

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Романов И.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru*

В статье рассмотрена история развития и современное состояние разработок энергетических установок на основе твердооксидных топливных элементов. Твердооксидные топливные элементы имеют высокий коэффициент полезного действия прямого преобразования химической энергии топлива в электричество. В качестве топлива твердооксидные топливные элементы могут использовать любые углеводороды: природные топлива (уголь, нефть, газ), продукты технической деятельности человека, отходы промышленного производства, сельского хозяйства. При этом электрохимическое, низкотемпературное сжигание топлива повышает экологичность процесса. Одной из актуальных задач применения топливных элементов является создание воздухо-независимой энергетической установки для подводных объектов, как обитаемых подводных лодок так и необитаемых аппаратов. Приведены примеры государственной поддержки научных исследований в области твердооксидных топливных элементов, а также компании проводящие данные исследования.

Ключевые слова: энергетическая установка, твердооксидный топливный элемент, воздухо-независимая энергетическая установка

DEVELOPMENT OF POWER STATIONS ON THE BASIS OF SOLID OXIDE FUEL ELEMENTS

Romanov I.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru*

In article the history of development and a current state of development of power stations on the basis of solid oxide fuel elements is considered. Solid oxide fuel elements have high efficiency of direct transformation of chemical energy of fuel to electricity. As fuel solid oxide fuel elements can use any hydrocarbons: natural fuels (coal, oil, gas), products of technical activity of the person, waste of industrial production, agriculture. Thus electrochemical, low-temperature burning of fuel increases environmental friendliness of process. One of actual problems of application of fuel elements is creation of the airindependent power station for underwater objects, as manned submarines and uninhabited devices. Examples of the state support of scientific researches in the field of solid oxide fuel elements, and also the companies the conducting these researches are given. Keywords: power station, solid oxide fuel elements, airindependent power station

Keywords: power station, solid oxide fuel elements, airindependent power station

Первый топливный элемент был создан в 1838–1845 году Кристианом Фридрихом Шенбайном и Уильямом Робертом Гроувом. Примерно с того же времени известен двигатель внутреннего сгорания изобретенный Николаусом Отто, газовая турбина была изобретена Джоном Барбером еще в 1791 году. Однако до настоящего времени распространение топливных элементов незначительно по сравнению с тепловыми двигателями. Прорыв был достигнут в 50 – 60 годах 20 века, когда активно стали развиваться топливные элементы для использования в космических программах. Первым подводным аппаратом на топливных элементах стал созданный в 1974 году «Deep Quest».

Существуют несколько основных типов топливных элементов: с протонообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells); на основе ортофосфорной / фосфорной кислоты (Phosphoric Acid Fuel Cells); на основе расплавленного карбоната лития и натрия (Molten Carbonate Fuel Cells); с твердооксидным керамическим электролитом (Solid Oxide Fuel Cells / SOFC); щелочные (Alkaline Fuel Cells); с прямым окислением метанола (Direct Methanol Fuel Cells); с прямым окислением этанола (Direct Ethanol Fuel Cells); воздушно-цинковый ТЭ (Zinc-Air Fuel Cells) и др.

Одним из наиболее актуальных, перспективных, однако и сложных является SOFC. Комплексное использование химической и тепловой энергий в данных энергоустановках позволяют получать КПД до 85–90%. SOFC элементы работают при температурах 650–1000 °С, причем могут использовать любое углеводородное топливо преобразованное в синтез-газ (H_2 – CO) (бензин, дизельное топливо и природный газ, биотопливо, торф, продукты переработки отходов и водород). Уменьшенные требования к чистоте используемого топлива является одним из важных преимуществ SOFC по сравнению с другими типами топливных элементов. Кроме того, за счет высокой температуры, скорость протекания электродных реакций достаточно высока и не требуется использование дорогостоящих катализаторов.

В настоящее время наиболее часто используемыми материалами для SOFC являются кислород проводящий диоксид циркония, стабилизированный иттрием (YSZ) – электролит, манганит лантана-стронция (LSM) – катод, никелевый кермет (Ni+YSZ) – анод и хромит лантана, допированный стронцием или кальцием (LSC или LCC), – керамический токопровод. В планарных конструкциях в последнее время все чаще используют металлический токопровод, как правило, из хромистой стали [1].

