

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФГБНУ «Научно-исследовательский институт –  
Республиканский исследовательский  
научно-консультационный центр экспертизы»

Приоритетное направление развития науки,  
технологий и техники  
«ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ,  
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

## ТВЕРДООКСИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПУТИ РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Подготовлен при финансовой поддержке  
Минобрнауки России.  
Использованы материалы, предоставленные  
экспертами Федерального реестра экспертов  
научно-технической сферы Минобрнауки России

МОСКВА 2015

**Ключевые слова:** топливные элементы, твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ), solid oxide fuel cell (SOFC), электроды ТОТЭ, батарея ТОТЭ, сборка ТОТЭ, гибридные энергоустановки, источники энергии распределенной энергетики, среднетемпературные ТОТЭ.

### **Аннотация**

*В обзоре приведены аналитические материалы по состоянию исследований и разработок в Российской Федерации и за рубежом в области твердооксидных топливных элементов. Изложены проблемы внедрения, пути их решения, перспективы развития и коммерциализации. Показаны варианты их будущего применения в различных областях энергетики, в том числе и в качестве источников распределенной генерации.*

### **Abstract**

*The overview provides analytical materials on the state of research and development in the Russian Federation and abroad in the field of solid oxide fuel cells (SOFC). The problems of implementation, their solutions, prospects of development and commercialization. The overview shows options for their future use in various fields of energy, including their use as sources of distributed generation.*

**Введение.** Очевидно, что потребности в энергии у человечества возрастают, а значит должно расти и её производство. Однако решить проблему только строительством атомных станций затруднительно, сжигать постоянно огромное количество органического топлива тоже невозможно по причине ограниченности его запасов, экологии и значительного износа оборудования ТЭЦ. Использование возобновляемых источников энергии также сопряжено с рядом проблем: КПД, особые требования к природным условиям, трудности при включении их в системы большой энергетики, ГЭС практически исчерпали природный ресурс. Перспективы термоядерной энергетики пока тоже туманны, как и 50 лет назад.

На современном этапе все усилия науки направлены на повышение энергоэффективности производства, передачи и использования энергии, а это возможно лишь при условии инновационного развития на основе достижений фундаментальной науки, создания и внедрения новых эффективных, более надежных и долговечных материалов, оборудования и технологий. У России, по мнению экспертов, есть 20% резерв увеличения количества энергии в случае реализации инновационных проектов в области сверхпроводников и умных сетей, накопителей энергии различных типов, водородной энергетики и топливных элементов.

Одним из перспективных направлений решения проблем обеспечения электрической энергией потребителей в различных, в том числе и сложных условиях, являются топливные элементы (ТЭ).

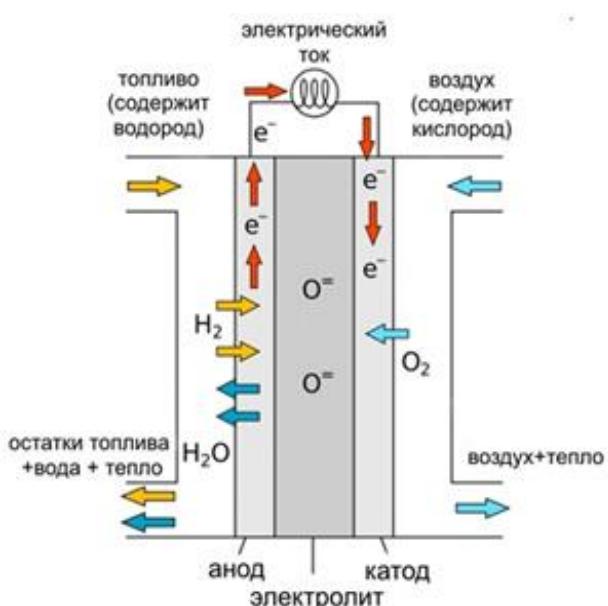
Область применения топливных элементов поистине огромна: замена элементов питания или аккумуляторов в портативных электронных устройствах, полная замена традиционного двигателя внутреннего сгорания или, по крайней мере, дополнение к нему в автомобилях, небольшие энергетические установки для обеспечения энергией и теплом жилых домов и, наконец, мегаваттные электростанции для крупномасштабного производства электроэнергии.

Разработки и внедрение технологий топливных элементов в России имеют крайне высокую важность для освоения удаленных районов Севера и Дальнего Востока (автономные источники питания для жилья и техники), расширения сети трубопроводов (станции катодной защиты), утилизации сопутствующих газов нефтяных месторождений и проектирования новых образцов техники (гибридная и распределенная генерация).

Общим преимуществом ТЭ перед другими преобразователями энергии является высокая эффективность, отсутствие движущихся, а значит и трущихся частей, тихая работа и практическое отсутствие вредных выбросов в окружающую среду.

## Топливные элементы.

Топливные элементы представляют собой устройства для превращения энергии топлива в электрическую энергию и частично в теплоту без вовлечения процесса его сжигания (Схема топливного элемента показана на рис.1).



