

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.35264/1996-2274-2021-2-134-150

### ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

**Н.И. Андриянов**, нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, [andrnick@extech.ru](mailto:andrnick@extech.ru)

**М.П. Засько**, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, [zasko@extech.ru](mailto:zasko@extech.ru)

**В.Н. Долгова**, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. экон. наук, [dolgovavn@extech.ru](mailto:dolgovavn@extech.ru)

Рецензент: Г.В. Томаров

*Несмотря на большую неопределенность в сроках, которые указывают аналитики в своих прогнозах, переход на новый энергетический уклад неизбежен. Этот переход означает не мгновенный и полный отказ от углеводородной энергетики, а постепенную ее замену источниками энергии, не загрязняющими окружающую среду в процессе эксплуатации, с низким «углеродным следом». И роль водородной энергетики в этом процессе значительна.*

*Цель статьи – проведение обзора и оценки текущего состояния водородной энергетики в России, в частности по технологиям твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ).*

*В статье даны ссылки из документов стратегического и перспективного планирования в сфере энергетики, указывающие на основные направления развития водородной энергетики в Российской Федерации; технологии водородной энергетики, в том числе технологии топливных элементов (ТЭ): общая характеристика, область их применения, пять основных типов ТЭ, и более подробно – общая характеристика и область применения ТОТЭ как наиболее перспективных с точки зрения практического применения и уровня технологической разработки.*

*Проведен мониторинг публикационной активности по тематике ТОТЭ, методология которого основана на использовании инструментов расширенного поиска международных систем научного цитирования Web of Science и Scopus по ключевым словам. Представлена динамика публикационной активности ученых, проводивших исследования по тематике ТОТЭ, за период 1990–2020 гг.; мониторинг публикационной активности 10 мировых стран-лидеров по научным исследованиям в области ТОТЭ за период 2010–2020 гг. и отдельно – рейтинг российских научных организаций за период 1990–2020 гг.*

*Проанализированы результаты исследований зарубежных ученых, привлеченных к данной тематике в рамках проектов мегагрантов, а также результаты конкурсных отборов в рамках государственной поддержки молодых российских ученых (гранты и стипендии Президента Российской Федерации).*

**Ключевые слова:** водородная энергетика, топливные элементы, твердооксидные топливные элементы, публикационная активность, Web of Science, Scopus.

### ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF HYDROGEN ENERGY IN RUSSIA

**N.I. Andriyanov**, Head of Department, SRI FRCEC, [andrnick@extech.ru](mailto:andrnick@extech.ru)

**M.P. Zasko**, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, [zasko@extech.ru](mailto:zasko@extech.ru)

**V.N. Dolgova**, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Economics, [dolgovavn@extech.ru](mailto:dolgovavn@extech.ru)

*Despite the great uncertainty in the timing that analysts indicate in their forecasts, the transition to a new energy system is inevitable. This transition does not mean an instant and complete*

*abandonment of hydrocarbon energy, but its gradual replacement with energy sources that do not pollute the environment during operation, with a low «carbon footprint». And the role of hydrogen energy in this process is significant.*

*The purpose of the article is to review and assess the current state of hydrogen energy in Russia, in particular on solid oxide fuel cell (SOFC) technologies.*

*The article contains references from strategic and long-term planning documents in the field of energy, indicating the main directions of development of hydrogen energy in the Russian Federation; hydrogen energy technologies, including fuel cell technologies (FC): general characteristics, scope of their application, five main types of FC, and in more detail – the general characteristics and scope of SOFC as the most promising from the point of view of practical application and the level of technological development.*

*The monitoring of publication activity on the subject of the SOFC was carried out, the methodology of which is based on the use of advanced search tools of the international scientific citation systems Web of Science and Scopus by keywords. The dynamics of the publication activity of scientists who conducted research on the subject of SOFC for the period 1990–2020 is presented; monitoring of the publication activity of 10 world leaders in scientific research in the field of SOFC for the period 2010–2020 and separately – the rating of Russian scientific organizations for the period 1990–2020.*

*The results of the research of foreign scientists involved in this topic within the framework of megagrant projects, as well as the results of competitive selections within the framework of state support for young Russian scientists (grants and scholarships of the President of the Russian Federation) are analyzed.*

**Keywords:** hydrogen energy, fuel cells, solid oxide fuel cells, publication activity, Web of Science, Scopus.

## **Введение**

Человечество вынуждено глобально заниматься проблемами экологии и климата в связи с участвовавшими случаями природных катаклизмов: экстремальной жары, лесных пожаров, наводнений, ураганов и др. [1].

В последнее время проблеме «карбонового следа» и потеплению климата, связанного с выбросами парниковых газов, в том числе в результате жизнедеятельности человека, уделяется повышенное внимание как со стороны мирового научного сообщества [2–6], так и со стороны органов государственной власти во многих странах.

Целью государственной политики многих стран стало стремление к «устойчивому развитию, при котором удовлетворение потребностей настоящих поколений осуществляется без ущерба для возможностей будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» [7].

В связи с этим в 1997 г. был принят первый межгосударственный нормативный акт, нацеленный на борьбу с глобальным потеплением, – Киотское соглашение, затем в 2015 г. на смену ему пришло Парижское соглашение, которое было ратифицировано Россией в сентябре 2019 г. [8].

## **Структура мирового первичного энергопотребления**

Одним из ключевых элементов достижения устойчивого развития является энергетика, базирующаяся на переходе к безуглеродным источникам энергии, так как одной из причин значительных выбросов парниковых газов является эксплуатация существующих энергетических установок.

Рассмотрим с этой точки зрения основные способы получения энергии: на тепловых электростанциях (ТЭС), атомных электростанциях (АЭС), гидроэлектростанциях (ГЭС) и на энергетических установках с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

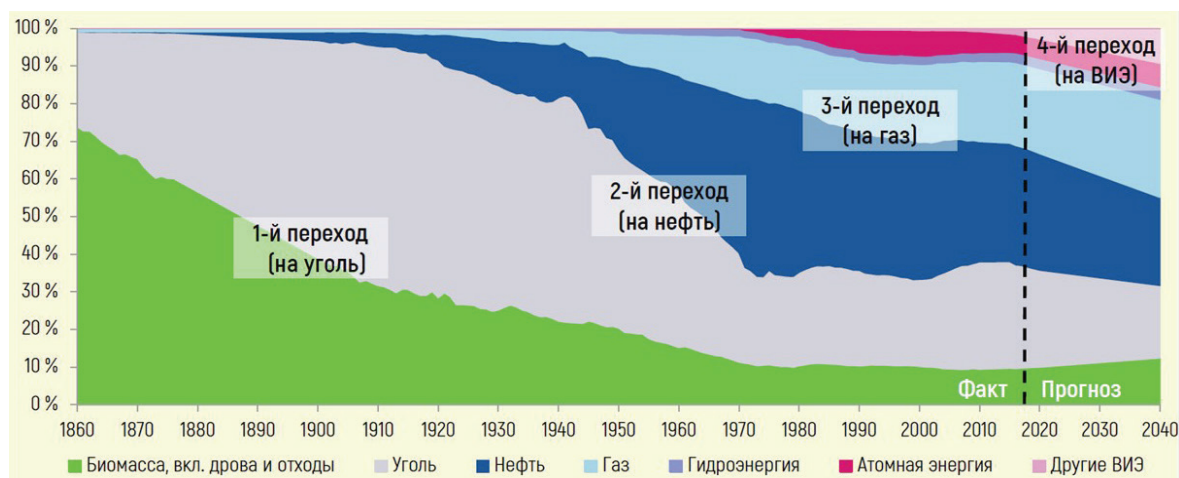
Очевидно, что продолжать сжигать органическое топливо на ТЭС нецелесообразно по причине ограниченности его запасов и возникающих при этом экологических проблем. Кроме того, безопасность эксплуатации ранее построенных ТЭС снижается за счет значительного износа оборудования. Однако на сегодняшний день более 60% электроэнергии в мире производится на тепловых электростанциях, включая ТЭС на газе, газомазутные и пылеугольные ТЭС [9]. Поэтому активно разрабатываются способы и технологии значительного сокращения выбросов парниковых газов при сжигании углеводородного сырья, такие как газификация топлива, преобразование углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в чистый углерод, захоронение  $\text{CO}_2$ , использование ТЭ и других новых технологий.