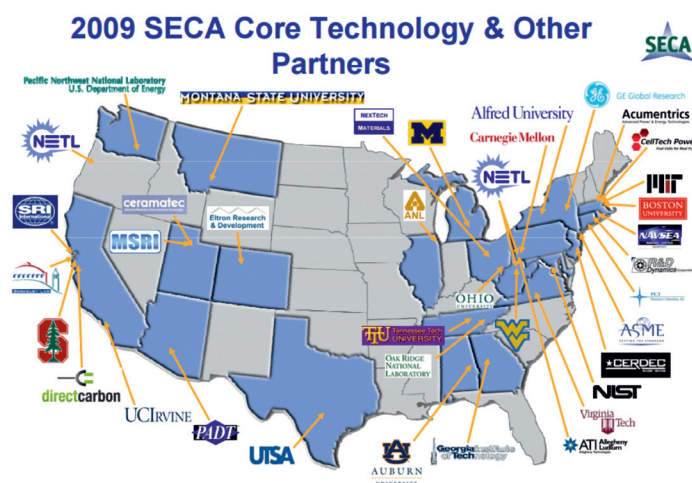
По исполнению функции механической прочности SOFC делятся на элементы с несущим электролитом, с несущим катодом, с несущим анодом, с несущей керамической высокопористой основой, с несущим металлическим высокопористым токовым коллектором. В последнее время для увеличения компактности появились конструкции элементов с несущими обоими электродами.

Поскольку все компоненты SOFC находятся в твердом состоянии, конструкции самих элементов и устройств из них имеют большое разнообразие. До 80-90х годов прошлого века их можно было разделить на три группы: трубчатые, планарные и блочные. Позднее стали появляться конструкции элементов объединяющие положительные свойства трубчатой и планарной, трубчатой и блочной. Преимущество твердого состояния единичного элемента приводит не только к многообразию его конструкций, но и к многообразию конструкций стеков батарей и энергоустановок. ЭХГ генераторы на SOFC могут быть изготовлены в широком диапазоне мощностей для использования в широком спектре приложений.

В конце 1950-х начале 1960-х годов исследователи по всему миру начали работы по изучению процессов и разработ-

ке высокотемпературных твердооксидных устройств с твердым оксидным электролитом. Сегодня известно, что значительное число малых и крупных компаний США, Европы, Японии, Азии и Австралии находятся в стадии подготовки промышленного производства энергоустановок на SOFC различного назначения, например Siemens, United Technologies, Delphi, Rolls-Royce, Honda, Ceres Power, FuelCell Energy, NexTech Materials, CeramTec, Fuel Cell Materials и др. Странами-лидерами в этих работах являются США, Евросоюз и Япония. В каждой из этих стран есть система государственной поддержки данных исследований например: SECA в США; Real-SOFC, Flame-SOFC, LargeSOFC и др. в ЕС, NEDO в Японии.

Примером активной государственной политики в коммерциализации твердооксидных генераторов на SOFC являются США, где при поддержке правительства сформировался альянс Solid State Energy Conversion Alliance (SECA). Целью программы является разработка и промышленный выпуск энергосистем на SOFC с удельной мощностью не менее 400 мВт/см², деградацией характеристик менее 1 % и стоимостью не более \$400/кВт. Также одна из целей SECA в области систем на угле была разработка больших (более 100 мегаватт) энергосистем интегрированных с газификацией угля. Первоначально SECA включала шесть проектов SOFC наиболее близких к коммерциализации, разрабатываемых конкурирующими промышленными командами: Cummins-SOFCo, Delphi-Battelle, General Electric, Siemens Westinghouse, Acumentrics и FuelCell Energy (FCE). С учетом субконтрактов исследования по данной программе было задействовано большее число компаний (рисунок).



Компании участники программы SECA [2]

В частности компании Siemens Westinghouse на основе элементов с объединенными треугольными в сечении трубками получена удельная мощность 600 мВт/см^2 . Созданы установки с гарантированным сроком службы не менее 20 000 часов и деградацией характеристик около 0,1 % за 1000 часов.

Компаниями Delphi и FuelCell Energy (FCE) разработаны энергетические установки для применения на автотранспорте и в морских энергетических установках. Включая воздухонезависимые энергетические установки для подводных объектов.

Boing совместно с Rolls-Royce и FCE начала разработку вспомогательной энергетической установки для источников бесперебойного питания авиации. Предполагается что к 2017 году будут созданы генераторы мощностью 440 кВт.