### Рисунок 1 – Принципиальная схема топливного элемента

раторами. От электрических аккумуляторов топливные элементы отличаются тем что, они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника, при этом химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т.е. топливный элемент не нуждается в перезарядке. Существуют различные виды топливных элементов, ориентирован-

С упрощенной точки зрения их можно рассматривать как объединение в одном устройстве батареи (гальванического элемента), служащей для прямого превращения энергии химической реакции в электрическую энергию и теплового двигателя, нуждающегося в непрерывной подаче топлива и окислителя (воздуха). По этой причине топливные элементы иногда называют электрохимическими гене-

ных на определенное применение и изготавливаемых из соответствующих материалов, однако процесс получения энергии в них идентичен, а различия касаются материалов электродов и электролита (таблица 1). Химические реакции в ТЭ идут на пористых электродах, водород поступает на анод топливного элемента, где его атомы разлагаются на электроны и протоны, электроны поступают во внешнюю цепь, создавая электрический ток. Протоны, в свою очередь, проходят сквозь протонообменную мембрану на катодную сторону, где с ними соединяется кислород и электроны из внешней электрической цепи с образованием воды. Побочными продуктами реакции, таким образом, являются тепло и водяной пар.

Таблица 1 – Характеристики топливных элементов

Тип ТЭ	ТПТЭ (Твердо- полимерные)	ЩТЭ (Щелочные)	ФКТЭ (Фосфорно- кислотные)	КРТЭ (Карбонатно- расплавные)	ТОТЭ (Твердооксидные)
<b>Температура С°</b>	80 – 100	65 – 250	150 – 220	600 – 1000	600 – 1000
<b>Материал: анода</b>	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-Co/C, Pt-Pd/C	Pt/C, Pt-Ru/C	Ni-Al, Ni-Cr	Ni, NiO
<b>катода</b>	Pt/C	Ni (Pt)	Pt/C, Pt-WO <sub>3</sub> /C	LiFeO <sub>2</sub>	LaSrMnO <sub>3</sub>
<b>электролита</b>	Полимерная мембрана (иономер)	KOH/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>
<b>Диапазон мощностей</b>	0,01÷100кВт	~ 100кВт	~ 100кВт	≥ 1 МВт	≥ 1 МВт
<b>Ресурс, ч</b>	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>

**Твердополимерные топливные элементы** обладают высокой плотностью мощности и достигли наивысшей технологической готовности, однако стоимость высока в т.ч. из-за применения платины.

**Щелочные топливные элементы (ЩТЭ)** – получили широкое практическое применение в системах энергоснабжения пилотируемых космических кораблей. Одним из достоинств ЩТЭ является то, что в качестве топлива, эффективно окисляемого непосредственно на аноде ЩТЭ, может использоваться этанол (биоэтанол). Основными проблемами, сдерживающими коммерциализацию ЩТЭ, являются их низкие удельные характеристики и все

еще недостаточный ресурс функционирования, в том числе из-за вредного влияния примесей углекислого газа в воздухе и водороде.

**Фосфорно-кислотные топливные элементы (ФКТЭ)** – в них используются углеродные электроды, содержащие платину. Требуется осуществлять предварительно процесс риформинга топлива. Из всех известных типов топливных элементов ФКТЭ ближе всех к коммерческому использованию. ФКТЭ используются главным образом в стационарных электростанциях, а также устанавливаются на большие транспортные средства, такие как городские автобусы. Образцы показаны на рис. 2.



Рисунок 2 – Стационарные электростанции на топливных элементах.

Свыше 200 электростанций на базе ФКТЭ уже работают во всем мире, производя электричество, тепло и горячую воду. Наиболее известной является система ONSI PC25 фирмы UTC Fuel Cells. Самой большой электростанцией на топливных элементах, установленной к настоящему времени, является 11 мегаваттная станция на PAFC в Японии.

### **Расплавной карбонатный топливный элемент**

В настоящий момент разрабатываются расплавные карбонатные топливные элементы (РКТЭ) для газовых и угольных электростанций, коммунального, промышленного и военного применения. Поскольку РКТЭ более устойчивы к загрязнениям топлива, чем другие типы топливных элементов, ученые считают, что они смогут перерабатывать даже уголь, одно из наиболее «грязных» ископаемых топлив, в водород. При условии, что удастся придать устойчивость к таким примесям как сера и частицы, образующиеся при

переработке угля. Основным недостатком современных РКТЭ является их недолговечность. Высокие температуры и коррозийный электролит ускоряют износ и ржавление деталей оборудования, т.е. сокращают срок его службы. В данный момент ученые проводят испытание деталей из коррозионностойких материалов и конструкций топливного элемента, которые увеличивают срок службы, при этом не снижая производительность. Поскольку топливные элементы эксплуатируются при высоких температурах от 500°C до 650°C и выше, в качестве катализаторов на стороне анода и катода могут использоваться недрагоценные металлы. Таким образом снижаются затраты. РКТЭ не подвержены «отравлению» угарным или углекислым газом, могут использовать углекислый газ в качестве топлива, что делает их более пригодными для утилизации шахтного газа.

**Твердооксидные топливные элементы** – это наиболее перспективный тип источников энергии данного вида. Преимущества твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) в том, что они не нуждаются в дорогом катализаторе (платине) и могут работать на многих видах топлива.

На рисунке 3 показана эффективность применения различных топливных элементов в широком диапазоне мощностей от кВт до ГВт.