В свою очередь, производство электроэнергии на АЭС не дает выбросов  $\text{CO}_2$ , но связано с рядом технологических и экологических проблем. Такие страны, как Австрия, Швеция, Италия, Бельгия, Германия, Швейцария и др., выходят из гражданской ядерной энергетики, закрепив отказ от использования атомной энергии для производства электроэнергии на законодательном уровне. Перспективы развития атомной энергетики – переход на замкнутый топливный цикл, строительство атомных энерготехнологических станций (АЭТС) [10], создание АЭС малой мощности, компактных и мобильных АЭС – требуют и времени, и больших финансовых затрат для широкомасштабного внедрения. Перспективы термоядерной энергетики так же туманны, как и 50 лет назад. Даже Международный проект по строительству экспериментального термоядерного реактора (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER) все еще не завершен, сроки перенесены на 2025 г.

Гидроэлектростанции (ГЭС) практически исчерпали природный ресурс.

Эксплуатация энергоустановок на ВИЭ (солнечная энергия, энергия ветра и приливов, геотермальные источники и др.) сопряжена с рядом проблем: низкий коэффициент полезного действия, особые требования к природным условиям, трудности при включении в системы большой энергетики, высокая стоимость производимой энергии. И все же использование ВИЭ, перспективных с точки зрения уменьшения выбросов парниковых газов, будет и дальше расширяться и финансироваться, тем более что в ЕЭС планируется ввести «углеродный налог» на выбросы углекислого газа.

Согласно Прогнозу развития энергетики мира и России до 2040 г., разработанному Институтом энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН) совместно с Центром энергетики Московской школы управления «Сколково» (далее – Прогноз) [2], в настоящий момент мировое сообщество стоит на пороге четвертого энергетического перехода к возобновляемым источникам энергии (рис. 1).



**Рис. 1. Изменение структуры мирового первичного энергопотребления по видам топлива с 1860 г. и четыре энергетических перехода**

Прогноз предполагает: «Быстрое развитие ВИЭ позволит им уже к 2040 г. обеспечивать 35–50 % мирового производства электроэнергии и 19–25 % всего энергопотребления. Из ископаемых топлив только газ сможет нарастить свою долю в мировом энергобалансе с 22 % до 24–26 %. Уголь снизит свою долю с 28 % до 19–23 %».

В связи с вышесказанным понятен возрастающий интерес к технологиям водородной энергетики с низким «углеродным следом».

Водород рассматривается как перспективный энергоноситель, который вполне может заменить природные энергоносители (нефть, природный газ, уголь) и имеет ряд преимуществ:

– водород – экологически чистый энергоноситель: он нетоксичен, а продуктами его сгорания являются пары воды;

– по сравнению с другими видами топлива водород имеет наиболее высокую теплоту сгорания на единицу массы (120 МДж/кг);

– водород можно транспортировать и хранить как природный газ (транспортировать по трубопроводам, хранить в емкостях в газообразном или в сжиженном состоянии);

– с помощью водорода можно аккумулировать излишки электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками в период снижения потребительских нагрузок;

– водород и получаемые на его основе водородсодержащие горючие смеси можно применять в двигателях и энергоустановках различного назначения.

Основными эксплуатационными недостатками использования водорода являются проблемы хранения чистого водорода: при газобаллонном способе хранения – взрывоопасность; при криогенном – низкая температура кипения (20 К) и при металлгидридном – относительно невысокое содержание водорода по массе.

### **Состояние водородной энергетики в России**

Наша страна начиная с 70-х гг. XX в. в период энергетического кризиса и вплоть до середины 90-х гг. XX в. занимала передовые позиции в научных исследованиях и разработках в сфере водородной энергетики. В России был осуществлен первый в мире полет самолета-лаборатории Ту-155 на водороде; созданы: один из первых экспериментальных автомобилей с топливными элементами, космический криогенный водородный комплекс, первые опытно-промышленные плазмохимические установки получения водорода, опытные автомобили на бензоводородных смесях, экспериментальные водородо-кислородные парогенераторы; разработаны разнообразные металлгидридные устройства; созданы электролизеры для получения водорода с твердополимерным электролитом и сплавы – аккумуляторы водорода [3].

На сегодняшний день водородная энергетика включает следующие основные технологии:

– крупномасштабное производство водорода из невозобновляемых и возобновляемых источников энергии;

– хранение и транспортировку водорода;

– использование водорода для получения энергии в промышленности, на транспорте, в сфере жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ);

– производство топливных элементов и энергоустановок на их основе.

Российская Федерация располагает уникальными запасами сырьевых ресурсов (природный газ, ядерное топливо), высококвалифицированными кадрами и опытом проведения исследований в сфере водородной энергетики, что свидетельствует о готовности страны к переходу к водородной энергетике.

В новой редакции Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г., утвержденной в июне 2020 г., прогнозируется, что водород в перспективе способен стать новым энергоносителем, замещающим углеводородные энергоносители, и сформировать «водородную экономику». Задача водородной энергетики – развитие производства и потребления водорода, вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту. В комплекс ключевых мер для ее решения в области технологий на-



ряду с увеличением масштабов производства водорода, в том числе с использованием ВИЭ и атомной энергии, разработкой отечественных низкоуглеродных технологий производства водорода методами конверсии, пиролиза метана, электролиза и других технологий, входят разработка и использование технологий топливных элементов на основе водорода и водородсодержащих смесей на транспорте, а также в качестве накопителей и преобразователей энергии для повышения эффективности централизованных и автономных систем энергоснабжения [11].

Распоряжением Правительства Российской Федерации в октябре 2020 г. утвержден План «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» [12], в котором представлен комплекс мероприятий в целях поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития водородной энергетики с последующим внедрением результатов. В первую очередь планируется реализовать приоритетные пилотные проекты в области водородной энергетики.

В 2023 г.:

- создание низкоуглеродного производства водорода на объектах добычи газа или объектах переработки углеводородного сырья;
- реализация производства водорода с использованием мощностей российских АЭС.

В 2024 г.:

- изготовление и испытание газотурбинных установок (ГТУ) на метано-водородном топливе;
- создание опытного образца железнодорожного транспорта на водороде;
- создание установок производства водорода без выбросов углекислого газа.

Особенностью развития водородной энергетики в России является то, что производство водорода планируется осуществлять в основном с использованием АЭС, а не ВИЭ, а также использовать водородные технологии на железнодорожном транспорте, что подчеркивает важность данного вида транспорта в нашей стране наряду с автомобильным.