Bloom Energy Corp в 2010 году объявила, что она первая вышла на рынок с энергоустановками на основе SOFC мощностью 100 кВт. Причем к 2012 году в США насчитывалось более 1,700 автопогрузчиков, работающих на топливных элементах.

В Германии работы по разработке генерирующих устройств с твердооксидным электролитом были начаты фирмой BBC, позднее присоединились Dornier, EC, Siemens. Энергетические компании и разработчики технологий объединили усилия в программе «Callux». Как часть национальной инновационной программы по водородным технологиям и топливным элементам, которая координируется NOWGmbH. Весь же проект Callux координируется Центром Солнечной энергии и Водородных Исследований (ZSW) [3]. Пример финансируемого проекта – FlameSOFC объединяет 24 партнера из 11 стран.

В Европе одним из лидеров в создании энергосистем на SOFC планарной конструкции является Forschungszentrum Jülich (Германия), испытавший устройство мощностью 13 кВт ещё в 2004 году. В 2012 году была достигнута продолжительность работы 40 000 часов [4].

В Японии в 2009 году был запущен проект ENE.FARM. В ходе его реализации было установлено 3000 комбинированных устройств на SOFC (электричество+тепло) для больших зданий и около 40000 устройств, установленных в 2012 году для домохозяйств. TokyoGas, OsakaGas и Eneos в Японии построили системы, используя SOFC произведенные Kyocera Inc. Данные системы работают на природном газе и обеспечивают эффективность электрической конверсии приблизительно 45–50 %.

Комбинированные системы, основанные на ЭХГ, (электричество + тепло), также

активно проходят испытания и запускаются в производство в Австралии, Новой Зеландии. Причем, как и японские, австралийские системы используют SOFC работающие в диапазоне 750–800 °C. В 2012 году 25 устройств ЭХГ на SOFC марки BlueGen (Ceramic Fuel Cells Ltd., Австралия) были использованы для создания первой коммерческой виртуальной электростанции на топливных элементах в Германии. Электростанция является кластером распределенных единичных генерирующих устройств электроэнергии объединенных узлом управления, что позволяет преодолеть пиковые нагрузки и уравновесить неустойчивое снабжение от ветряных или солнечных генераторов с более высокой эффективностью и большей гибкостью, чем крупные централизованные электростанции.

Особо стоит отметить разработки Китая в области SOFC, так например компания Ningbo SOFCMAN Energy Technology Co., Ltd [5] предлагает на рынке как компоненты необходимые для производства энергетических установок на основе SOFC, так и готовые установки. Разработки данной компании основаны на технических решениях Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering и Chinese Academy of Sciences.

В СССР начиная с 60-х годов прошлого века Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН (ИБТЭ), занимался разработкой твердых электролитов проводящих по ионам кислорода, а с начала 70-х годов – разработкой макетов твердооксидных устройств на этих электролитах. Это привело к созданию в 1989 году, высокотемпературного электрохимического генератора мощностью 1 кВт. В 2013 г. В ИБТЭ разработан, а в ООО «Завод электрохимических преобразователей» (г. Новоуральск) изготовлен экспериментальный образец автономной энергоустановки для электропитания станций катодной защиты магистральных газопроводов. В ИБТЭ 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 Государственном научном центре РФ Физико-энергетический институт им. академика А.И. Лейпунского разрабатывалась планарная конструкция SOFC с использованием как YSZ электролита так и электролита на основе церия для работы при пониженных температурах. При 700 °C удалось получить КПД до 50 %, при 950 °C на единичных элементах была достигнута максимальная удельная мощность 700 мВт/см^2 .

Начиная с конца 80 годов прошлого века работы по разработке энергосистем на основе SOFC проводятся в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики имени академика Е.И. Забабахина (ВНИИТФ, г. Снежинск). Разработки велись по всем конструктивным разновидностям SOFC (трубчатая, планарная, блочная) мощностью 1-2,5 кВт. В 2005 г. в ВНИИТФ был изготовлен модуль батарей SOFC для систем катодной защиты газопроводов. В 2009 г. были проведены испытания энергоустановки на SOFC. Генератор вырабатывал электричество в течение 8800 часов, чем подтвердил гарантированный срок службы.