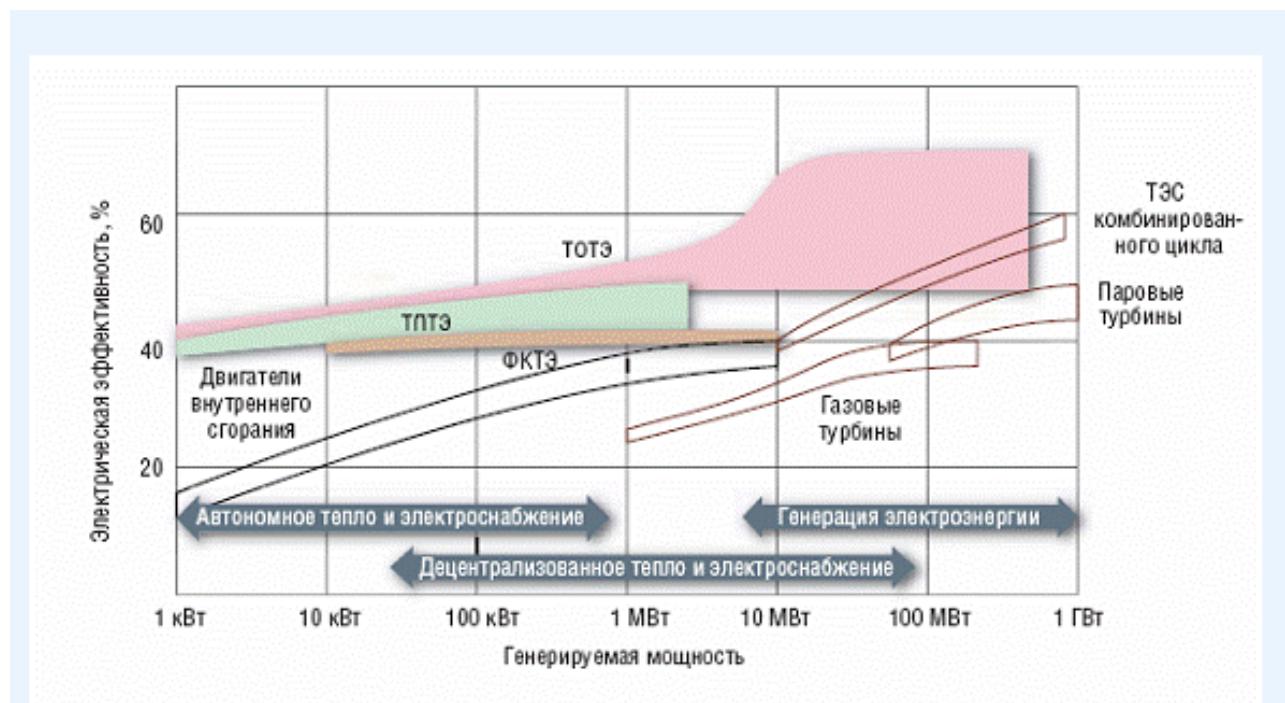


Рисунок 3 - Области применения различных типов топливных элементов

На рисунке видно, что 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  $\text{CO}_2$ , т.к. более высокая температура работы ТОТЭ позволяет утилизировать высокопотенциальное тепло в газотурбинном цикле с большей эффективностью. Кроме того, перспективно их использования в установках для децентрализованного энергоснабжения широкого диапазона мощностей.

На рисунке 4 показаны преимущества процесса получения электроэнергии с использованием ТОТЭ по таким параметрам как КПД, качество топлива, экологичность, уровень шума.