В декабре 2020 г. Президент России В.В. Путин поручил премьер-министру М.В. Мишустину создать к 2023 г. городской автобус на водородном носителе, а следующим шагом должны стать водородные локомотивы [13]. Пилотным полигоном по созданию поезда на водородных топливных элементах выбрана Сахалинская обл., где будет создан водородный кластер с возможностью экспорта на рынки азиатских стран. К 2023–2024 гг. планируется создать опытные образцы магистрального и маневрового локомотивов с использованием силовой установки на базе электрохимических водородных топливных элементов совместно с литий-ионными аккумуляторными батареями.

В августе 2021 г. была принята Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, которая ставит стратегической целью реализацию национального потенциала в области производства, экспорта, применения водорода и промышленной продукции для водородной энергетики, а также вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по их производству и экспорту с обеспечением конкурентоспособности экономики страны в условиях глобального энергетического перехода [14].

В России 2021 г. объявлен Годом науки и технологий, а октябрь – тематическим месяцем «Энергетика будущего», в рамках которого по водородной тематике прошли:

- испытания опытной партии энергоустановок на основе топливных элементов с воздушным охлаждением мощностью 5 кВт в составе транспортного средства;
- запуск опытного производства химических генераторов водорода с выходом водорода не менее 7% масс. для применения в составе энергоустановок на топливных элементах;
- запуск опытного производства энергоустановок с энергоемкостью до 700 Втч/кг на основе топливных элементов.

До конца года планируется создать семь карбоновых полигонов в целях реализации национальной системы мониторинга парниковых газов [15].

### Общая характеристика и преимущества топливных элементов

Одно из наиболее перспективных научных направлений в области науки и технологий по тематике водородной энергетики, в рамках которой существует большая вероятность совершить инновационный технологический прорыв, – разработка и коммерциализация ТЭ и реакторов производства водорода.

Общими преимуществами ТЭ перед другими преобразователями энергии являются: высокая эффективность, отсутствие движущихся частей и, как следствие, низкий уровень шума, а главное – практическое отсутствие вредных выбросов в окружающую среду, так как продуктом электрохимической реакции в них является обычная вода.

Область применения топливных элементов имеет широкий спектр: от замены батареек или аккумуляторов в портативных электронных устройствах, полной замены традиционного двигателя внутреннего сгорания или дополнения к нему в автомобилях, использования в небольших энергетических установках для обеспечения энергией и теплом жилых домов до мегаваттных электростанций для крупномасштабного производства электроэнергии.

Модульность конструкции ТЭ позволяет варьировать производительность электрохимического генератора (ЭХГ), т. е. мощность топливных элементов может быть увеличена простым добавлением отдельных блоков, при этом коэффициент полезного действия (КПД) не меняется, следовательно, большие установки так же эффективны, как и малые. Кроме того, установки с использованием ТЭ с подачей топлива практически сразу включаются на полную мощность. Эти преимущества позволяют очень гибко подбирать состав оборудования в соответствии с запросами потребителей.

В Концепции развития водородной энергетики в России одним из ключевых факторов, который будет способствовать глобальному внедрению водородной энергетики, названо развитие технологий применения водородных энергоносителей в различных секторах экономики, в том числе расширение применения топливных элементов. Технологии топливных элементов найдут свое применение для развития водородного транспорта, робототехники, локального производства и применения водорода (в том числе для энергоснабжения изолированных территорий) и в перспективе могут стать экспортными продуктами.

Существует пять основных типов топливных элементов: твердополимерные (ТПТЭ), щелочные (ЩТЭ), фосфорнокислотные (ФКТЭ), карбонатно-расплавные (КРТЭ) и твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ). Основные характеристики основных типов ТЭ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики топливных элементов

Тип ТЭ	ТПТЭ	ЩТЭ	ФКТЭ	КРТЭ	ТОТЭ
Температура, °С	80–100	65–250	150–220	600–1000	600–1000
Материалы анода	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-Co/C, Pt Pt-Pd/C	Pt/C, Pt-Ru/C	Ni-Al, Ni-Cr	Ni, NiO
Материалы катода	Pt/C	Ni (Pt)	Pt/C, Pt-WO <sub>3</sub> /C	LiFeO <sub>2</sub>	LaSrMnO <sub>3</sub>
Материалы электролита	Полимерная мембрана (иономер)	КОН/NaOH на носителе	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> на носителе	LiKCO <sub>3</sub> , LiNaCO <sub>3</sub> на носителе	ZrO <sub>2</sub> , CeO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Диапазон мощностей	0,01÷100 кВт	~100 кВт	~100 кВт	≥ 1 МВт	≥ 1 МВт
Ресурс, ч	До 2·10 <sup>4</sup>	До 1·10 <sup>4</sup>	До 5·10 <sup>4</sup>	До 2·10 <sup>4</sup>	До 6·10 <sup>4</sup>

Представленные в табл. 1 данные наглядно подтверждают, что наиболее перспективными для широкого практического использования являются твердооксидные топливные элементы. Преимущества ТОТЭ в том, что они обеспечивают широкий диапазон мощностей, высокий уровень температур и имеют максимальный временной ресурс по сравнению с другими типами ТЭ, а также не нуждаются в дорогом катализаторе (платине).

ТОТЭ в сочетании с установками для паровой термической конверсии могут работать на многих видах топлива: природном газе, метане, бутане, пропане, бензине, дизельном топливе, угле, спиртах, а также на древесине, торфе, стружке, отходах сельхозпроизводства. В результате газификации топлива в топливном процессоре образуется водородсодержащий горючий газ, который и подается в батарею топливного элемента.

ТОТЭ имеют гораздо больший теоретический КПД, чем традиционные технологии преобразования энергии, КПД которых ограничен КПД цикла Отто, Тринклера или Карно. При этом если предельный КПД электрохимических генераторов на кислород-ионных электролитах составляет 60 %, то с применением протонных электролитов можно получить и 80 %.

Основными направлениями использования ТОТЭ являются следующие.

Гибридные энергоустановки, полученные объединением высокотемпературных топливных элементов и газотурбинной или парогазовой установки, которые способны и повысить КПД, и улучшить экологические параметры, и значительно сэкономить топливо. В связи с этим ТОТЭ целесообразно использовать в крупных (10–100 МВт) гибридных энергоустановках на природном газе и продуктах газификации угля с эффективностью 60–70 %, в том числе с возможностью улавливания  $\text{CO}_2$ , так как более высокая температура работы ТОТЭ позволяет утилизировать высокопотенциальное тепло в газотурбинном цикле с большей эффективностью.

Использование ТОТЭ в качестве источников распределенной энергетики. ТОТЭ могут встраиваться в системы энергоснабжения на основе ископаемых видов топлива. Дальнейшее увеличение их эффективности может быть достигнуто при использовании ТОТЭ в сочетании с газовыми турбинами в системах когенерации электричества и тепловой энергии. Также ТОТЭ могут быть использованы в системах энергоснабжения на основе ВИЭ в качестве накопителей энергии. Необходимо также отметить, что технологии ТОТЭ могут быть легко адаптированы для обеспечения обратимости электрохимических процессов, т. е. электролиза водяного пара и диоксида углерода в режиме снижения потребительских нагрузок в целях накопления водорода и генерации электроэнергии в пиковом режиме потребления системы.

Использование ТОТЭ в ЖКХ. Топливные элементы можно размещать непосредственно в здании, при этом снижаются потери при транспортировке энергии, а тепло, образующееся в результате работы ТЭ, можно использовать для теплоснабжения или горячего водоснабжения здания. Автономные источники тепло- и электроснабжения наиболее актуальны в отдаленных районах и в регионах, для которых характерны нехватка электроэнергии и высокая стоимость ее получения традиционными способами из углеводородного сырья (нефти, природного газа). Кроме того, перспективно их использование в установках для децентрализованного энергоснабжения широкого диапазона мощностей.

