheskie svoystva materialov na osnove poristogo kremniya s nanochasticami platiny. *Rossiyskie nanotekhnologii*. 2015;10:11-12:91-96.

Authors of the publication

Aleksandr A. Cheltybashev – Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia.
Email: cheltybashevaa@mstu.edu.ru.

Iana M. Karachentseva – Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia.

Получено

16 марта 2021г.

Отредактировано

30 марта 2021г.

Принято

30 марта 2021г.