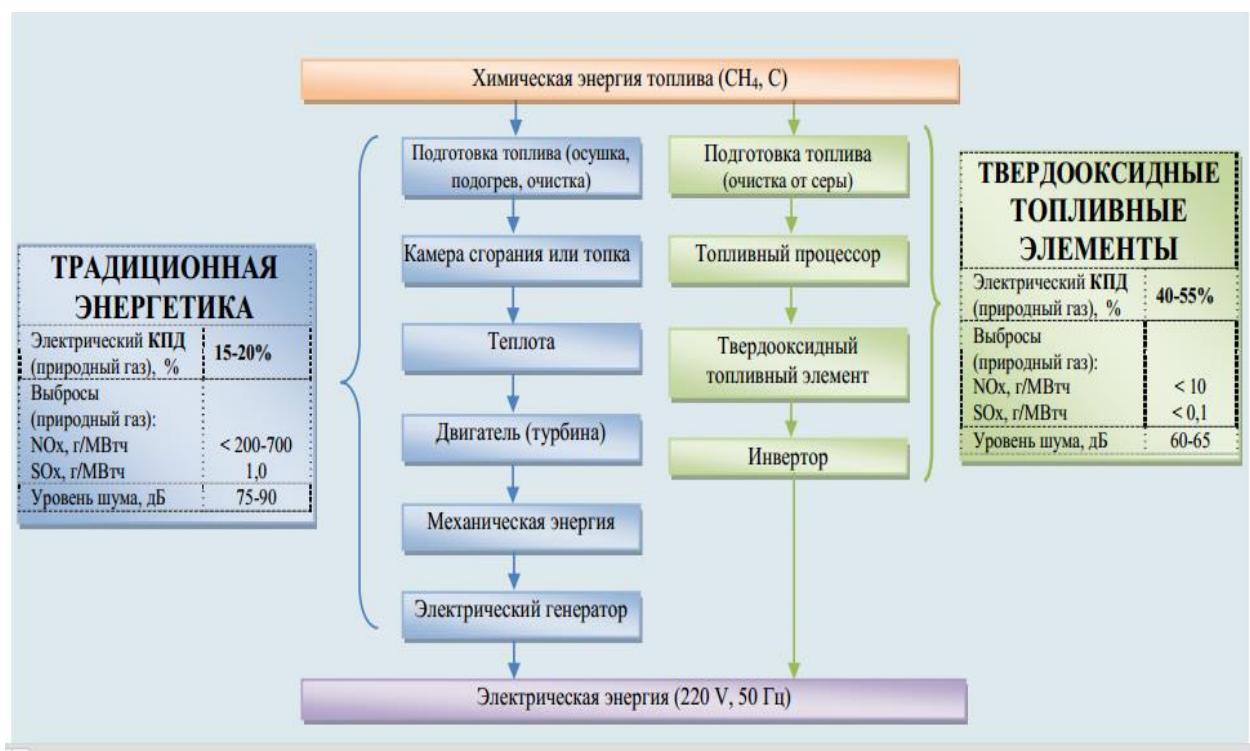


Рисунок 4 - Сравнение преобразования энергии топлива в электрическую энергию с применением ТОТЭ.

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 электрохими-

ческих генераторов на кислород-ионных электролитах достигает 60 %, то с применением протонных электролитов можно получить и 80 %.

TOTЭ значительно более **устойчив к загрязнениям топлива** и универсален по отношению к типам используемых горючих газов по сравнению с другими типами топливных элементов. Огромным преимуществом энергостановок на TOTЭ является то, что исходным топливом для них может служить все, что угодно: природный газ, метан, бутан, пропан, бензин, дизельное топливо, уголь, спирты, а также древесина, торф, стружка, отходы сельхозпроизводства. В топливном процессоре это сырье подвергается конверсии, то есть газификации. В результате образуется водородсодержащий горючий газ, который и подается в батарею генератора.

Преимуществом топливных элементов является также их **экологическая чистота**, так как продуктом сгорания в них является обычная вода. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ при эксплуатации топливных элементов настолько низки, что в некоторых районах США для их эксплуатации не требуется специального разрешения от государственных органов, контролирующих качество воздушной среды.

**Модульность конструкции**, позволяет варьировать производительность ЭХГ. мощность топливных элементов может быть увеличена простым добавлением отдельных блоков, при этом КПД не меняется, т. е. большие установки столь же эффективны, как и малые. Эти обстоятельства позволяют очень гибко подбирать состав оборудования в соответствии с пожеланиями заказчика и в конечном итоге приводят к снижению затрат на оборудование.

Основными трудностями технологий TOTЭ в настоящее время являются высокая стоимость и низкий ресурс батарей топливных элементов. На решении этих проблем в настоящее время сосредоточены большие исследовательские усилия по всему миру, направленные на совершенствование производства наноструктур электродно-электролитной сборки и разработку наиболее рациональных конструкций TOTЭ. Кроме государственных организаций,

исследования поддерживают крупные производители энергооборудования (Siemens, General Electric, Mitsubishi, и др.).

Странами-лидерами в этих работах являются США, Евросоюз и Япония. В каждой из этих стран есть система мощной государственной поддержки этих исследований: SECA в США; Real-SOFC, Flame-SOFC, LargeSOFC и др. в ЕС, NEDO в Японии.

В США при поддержке правительства сформировался альянс Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) для реализации программы, которая включала проекты, разрабатываемые конкурирующими промышленными командами. Сейчас работы находятся на этапе коммерциализации, где предлагаются оборудование на ТОТЭ. Delphi представили маленькие компактные (2,5 л, 9 кг) генераторы на ТОТЭ, которые могут быть использованы для различных транспортных средств или малоэтажных построек. Компания FuelCellEnergy сосредоточена на силовых установках на ТОТЭ для морских

судов. Siemens имеет широкий ряд генераторов на ТОТЭ (рис. 5). Это установки от 5 кВт до 300 кВт (гибрид с газовой турбиной). Есть наработки и у фирмы Acumentrics.



Рисунок 5 Гибридная установка

Кроме того, ТОТЭ разрабатывают и готовят к коммерциализации более сотни компаний Европы, Азии, Австралии, Канады и т.д. (рис. 6).

С экономической и социальной точек зрения развивающийся рынок топливных элементов является одним из самых динамичных и потенциально позволит обеспечить решение многих социальных проблем. По оценкам Pricewaterhouse Coopers, глобальный спрос на все виды топливных элементов достигнет 2,5 трлн. долл. к 2021



Рисунок 6 Генератор на ТОТЭ в Канаде

году. В России перспективный спрос на энергоустановки на основе ТОТЭ оценивается в крайне широких пределах, от 7 до 160 ГВт.

**Наметившиеся тенденции использования твердооксидных топливных элементов.** Выделим три основных направления использования ТОТЭ.

**Гибридные энергоустановки**, полученные объединением высокотемпературных топливных элементов и газотурбинной установки или парогазовой установки.

Большая часть электроэнергии сейчас вырабатывается путём преобразования части тепла, получаемого при сжигании ископаемых видов топлива – угля, природного газа, нефтепродуктов. Получается не очень эффективно и порой не очень экологично. Между тем использование гибридных электростанций с топливными элементами способны и повысить КПД, и улучшить экологические параметры, и значительно сэкономить топливо.