#### **Наукометрический анализ публикационной активности**

В целях анализа публикационной активности ученых, проводящих исследования в области ТОТЭ, предлагается обратиться к международным базам научного цитирования Web of Science (WoS) и Scopus [16, 17].

Мониторинг публикационной активности ученых по данным WoS предлагается осуществлять по всем индексам научного цитирования, представленным в базе данных. В данном исследовании использовался анализ всех типов научных публикаций (статьи, тезисы докладов, материалы конференций, обзоры и пр.).

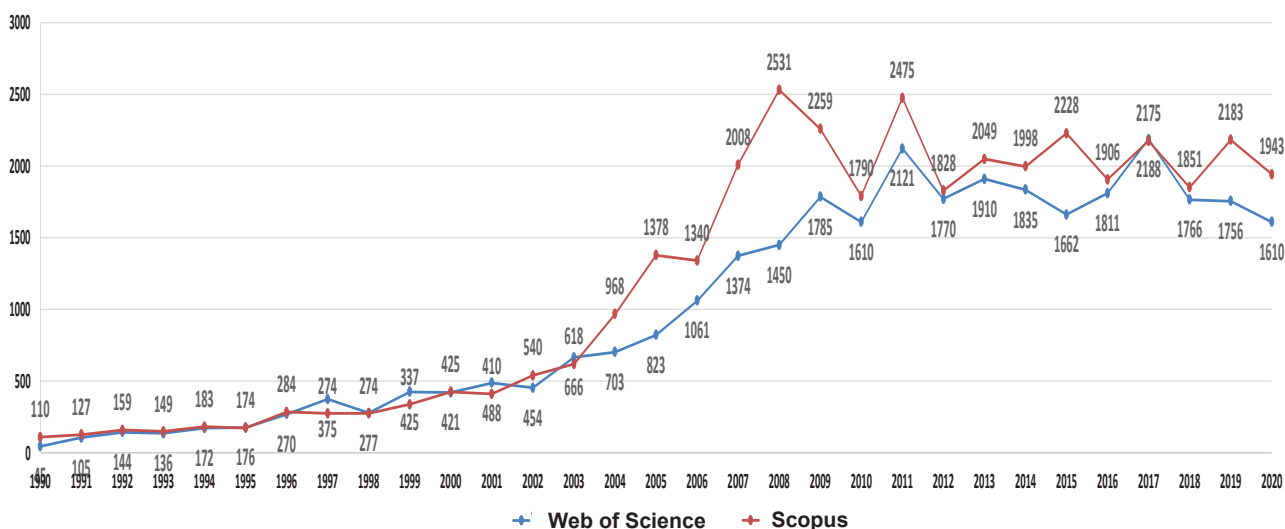
Наукометрический подход поиска ученых по тематике твердооксидных топливных элементов по данным WoS и Scopus основан на использовании инструментов расширенного поиска, позволяющих искать публикации по ключевым словам, в названии публикации, в аннотации и ключевых словах автора.

В качестве ключевых слов использовались следующие устойчивые и широко применяемые сочетания английских слов:

- Solid Oxide fuel cell (твердооксидные топливные элементы);
- SOFC (ТОТЭ);
- defective structure of complex oxide (дефектная структура сложных оксидов);
- phase equilibria in oxide systems (фазовые равновесия в оксидных системах) [18].

Мониторинг публикационной активности по тематике ТОТЭ проводился в различных разрезах: в динамике за период 1990–2020 гг.; в разрезе ведущих стран; в разрезе ведущих организаций, с которыми были аффилированы авторы публикаций по данному научному направлению.

Результаты проведенного в данной статье мониторинга публикационной активности российских и зарубежных ученых представлены на рис. 2–4.



**Рис. 2. Динамика публикационной активности ученых в мире по тематике ТОТЭ за период 1990–2020 гг. (по данным WoS и Scopus; дата обращения: 05.08.2021)**

Динамика публикационной активности ученых во всем мире по тематике ТОТЭ за период 1990–2020 гг. (как по данным WoS, так и по данным Scopus) имеет положительный тренд. Наиболее оживленный подъем публикационной активности по данной тематике наблюдается в период 2000–2003 гг. Это обуславливается тем, что во многих странах с 2001 г. началось активное финансирование работ по водородной энергетике и ТЭ, а также создание национальных и международных государственных и научно-исследовательских структур, программ и проектов. С 2004 г. начала свою работу Европейская технологическая платформа по водороду и топливу (European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform – HER) в целях создания конкурентоспособных энергетических систем и технологий на основе ТЭ [3]. В процесс роста публикационной активности до 2008 г. существенный вклад внес четвертый доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). В 2007 г. МГЭИК была удостоена Нобелевской премии мира «за изучение последствий



глобальных климатических изменений, вызванных деятельностью человека, и выработке мер по их возможному предотвращению» [19].

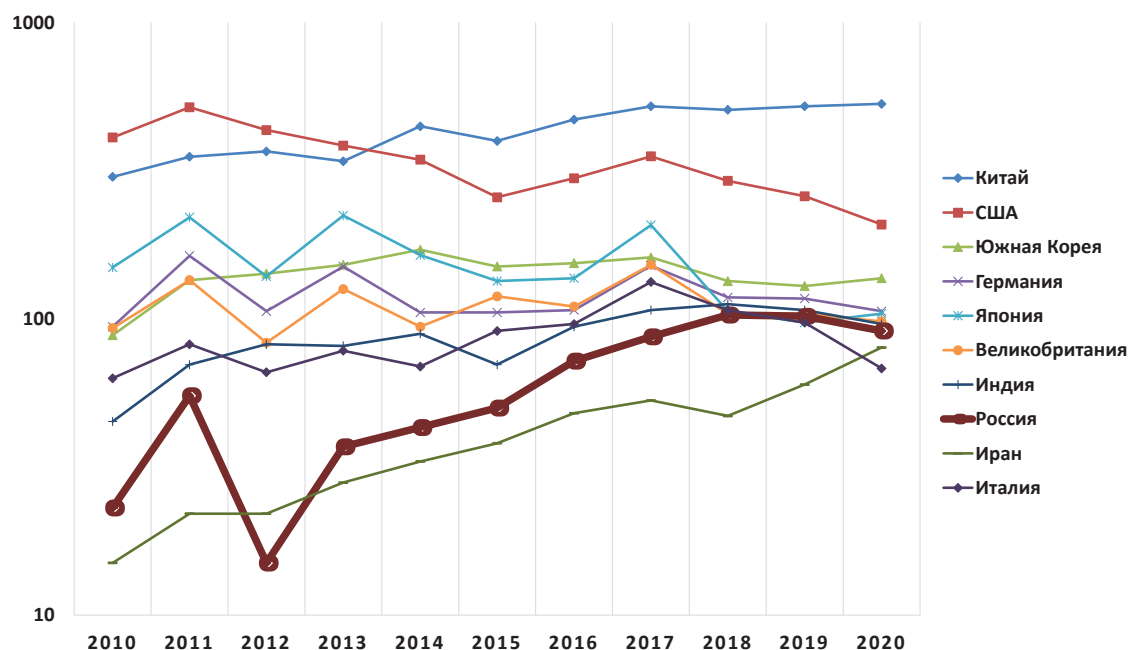


Рис. 3. Динамика публикационной активности ученых в странах-лидерах по тематике ТОТЭ за период 2010–2020 гг. (по данным WoS; дата обращения: 05.08.2021)

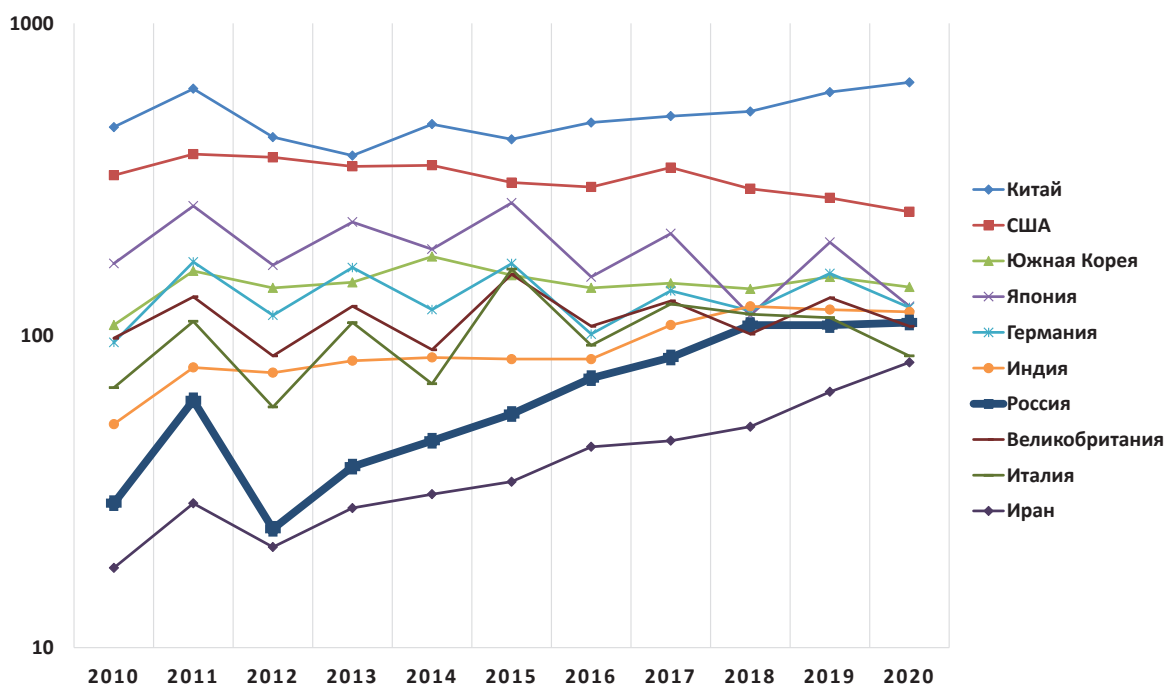


Рис. 4. Динамика публикационной активности ученых в странах-лидерах по тематике ТОТЭ за период 2010–2020 гг. (по данным Scopus; дата обращения: 05.08.2021)

Далее наблюдался еще один всплеск – в 2011 г. (2475 публикаций – по данным Scopus, 2121 публикация – по данным WoS). Свою роль в этом процессе сыграл рост научного интереса к теме ТОТЭ в связи с мировыми энергетическими кризисами 2000, 2004, 2005 гг., 2007–2009 гг. [20]. Направлениями борьбы с кризисом наряду с финансовыми инструментами стали поиск альтернативных видов энергии и развитие экономичного транспорта.

Затем в течение последних 8 лет наблюдалась стагнация публикационной активности с небольшими колебаниями – около 2 тыс. публикаций ежегодно, как по данным WoS, так и по данным Scopus.

Мониторинг публикационной активности ученых во всем мире по тематике ТОТЭ за последние 10 лет в разрезе стран позволил выявить топ-10 стран-лидеров, публикующих научные результаты по данной проблеме в течение долгого периода времени (см. рис. 3–4).

По данным WoS, представленным на рис. 3, видно, что первое место в 2020 г. занимает Китай (531 публикация), обогнав США в 2014 г., второе место – США (208 публикаций), на третьем месте – Южная Корея (138 публикаций), которая обогнала Японию и Германию еще в 2018 г. Россия в данной десятке стран занимает 8-е место, увеличив свою публикационную активность за последние 10 лет в 4 раза: с 23 до 91 публикации.

На рис. 4 представлена динамика публикационной активности топ-10 ведущих стран по тематике ТОТЭ за последние 10 лет по данным Scopus. Первое место на протяжении всего периода времени стабильно занимает Китай – 647 публикаций в 2020 г., второе место – США (249 публикаций), третье место – Южная Корея (143 публикации), которая обогнала Японию (124 публикации) лишь в 2020 г. В данной десятке лидеров Россия занимает 7-е место (110 публикаций), наращивая свою публикационную активность поступательно в течение всего периода времени и обогнав такие европейские страны, как Великобритания (107 публикаций) и Италия (86 публикаций).

Таким образом, по результатам представленного мониторинга публикационной активности можно сделать следующие выводы: в последнее десятилетие в европейских странах уровень публикационной активности ученых по тематике ТОТЭ стагнирует, а в таких странах, как Китай, Индия, Иран, а также Россия, – возрастает.

Анализ рейтинга российских организаций, занимающихся исследованиями в области ТОТЭ (по данным WoS и Scopus за период 1990–2020 гг.), показал, что в рейтинговых списках организации, найденные по ключевым словам «дефектная структура сложных оксидов» и «фазовые равновесия в оксидных системах», более многочисленны и выходят на первый план по сравнению с поиском по всем ключевым словам или по ключевым словам «твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ)».

Так, при поиске по всем ключевым словам в первую сотню российских организаций попадает только Уральский федеральный университет (УрФУ) (51-е место по данным WoS, 45-е место по данным Scopus), Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН (ИВТЭ УрО РАН) (60-е место по данным WoS, 51-е место по данным Scopus) и организации Сибирского отделения РАН (92-е место по данным Scopus). При поиске по ключевым словам «твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ)» складывается аналогичная ситуация: в первую сотню из российских организаций попадает только УрФУ (57-е место по данным WoS, 63-е место по данным Scopus) и ИВТЭ УрО РАН (52-е место по данным WoS, 56-е место по данным Scopus).

При поиске по ключевым словам «дефектная структура сложных оксидов» на первое место выходит Институт катализа имени Г.К. Борескова СО РАН (Институт катализа СО РАН) (2-е место по данным WoS, 1-е место по данным Scopus), на втором месте в рейтинге находится Сибирское отделение РАН (2-е место по данным Scopus), далее идут многочисленные научные образовательные организации, среди которых: Новосибирский государственный университет (НГУ) (6-е место по данным WoS, 4-е место по данным Scopus), Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (6-е место по данным

WoS, 4-е место по данным Scopus); 5-е место по данным Scopus разделили Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ), Томский политехнический университет (ТПУ), Тамбовский государственный технический университет, Российский университет транспорта (МИИТ); 7-е место разделили следующие организации: Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Институт химии и химической технологии СО РАН, Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Красноярский научный центр СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российский университет дружбы народов.