На рисунке 7 показан принцип действия гибридной установки. В гибридной энергоустановке теплота отработавших газов топливного элемента используется в цикле газотурбинной или парогазовой установок. Более высокая температура работы ТОТЭ позволяет утилизировать высокопотенциальное тепло в газотурбинном цикле с большей эффективностью. Известно, что тепловые электростанции рассчитаны на равномерную сезонную и суточную нагрузки, что в реальности неосуществимо и ведет к энергопотерям и сокращению срока службы электростанций. Добавляя в цепь производства энергии такой электростанции ТОТЭ, получаем электрическую энергию в результате работы топливного элемента, а кроме того, горячие продукты реакции возвращаются на турбину, увеличивая тем самым её производительность.

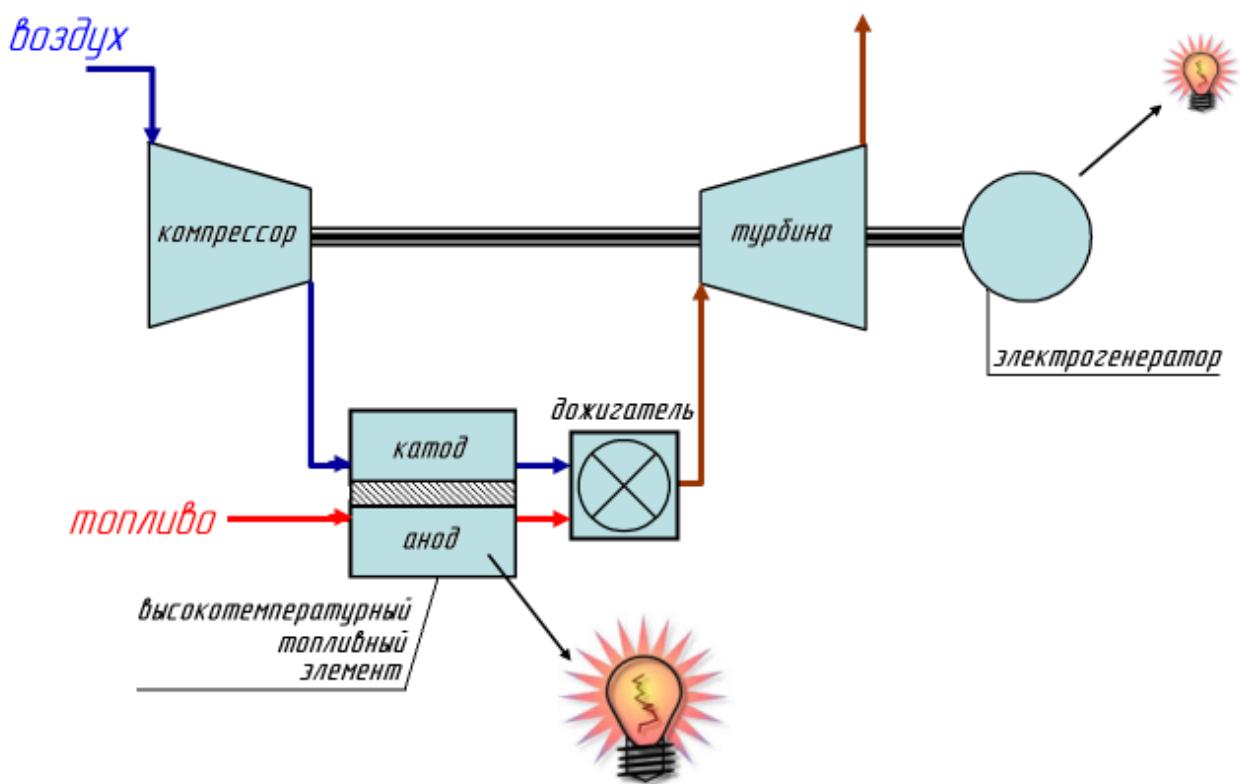


Рисунок 7 – Принцип действия гибридной установки с ТОТЭ

В перспективе рассматривается вопрос применения ТЭ с атомными реакторами в единый силовой агрегат. Технологии ТЭ обеспечивают накопление топливных газов и их использование при оптимизации глобальных энергетических систем с несогласованными временами пикового производства и потребления электроэнергии.

Практически на всех атомных энергоблоках мира по рекомендации МАГАТЭ уже 10 лет как установлены, пассивные системы защиты – рекомбинаторы водорода, устроенные по принципу ТЭ. Система состоит из алюминиевых стержней, покрытых мелкокристаллической платиной (катализатор). Как только пары водорода попадают в трубы рекомбинатора, они мгновенно соединяются с молекулами кислорода воздуха с образованием воды. В результате окисления идет нагрев кожуха, где находятся трубы и циркуляция воздуха в них усиливается и таким образом получается система с положительной обратной связью, чем больше водорода, тем больше циркуляция, тем больше его система рекомбинирует. На Фукусиме этой системы не было, а энергоблоки были разрушены в результате взрыва водорода.

**Второе направление** – использование ТОТЭ в качестве источников энергии в распределенной энергетике.

ТОТЭ могут встраиваться не только в текущие системы энергоснабжения на основе ископаемых видов топлива, но и систем, на основе возобновляемых, экологически чистых газообразных и жидких топлив. Дальнейшее увеличение эффективности может быть достигнуто при их использовании в сочетании с газовыми турбинами в системах когенерации электричества и тепловой энергии.

Необходимо отметить, что технологии ТОТЭ могут быть легко адаптированы для обеспечения обратимости электрохимических процессов, т.е. электролиза водяного пара и диоксида углерода в режиме накопления (пик производства системы) и генерации электроэнергии в пиковом режиме потребления системы. Действительно, в некоторых типах топливных элементов процесс может быть обращен – приложив к электродам напряжение, можно разложить воду на водород и кислород, которые могут быть собраны на электродах. Если прекратить зарядку элемента и подключить к нему нагрузку, такой регенеративный топливный элемент сразу начнет работать в своем нормальном режиме. Это позволяет применение ТОТЭ в сочетании с другими типами возобновляемых источников энергии, в частности ветряными генераторами и солнечными батареями.

Топливные элементы можно размещать непосредственно в здании, при этом снижаются потери при транспортировке энергии, а тепло, образующееся в результате реакции, можно использовать для теплоснабжения или горячего водоснабжения здания. Автономные источники тепло- и электроснабжения могут быть очень выгодны в отдаленных районах и в регионах, для которых характерна нехватка электроэнергии и ее высокая стоимость, но в тоже время имеются запасы водородосодержащего сырья (нефти, природного газа).

**Третье направление:** снижение рабочей температуры ТОТЭ при сохранении всех преимуществ, обусловленных высокой температурой их рабо-

ты. В последнее время существует мировой тренд на понижение рабочей температуры ТОТЭ вплоть до 500°С. Твердооксидные топливные элементы с рабочим диапазоном температур 500-700°С получили название среднетемпературные (СТ) ТОТЭ, которые ориентированы на локальное использование в переносных устройствах, автомобилях (в качестве основного или вспомогательного двигателя) и на обеспечение теплом и электроэнергией отдельных помещений.

Понижение рабочей температуры при использовании среднетемпературных ТОТЭ существенно расширяет возможный круг используемых материалов для изготовления различных компонентов. С понижением температуры делается возможным быстрый запуск и выключение ТОТЭ, что принципиально важно для использования в автомобилях. Понижение рабочей температуры ТОТЭ значительно уменьшает коррозию металлических и деградацию керамических компонентов, существенно повышает срок службы топливного элемента, что в, конечном итоге, позволяет добиться существенного удешевления стоимости производимой электроэнергии. Именно высокая стоимость производимой ТОТЭ электроэнергии является основным фактором, ограничивающим широкое коммерческое распространение этих устройств.

Важно отметить, что среднетемпературные ТОТЭ, в отличие от низкотемпературных топливных элементов, допускают использование в качестве топлива природных углеводородов, которые в процессе, так называемого, внутреннего реформинга превращаются вmonoоксид углерода и водород непосредственно внутри топливного элемента. Это обстоятельство делает среднетемпературные ТОТЭ особенно привлекательными в отсутствие развитой водородной инфраструктуры.

Основным направлением разработок, позволяющим понизить рабочую температуру ТОТЭ без понижения эффективности, является научно обоснованный подбор материалов электролита с достаточно высокой кислород-

ионной проводимостью при пониженной температуре и электродов (катода и анода) с приемлемыми эксплуатационными характеристиками.

## **Положение дел в области исследований и производства ТОТЭ в России.**

В 2005 г. в РФЯЦ ВНИИТФ (Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск) был изготовлен модуль батарей ТОТЭ мощностью 2 кВт и 1 кВт генератор для систем катодной защиты газопроводов. В 2009 г. РФЯЦ провел испытания энергоустановки на ТОТЭ. Генератор вырабатывал электричество в течение 8800 часов, чем подтвердил гарантированный срок службы.

В ноябре 2009 г. МРСК Урала провела конкурс инновационных проектов в сфере энергосбережения. Одним из победителей стал проект Уральского Отделения РАН и ООО «Центр промышленных нанотехнологий» (Екатеринбург), суть которого в создании производства энергосберегающих установок на базе ТОТЭ. Такие генераторы предлагается ставить в каждом жилом доме, и вместо электричества использовать уже подведенный к дому газ (по оценкам Института электрофизики УрО РАН, траты на передачу газа по трубопроводам в 4-5 раз меньше, чем при передаче электроэнергии). Таким образом, будет реализована идея распределенной системы электрообеспечения.

В ЦКБ «Рубин» готов проект малой подводной лодки «Амур-950» с воздухонезависимой энергетической установкой (ВНЭУ) на базе топливных элементов отечественного производства. 50-метровая субмарина может погружаться на глубину до 300 метров и находиться там на протяжении двух недель, оставаясь практически невидимой и неслышимой. Уровень ее акустического поля в несколько раз ниже, чем у лодок подобного класса. Энергетическая мощность «рубиновской» установки существенно выше зарубежных аналогов (схожие проекты есть в Германии, Швеции и Франции) – 400 кВт против 180 кВт. При этом она проще, дешевле и безопаснее для экипажа.

ВНУЭ позволяет обойтись без резервуаров с чистым водородом, поскольку он вырабатывается непосредственно из дизельного топлива и тут же на борту утилизируется.

Филиалом «Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии» («ЦНИИ СЭТ») ФГУП «Крыловский государственный научный центр» впервые в мировой и отечественной практике был предложен и реализован ряд технических решений, часть из которых защищена авторскими свидетельствами и патентами:

- совместно с ИВТЭ УрО РАН всесторонне испытан макетный образец сборки ТОТЭ мощностью до 1 кВт;
- предложена концепция комбинированной ЭУ, включающей помимо ТОТЭ турбогенератор и утилизационный теплообменник.