При поиске по ключевым словам «фазовые равновесия в оксидных системах» на первое место выходят организации Сибирского отделения РАН (9-е место по данным Scopus), далее идет УрФУ (12-е место по данным WoS, 11-е место по данным Scopus), затем – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (19-е место по данным WoS, 17-е место по данным Scopus) и Институт общей и неорганической химии РАН имени Н.С. Курнакова (27-е место по данным WoS, 19-е место по данным Scopus). Несколько меньшее число публикаций принадлежит ученым из следующих организаций: Санкт-Петербургского государственного университета (30-е место по данным WoS, 24-е место по данным Scopus), Института металлургии УрО РАН (30-е место по данным WoS), Санкт-Петербургского научного центра РАН (36-е место по данным WoS), Института химии твердого тела УрО РАН (38-е место по данным WoS, 30-е место по данным Scopus), Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (40-е место по данным WoS, 28-е место по данным Scopus), ИТ СО РАН (40-е место по данным WoS, 29-е место по данным Scopus), ЮУрГУ (43-е место по данным WoS, 13-е место по данным Scopus), Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (45-е место по данным WoS, 31-е место по данным Scopus), НИЦ «Курчатовский институт» (45-е место по данным WoS), Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (45-е место по данным WoS, 28-е место по данным Scopus), Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (45-е место по данным WoS, 29-е место по данным Scopus), Института нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиева РАН (45-е место по данным WoS, 33-е место по данным Scopus), Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (46-е место по данным WoS, 30-е место по данным Scopus), ИВТЭ УрО РАН (46-е место по данным WoS, 33-е место по данным Scopus), Института экспериментальной минералогии РАН (31-е место по данным Scopus), НГУ (33-е место по данным Scopus), а 47-е место по данным WoS разделили следующие организации: Институт катализа СО РАН, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Институт физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, и на 49-м месте по данным WoS находится ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Помимо анализа результатов деятельности вышеперечисленных организаций, авторами данной статьи был проведен анализ научных результатов в области водородной энергетики по тематике ТОТЭ зарубежных ученых, приглашенных в Россию в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 220 о мерах по привлечению ведущих мировых ученых (в том числе соотечественников, проживающих за рубежом) в российские образовательные организации высшего образования, научные учреждения и государственные научные центры в целях разработки прорывных научных исследований в различных областях науки [21]; подготовки высококвалифицированных научных кадров, в том числе привлечения молодежи в сферу науки и высоких технологий, а также возрождения и создания устойчивых связей с ведущими мировыми научно-образовательными центрами и научными школами. В дальнейшем данная мера государственной поддержки получила название «программа мегагрантов».

В рамках данной программы по тематике ТОТЭ проводились следующие научные исследования:

– в ИВТЭ УрО РАН была создана лаборатория «Электрохимические устройства на твердооксидных протонных проводниках» под руководством греческого ученого Циакараса Панайотиса (публикационная активность: по данным WoS/Scopus количество публикаций с 184/171 в 2015 г. увеличилось до 275/265 к 2021 г., индекс Хирша на данный момент составляет 55/57, количество цитирований – 10 217/10 371) под проект «Разработка твердооксидных электрохимических ячеек с несущим и тонкослойным протонным электролитом для электрохимических устройств» (период реализации проекта – 2014–2018 гг.). В результате работы над данным проектом в лаборатории разработан кислородный насос для очистки аргона от кислорода. Такие кислородные насосы могут применяться для очистки инертных газов и азота от кислорода, в частности в системах переработки отработанного ядерного топлива;

– в ИТ СО РАН создана лаборатория «Новых энергетических технологий и энергоносителей» под руководством японского ученого Йошиюки Кавазое (публикационная активность: по данным WoS/Scopus количество публикаций с 903/1134 в 2015 г. увеличилось до 906/1209 к 2021 г., индекс Хирша на данный момент составляет 69/77, количество цитирований – 24 998/32 483) под одноименный проект (период реализации проекта – 2013–2015 гг.). В результате работы над данным проектом в лаборатории исследованы свойства топливных элементов и построена батарея из компактных элементов на алюминии. Показана возможность растворения водорода в одной из пяти кристаллических структур льда для получения водородных газогидратов;

– в ИФТТ РАН создана лаборатория материалов для электрохимических технологий под руководством белорусского ученого Владислава Вадимовича Хартона (публикационная активность: по данным WoS/Scopus количество публикаций с 333/327 в 2015 г. увеличилось до 367/374 к 2021 г., индекс Хирша на данный момент составляет 57/59, количество цитирований – 12 756/13 302) под проект «Новые материалы и технологии твердооксидных топливных элементов, керамических мембран и высокотемпературных электролизеров газов» (период реализации проекта – 2013–2017 гг.). В результате работы над данным проектом в лаборатории разработаны новые материалы для ТОТЭ, электролизеров газов (ТОЭ) и керамических мембран с улучшенной стабильностью и функциональными свойствами, обеспечивающими высокую эффективность, которые используются в настоящее время при оптимизации батарей твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) планарной конструкции для стационарных и мобильных применений, в частности при разработке городских коммунальных электромобилей.

В результате обзора вышеперечисленных проектов мегагрантов по тематике ТОТЭ с привлечением ведущих зарубежных ученых можно сделать вывод, что не только достигнуты тематические цели представленных лабораторий, но и решены глобальные задачи: возрождение устойчивых связей с ведущими мировыми научными школами, а также привлечение и закрепление интереса молодых ученых к данной проблеме и после завершения проектов.

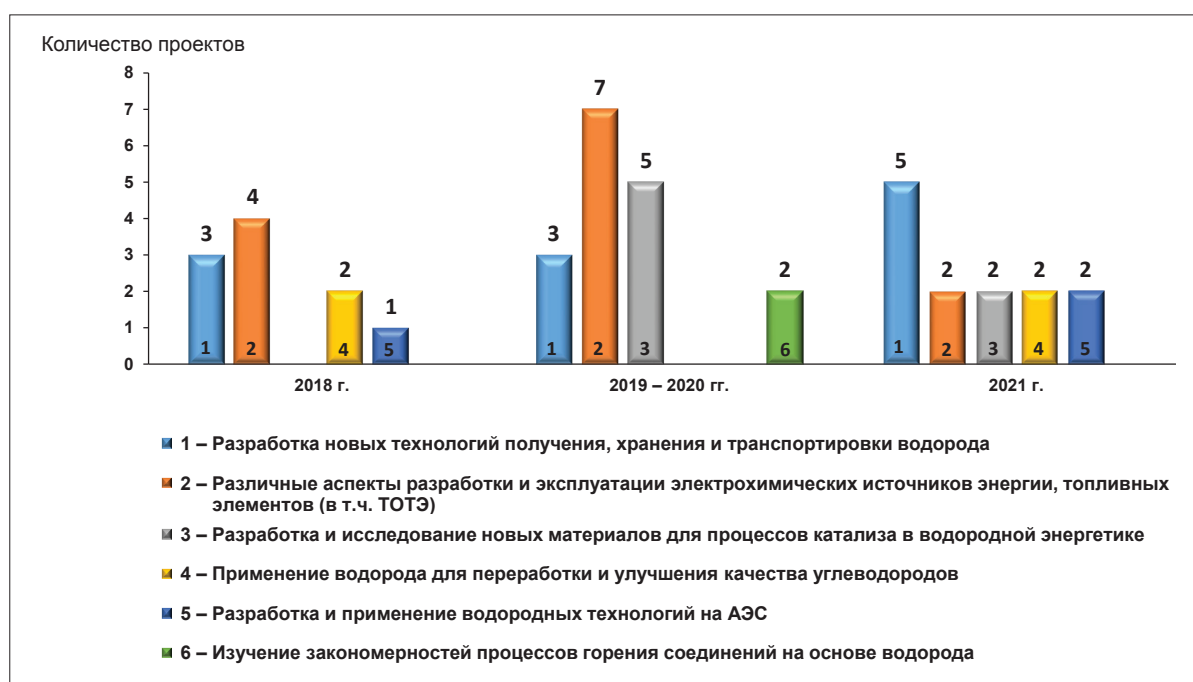
Анализ результатов конкурсных отборов в рамках таких инструментов государственной поддержки молодых российских ученых, как гранты и стипендии Президента РФ [22], показывает, что среди научных проектов – победителей конкурсов количество проектов по водородной энергетике в последние годы возрастает. Тематика исследований в целом отражает основные направления применения водородных технологий в России:

- разработка новых технологий получения, хранения и транспортировки водорода;
- различные аспекты разработки и эксплуатации электрохимических источников энергии, топливных элементов, в том числе ТОТЭ;
- разработка и исследование новых материалов для процессов катализа в водородной энергетике;
- применение водорода для переработки и улучшения качества углеводородов;

– разработка и применение водородных технологий на АЭС;  
 – изучение закономерностей процессов горения соединений на основе водорода (теоретические исследования).

Это подтверждают результаты конкурсов 2018–2021 гг., представленные на рис. 5 и в табл. 2. Для сравнения выбраны 2018 г., 2019–2020 гг. (в этот период сроки проведения конкурсов были изменены по причине ограничений из-за новой коронавирусной инфекции), 2021 г.

Можно отметить, что если в 2018–2020 гг. наибольшее количество проектов, получивших государственную поддержку, относится к области разработки и эксплуатации электрохимических источников энергии, топливных элементов (в том числе ТОТЭ), а также к связанной с ней тематике по разработке и исследованию новых материалов для процессов катализа в водородных технологиях, то в 2021 г. прослеживается тенденция к росту количества проектов – победителей конкурса как в области получения, хранения и транспортировки водорода, так и в области разработки и применения водородных технологий на АЭС, что соответствует поставленным в Концепции развития водородной энергетики в России задачам и направлениям исследований.



**Рис. 5. Динамика научных проектов молодых российских ученых по водородной тематике – победителей конкурсов на получение грантов и стипендий Президента РФ за период 2018–2021 гг.**

### Выводы

По результатам представленного обзора развития водородной энергетики в России можно сделать следующие выводы.

1. В связи с возрастающими глобальными климатическими проблемами, в том числе с проблемами выбросов парниковых газов, все больший интерес со стороны мирового сообщества вызывает замена традиционных природных энергоносителей возобновляемыми источниками энергии с низким содержанием углерода, в том числе водородом, что подразумевает постепенный переход к четвертому энергетическому укладу.



Таблица 2

**Научные проекты молодых российских ученых по водородной тематике – победители конкурсов на получение грантов и стипендий Президента РФ за период 2018–2021 гг.**

Тематика научных проектов – победителей конкурсов	2018 г.		2019–2020 гг.		2021 г.	
	Число проектов	Наименование организации	Число проектов	Наименование организации	Число проектов	Наименование организации
Разработка новых технологий получения, хранения и транспортировки водорода	3	ИПСМ РАН ИХС РАН ННТУ	3	ТГТУ НИУ МЭИ ННТУ	5	НГУ АлтГТУ КНИТУ ЮУрГУ Институт катализа СО РАН им. Борескова
Различные аспекты разработки и эксплуатации электрохимических источников энергии, топливных элементов (в том числе ТОТЭ)	4	ИОНХ РАН ФТИ РАН ИВТЭ УрО РАН КубГУ	7	ИФТТ РАН СПбГУ ННТУ ИВТЭ УрО РАН ИХТТМ СО РАН	2	СПбГУ МГУ им. Ломоносова
Разработка и исследование новых материалов для процессов катализа в водородной энергетике	–	–	5	ИГХТУ УрФУ Институт катализа за СО РАН им. Борескова ННТУ	2	РГУ нефти и газа (НИУ) им. Губкина ФИЦ КазНЦ РАН
Применение водорода для переработки и улучшения качества углеводородов	2	РГУ нефти и газа (НИУ) им. Губкина ТПУ	–	–	2	КФУ
Разработка и применение водородных технологий на АЭС	1	СНЦ РАН	–	–	2	НИЯУ «МИФИ» СНЦ РАН
Изучение закономерностей процессов горения соединений на основе водорода	–	–	2	СамГТУ	–	–
Общее число проектов	10	–	17	–	13	–

2. Несмотря на то что Россия способна полностью обеспечить свои потребности в электроэнергии за счет углеводородного сырья, водородная энергетика включена в Энергетическую стратегию России на период до 2035 года, ее развитие поддерживается государством. На сегодняшний день государственная политика в этой области определяется Концепцией развития водородной энергетике в Российской Федерации, ставшей основным документом, определяющим цели, задачи, стратегические инициативы и ключевые меры по развитию водородной энергетике в стране.

3. Одно из наиболее перспективных научных направлений в области науки и технологий по тематике водородной энергетике – разработка и коммерциализация технологий ТЭ, в частности способов накопления и преобразования энергии, в том числе с использованием водорода. Наиболее перспективными с точки зрения широкого практического применения являются ТОТЭ.

4. Подтверждением интереса ученых к тематике ТОТЭ является положительная динамика публикационной активности в этой области за период 1990–2020 гг., как по данным WoS, так и по данным Scopus. Однако в последнее десятилетие в европейских странах уровень публикационной активности ученых по тематике ТОТЭ замедляется, а в таких странах, как Китай, Индия, Иран, а также Россия, – возрастает. Так, Россия вошла в десятку стран-лидеров по данной тематике и занимает 7-е место (по данным Scopus) и 8-е место (по данным WoS). Мониторинг публикационной активности в разрезе организаций также показал, что российские организации широко представлены в рейтинге организаций, с которыми аффилированы ученые, публикующие результаты своих исследований по тематике ТОТЭ (как по данным WoS, так и по данным Scopus). Существенный вклад в развитие устойчивых связей с ведущими мировыми научными школами, а также в привлечение молодых ученых к тематике ТОТЭ внесли проекты мегагрантов. Научные проекты молодых российских ученых по водородной тематике отражают весь спектр основных направлений применения водородных технологий в России и получают государственную поддержку в виде стипендий и грантов Президента РФ.

5. Таким образом, Российская Федерация обладает значительными конкурентными преимуществами для производства и экспорта водорода – это и богатая история проведения исследований, и развитая научно-техническая база для внедрения и развития водородной инфраструктуры и водородной энергетике, научные и технические заделы в атомно-водородной энергетике, наличие значительного количества неиспользуемых резервных генерирующих мощностей для электролиза воды, и уже идущий процесс разработки и коммерциализации топливных элементов. Все это позволяет утверждать, что Россия способна занять лидирующие позиции в глобальном производстве водорода и поставок на рынок этого высокотехнологичного продукта, а водородная энергетика становится в России одним из национальных приоритетов.

*Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания на 2021 г. № 075-00907-21-03.*

### **Список литературы**

1. Межправительственная группа экспертов по изменению климата. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 15.10.2021).

2. Прогноз развития энергетике мира и России – 2019. URL: <https://www.eriras.ru/data/994/rus> (дата обращения: 15.10.2021).

3. Кузык Б.Н., Кушлин В.И., Яковец Ю.В. На пути к водородной энергетике. М.: Институт экономических стратегий, 2005. 160 с.

4. Заменит ли водород нефть и газ? URL: <https://scientificrussia.ru/interviews/zamenit-li-vodorod-nefti-gaz-intervyu-s-b-p-tarasovym> (дата обращения: 15.10.2021).