В 2013 г. В ИВТЭ УрО РАН разработан, а на ООО «Завод электрохимических преобразователей» (г. Новоуральск) изготовлен эксперименталь-



Рисунок 8 Экспериментальный образец автономной энергоустановки на ТОТЭ

ный образец автономной энергоустановки для электропитания станций катодной защиты магистральных газопроводов (Рис. 8). Энергоустановка востребована во многих отраслях народного хозяйства и специальных приложениях.

Из приведенных примеров видно, что макетные образцы находятся на уровне мировых стандартов, а некоторые даже его превосходят.

В программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы значится разработка электрохимических генераторов большой мощности на основе твердооксидных

топливных элементов и разработка технологий портативных источников тока на топливных элементах с твердополимерной мембраной, а также создание высокоэффективных мембранных материалов: керамических ионно-транспортных материалов, неорганических материалов на основе систем с контролируемой пористостью, мембран на основе органических и полимерных систем, в том числе для топливных элементов.

Также два проекта разработки энергоустановок с использованием топливных элементов включил в свою среднесрочную целевую программу Фонд поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности «Энергия без границ». Первый из них – «Создание высокоэффективных экологически чистых гибридных ПГУ на природном газе на базе твёрдооксидных топливных элементов» направлен на разработку гибридных станций класса электрической мощности от сотен киловатт до десятков мегаватт. Другой – «Создание экспериментального образца биоэнергетического модуля на базе высокотемпературного топливного элемента электрической мощностью 5 кВт» – ставит целью разработку малых комбинированных электрогенерирующих блоков (биореактор для получения топлива, многотопливный мембранны-катализитический конвертор для преобразования различных видов биоэнергоносителей в синтез-газ, топливный элемент и микротурбина), использующих в качестве топлива биогаз и биоэтанол. Такие установки смогут обеспечивать электроэнергией и теплом удалённые посёлки и предприятия АПК.

В Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН в лаборатории твердооксидных топливных элементов к 2014 году разработаны, изготовлены и испытаны макеты электрохимических генераторов на твердооксидных топливных элементах мощностью 100, 200, 300 и 1500 Вт.

В этом же институте в рамках «Программы мегагрантов» создана лаборатория Электрохимических устройств на твердооксидных протонных проводниках под руководством Циакараса Панайотиса, где реализуется

проект по получению твердооксидных электрохимических ячеек с несущим и тонкослойным протонным электролитом для электрохимических устройств.

В рамках «Программы мегагрантов» в области ТОТЭ в России работают ещё 3 лаборатории:

В институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН лаборатория Новых энергетических технологий и энергоносителей под руководством Йошиюки Кавазое занимается подготовкой высококвалифицированных кадров для перспективных областей новых энергетических технологий и разработкой топливных элементов на полимерных электролитных мембранах с новым типом мембран и алюминий-воздушных топливных элементов.

А в Томском политехническом университете в Международной научно-образовательной лаборатории технологии водородной энергетики под руководством Торстейнна Сигфуссона изготовлено пучково-плазменное оборудование с программным обеспечением для производства многослойных структур ячеек твердооксидных топливных элементов. Максимальная плотность мощности изготовленных с применением вышеуказанных методов топливных ячеек при температуре 650°C составила 200-250 мВт/см<sup>2</sup>. Это в несколько раз превышает значения плотности мощности, характерной для топливных элементов с несущим электролитом в данных условиях. А так же изготовлен стенд для производства и исследования многослойных структур топливных ячеек и батарей твердооксидных топливных элементов. Стенд и пучково-плазменное оборудование готово к коммерческой реализации.

Основной тематикой лаборатории Материалов для электрохимических технологий Института физики твердого тела РАН, руководимой Владиславом Хартоном, является разработка новых материалов и технологий твердооксидных топливных элементов, керамических мембран и высокотемпературных электролизеров газов.

**Анализ публикационной активности** проведен по базе данных Scopus. Распределение публикаций по годам в мире представлено на рисунке 9.