5. От водородной энергетики к водородной экономике. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/ot-vodorodnoj-energetiki-k-vodorodnoj-ekonomike> (дата обращения: 15.10.2021).
6. В России создан научный консорциум по развитию водородных технологий. URL: <https://ria.ru/20201113/tpu-1584487143.html> (дата обращения: 15.10.2021).
7. Доклад «Наше общее будущее», 1987 г. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/139811> (дата обращения: 15.10.2021).
8. Постановление Правительства РФ от 21.09.2019 № 1228 «О принятии Парижского соглашения». URL: <http://static.government.ru/media/files/10US0FqDc05omQ1VgnC8rfL6PbY69AvA.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
9. Международное энергетическое агентство. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-gross-electricity-production-by-source-2019> (дата обращения: 15.10.2021).
10. В атомно-водородной энергетике Россия может занять лидирующие позиции в мире. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/05/08/103488> (дата обращения: 15.10.2021).
11. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sfgFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
12. Распоряжение Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/7b9bstNfV640nCkkAzCRJ9N8k7uhW8mY.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
13. Путин поручил создать водородные автобусы. URL: <https://newdaynews.ru/moscow/712846.html> (дата обращения: 15.10.2021).
14. Распоряжение Правительства РФ от 05.08.2021 № 2161-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFnS1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
15. Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. URL: [https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT\\_ID=37358](https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=37358) (дата обращения: 15.10.2021).
16. Web of Science. URL: <http://apps.webofknowledge.com> (дата обращения: 05.08.2021).
17. Scopus. URL: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 15.10.2021).
18. Андриянов Н.И., Генералова С.В. Инновационные проекты в области твердооксидных топливных элементов: перспективы сотрудничества и коммерциализации // Международное сетевое издание «Союзконсалт». 2015. № 9/45 (сентябрь). С. 40–49.
19. Нобелевская премия мира. URL: <http://nobeliat.ru/laureat.php?id=221> (дата обращения: 15.10.2021).
20. Кризис 2010-х годов и Новая энергетическая цивилизация / под ред. В.В. Бушуева, М.Н. Муханова. М.: ИД «Энергия», 2013. 272 с.
21. Постановление Правительства РФ от 09.04.2010 № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные организации высшего образования, научные учреждения и государственные научные центры Российской Федерации». URL: <https://p220.ru/upload/iblock/8c0/8c03dbc2e0c687b9db408c8774b905f7.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).
22. Совет по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации. URL: <https://grants.extech.ru> (дата обращения: 15.10.2021).

## References

1. *Mezhpravitel'stvennaya grupa ekspertov po izmeneniyu klimata* [Intergovernmental Panel on Climate Change]. Available at: <https://www.ipcc.ch> (accessed: 15.10.2021).
2. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii – 2019* [Forecast of world and Russian energy development – 2019]. Available at: <https://www.eriras.ru/data/994/rus> (accessed: 15.10.2021).
3. Kuzyk B.N., Kushlin V.I., Yakovets Yu.V. (2005) *Na puti k vodorodnoy energetike* [On the way to hydrogen energy] *Institut ekonomicheskikh strategiy* [Institute of Economic Strategies]. Moscow. P. 160.
4. *Zamenit li vodorod neft' i gaz?* [Will hydrogen replace oil and gas?]. Available at: <https://scientificrussia.ru/interviews/zamenit-li-vodorod-neft-i-gaz-intervyu-s-b-p-tarasovym> (accessed: 15.10.2021).

5. *Ot vodorodnoy energetiki k vodorodnoy ekonomike* [From hydrogen energy to hydrogen economy]. Available at: <https://scientificrussia.ru/articles/ot-vodorodnoj-energetiki-k-vodorodnoj-ekonomike> (accessed: 15.10.2021).
6. *V Rossii sozdan nauchnyy konsortsiy po razvitiyu vodorodnykh tekhnologiy* [A scientific consortium for the development of hydrogen technologies has been established in Russia]. Available at: <https://ria.ru/20201113/tpu-1584487143.html> (accessed: 15.10.2021).
7. *Doklad «Nashe obshchee budushchee»* [Report «Our common future»]. 1987. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/139811> (accessed: 15.10.2021).
8. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21.09.2019 No 1228 «O prinyatii Parizhskogo soglasheniya»* [Decree of the Government of the Russian Federation]. No. 1228 dated 21.09.2019 «On the adoption of the Paris Agreement». Available at: <http://static.government.ru/media/files/10US0FqDc05omQ1VgnC8rfL6PbY69AvA.pdf> (accessed: 15.10.2021).
9. *Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo* [International Energy Agency]. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-gross-electricity-production-by-source-2019> (date of reference: 15.10.2021).
10. *V atomno-vodorodnoy energetike Rossiya mozhet zanyat' lideruyushchie pozitsii v mire* [In the atomic-hydrogen energy industry, Russia can take a leading position in the world]. Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/05/08/103488> (accessed: 15.10.2021).
11. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 No 1523-r* [Decree of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2020 No. 1523-r]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (accessed: 15.10.2021).
12. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 12.10.2020 No 2634-r* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2634-p of 12.10.2020]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7b9bstNfV640nCKkAzCRJ9N8k7uhW8mY.pdf> (accessed: 15.10.2021).
13. *Putin poruchil sozdat' vodorodnye avtobusy* [Putin instructed to create hydrogen buses]. Available at: <https://newdaynews.ru/moscow/712846.html> (accessed: 15.10.2021).
14. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 05.08.2021 No 2161-r* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2161-r dated 05.08.2021]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (accessed: 15.10.2021).
15. *Ofitsial'nyy sayt Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation]. Available at: [https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT\\_ID=37358](https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=37358) (accessed: 15.10.2021).
16. Web of Science. Available at: <http://apps.webofknowledge.com> (accessed: 05.08.2021).
17. Scopus. Available at: <https://www.scopus.com> (accessed: 15.10.2021).
18. Andriyanov N.I., Generalova S.V. (2015) *Innovatsionnye proekty v oblasti tverdotsidnykh toplivnykh elementov: perspektivy sotrudnichestva i kommersializatsii* [Innovative projects in the field of solid oxide fuel cells: prospects for cooperation and commercialization] *Mezhdunarodnoe setevoe izdanie «Soyuzkonsalt»* [The international online publication Soyuzconsult]. No. 9/45 (September). P. 40–49.
19. *Nobelevskaya premiya mira* [Nobel Peace Prize]. Available at: <http://nobeliat.ru/laureat.php?id=221> (accessed: 15.10.2021).
20. *Krizis 2010-kh godov i Novaya energeticheskaya tsivilizatsiya* [The crisis of the 2010s and the New Energy civilization] *Pod red. V.V. Bushueva, M.N. Mukhanova* [Edited by V.V. Bushuev, M.N. Mukhanova] ID «Energiya» [ID «Energy»]. (2013) Moscow. P. 272.
21. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 09.04.2010 No 220 «O merakh po privlecheniyu vedushchikh uchenykh v rossiyskie obrazovatel'nye organizatsii vysshego obrazovaniya, nauchnye uchrezhdeniya i gosudarstvennye nauchnye tsentry Rossiyskoy Federatsii»* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 220 dated 09.04.2010 «On Measures to Attract Leading Scientists to Russian Educational Institutions of Higher Education, Scientific Institutions and State Scientific Centers of the Russian Federation»]. Available at: <https://p220.ru/upload/iblock/8c0/8c03dbc2e0c687b9db408c8774b905f7.pdf> (accessed: 15.10.2021).
22. *Sovet po grantam Prezidenta Rossiyskoy Federatsii dlya gosudarstvennoy podderzhki molodykh rossiyskikh uchenykh i po gosudarstvennoy podderzhke vedushchikh nauchnykh shkol Rossiyskoy Federatsii* [The Council for Grants of the President of the Russian Federation for state support of Young Russian scientists and for state support of leading scientific schools of the Russian Federation]. Available at: <https://grants.extech.ru> (accessed: 15.10.2021).