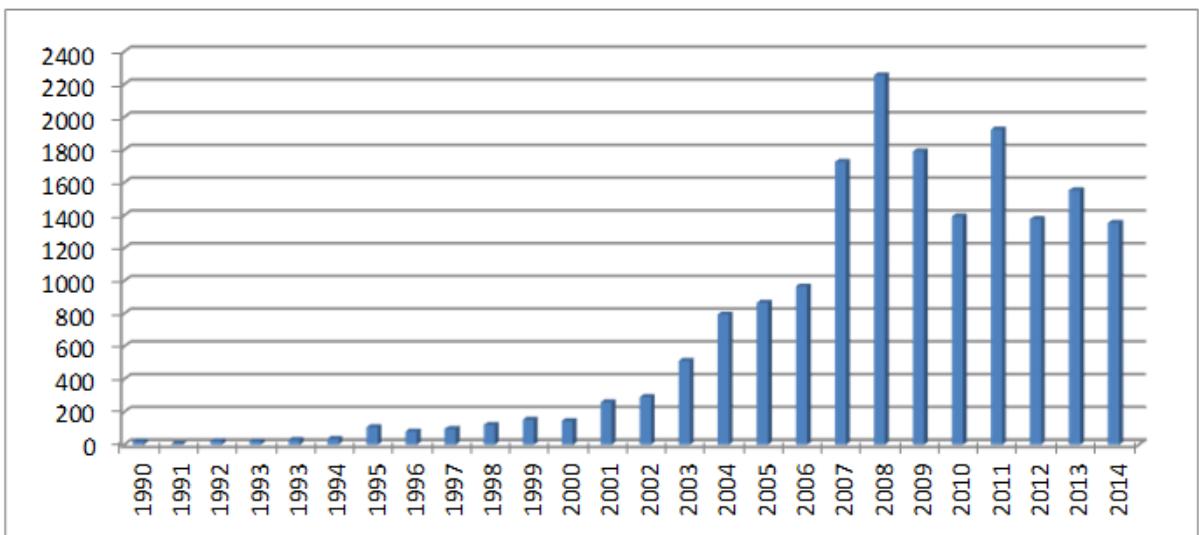


Рисунок 9 – Распределение публикаций по годам с упоминанием в заголовке, реферате и ключевых словах «твердооксидный топливный элемент (SOFC)».

За период с 1990 г. по настоящее время найдено 16945 публикаций, в названиях которых, в аннотациях и ключевых словах упоминается «твердооксидные топливные элементы (SOFC)». Россия, в списке количества публикаций по данной тематике, занимает только 22 место, а Институт катализа им. Борескова СО РАН, у которого наибольшее количество статей из российских организаций – 33 место среди организаций, занимающихся исследованиями и разработками в области ТОТЭ. Следует, однако, отметить, что далеко не всегда научные группы, глубоко и систематически занимающиеся фундаментальными исследованиями материалов, потенциально перспективных для использования в качестве материалов для топливных элементов, выносят в название статей, реферат и ключевые слова эти термины. Например, поиск с использованием ключевых слов «дефектная структура сложных оксидов» (именно она во многом и определяет целевые функциональные свойства материалов) привел к тому, что в списке стран лидирующих по числу публикаций Россия занимает 7 место, а с использованием словосочетания «фазовые равновесия в оксидных системах» – 3 место. При этом Российские учреждения в этих списках более многочисленны и заметны. Так при поиске по ключевым словам «фазовые равновесия в оксидных системах» количество работ ученых Уральского федерального университета на 12 позиции,

Московского государственного университета на 13 месте. При поиске по ключевым словам «дефектная структура сложных оксидов» Российские учреждения занимают лидирующие позиции – МГУ делит первое место с суммарным количеством работ институтов РАН и Pacific Northwest National Laboratory, США (по 10 публикаций). Несколько меньшее число работ принадлежит ученым Уральского федерального университета и Института катализа им. Борескова СО РАН (по 6).

Первичный **патентный поиск** на ретроспективе 1990-2010 гг. проводился по электронным базам патентных документов Роспатента и по электронным базам патентных документов национальных и международных патентных ведомств, находящимся в открытом доступе через Интернет, в частности, на сайтах Европейского патентного ведомства, Всемирной организации интеллектуальной собственности и Американского патентного ведомства. Просмотрены рефераты около двух сотен документов, для дальнейшего анализа было отобрано 40 патентных документов, направленных на решение задач, связанных с разработкой состава и методов получения материалов для ТОТЭ и разработкой конструкций и способов производства ТОТЭ. Из результатов анализа видно, что с 2002 г. изобретательская активность резко увеличивается, наблюдаемый пик активности приходится на 2009 г. Определено, что лидерами по числу выданных патентов и числу патентообладателей являются США и Япония.

Исходя из перечня исследований и работ, проводимых в России в области ТОТЭ, материалов библиометрии и патентного поиска, а также разработок, выполненных российскими организациями, следует констатировать, что Россия, к сожалению пока не может конкурировать в сфере коммерциализации топливных элементов с государствами-лидерами в этой области, хотя научные разработки российских ученых, по крайней мере, в сфере фундаментальных подходов не уступают ведущим зарубежным.

**Заключение.** В последние годы наметился существенный прогресс в коммерциализации технологий ТОТЭ, проявившийся в появлении на рынках коммерческих ЭХГ в разных диапазонах мощности. Развитие технологий ТОТЭ связано, в первую очередь, с возможностью внедрения экологически чистых и более эффективных систем генерации электроэнергии.

Решение проблем снижения стоимости и увеличения ресурса работы осуществляется за счет совершенствования материалов и технологий производства ТОТЭ.

Реализованные технологические возможности в области керамических технологий и высокотемпературной электрохимии оксидных материалов позволили понизить область рабочих температур ТОТЭ и достичь значительных значений удельной мощности.

Продолжающиеся исследования в области научно-технологического развития направлены также на повышение удельной мощности ТОТЭ, их ресурса работы и универсальности по отношению к разным типам топлива путем внедрения новых электродных материалов, увеличения электрохимической активности электродов, снижения толщины твердоэлектролитных мембран, совершенствования технологий производства ТОТЭ, а так же снижения рабочей температуры с целью подавления деградации и увеличения ресурса.

В различных лабораториях мира ведется поиск новых твердых электролитов и разработка экономически доступных пленочных технологий с целью дальнейшего увеличения эффективности ТОТЭ. Совершенствование технологий производства твердоэлектролитных мембран с целью снижения их электрического сопротивления.

Рассматриваются направления расширения ареала ТОТЭ, для их использования в различных областях: от миниатюризованных ТОТЭ малой мощности для применения в электронной технике до стрессо-устойчивых батарей ТОТЭ для транспорта и спецприменений.