В 2003 году президент РАН академик Юрий Осипов и генеральный директор – председатель Правления ГМК «Норильский никель» Михаил Прохоров подписали Генеральное соглашение о сотрудничестве между Российской академией наук и компанией «Норильский никель» в области водородной энергетики и топливных элементов. Была учреждена национальная инновационная компания «Новые энергетические проекты», которая непосредственно с институтами Российской Академии наук занималась разработкой опытно-промышленной технологии производства топливных элементов и водородных генераторов на аналогичных элементах [6].

В работе [7] показано положение дел в области исследований и производства SOFC в России. В частности в Томском Политехническом Университете планируется изготовление и испытания опытного образца батареи SOFC мощностью до 6 кВт. Договор на выполнение НИОКР заключен в октябре 2013 года. Планируемое окончание работ – декабрь 2015 года.

В 2009 году МРСК Урала провела конкурс инновационных проектов в сфере энергосбережения. Одним из победителей стал проект Уральского Отделения РАН и ООО «Центр промышленных нанотехнологий» (Екатеринбург), цель которого в создании производства установок на базе SOFC.

Одним из направлений применения SOFC является создание воздухонезависимых энергетических установок (ВНЭУ) [8]. Так филиалом «Центрального научно-исследовательского института судовой электротехники и технологии» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» впервые в отечественной практике был предложен и реализован ряд технических решений [9]. Совместно с ИВТЭ УрО РАН испытан макетный образец сборки SOFC мощностью до 1 кВт и предложена концеп-

ция комбинированной ЭУ, включающей помимо SOFC турбогенератор и утилизационный теплообменник.

В ЦКБ «Рубин» ведется разработка проекта малой подводной лодки «Амур-950» с ВНЭУ на базе топливных элементов отечественного производства. Энергетическая мощность установки существенно выше зарубежных аналогов (схожие проекты есть в Германии, Швеции и Франции) – 400 кВт против 180 кВт. ВНЭУ позволяет обойтись без резервуаров с чистым водородом, поскольку он вырабатывается непосредственно из дизельного топлива. Ожидается что данная подводная лодка окажется конкурентоспособна на внешнем рынке вооружений, одним из требований которого является оснащение современных подводных лодок ВНЭУ [10, 11].

В программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 годы одной из задач значится разработка электрохимических генераторов большой мощности на основе твердооксидных топливных элементов [12].

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 твердооксидных топливных элементов», которые направлены 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, для обеспечения электроэнергией и теплом удаленные поселки и предприятия.

В рамках «Программы мегагрантов» создана лаборатория Электрохимических устройств на твердооксидных протонных проводниках под руководством Циакараса Панайотиса. Кроме того по данной программе в области SOFC в России работают ещё 3 лаборатории: в институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН лаборатория «Новых энергетических технологий и энергоносителей» под руководством Йошиоки Кавазое; в Томском политехническом университете в международной научно-образовательной лаборатории технологии водородной энергетики под руководством Торстейнна Сигфуссона; в институте физи-

ки твердого тела РАН лаборатория материалов для электрохимических технологий под руководством Владиславом Хартоном.

Отдельного упоминания стоит инициатива Уральской Промышленной компании, объявившей себя самостоятельным игроком на российском рынке генераторов на SOFC. Компания зарегистрирована как резидент Инновационного центра Сколково, вошла в фонд «Сколково» с проектом «Создание энергоустановки на твердооксидных топливных элементах для станций катодной защиты нефтегазового сектора и линейки установок для других отраслей народного хозяйства». Конечная цель ООО «УПК» по данному проекту это создание промышленного производства энергоустановок на SOFC. Ожидается, что крупносерийный выпуск начнется в 2015 году.

Заключение

В различных лабораториях мира ведется поиск новых твердых электролитов и разработка экономически доступных пленочных технологий с целью дальнейшего увеличения эффективности SOFC. Рассматриваются направления расширения ареала SOFC, для их использования в различных областях: от миниатюризированных SOFC малой мощности для применения в электронной технике до батарей SOFC для транспорта и спецприменений.

Список литературы

1. Липилин А.С. ТОТЭ и энергосистемы на их основе: состояние и перспективы // Электрохимическая энергетика. – 2007. – Т. 7, № 2. – С.61–72.
2. URL: <http://www.gwpc.org/>
3. URL: <http://www.f-cell.de/>
4. URL: <http://www.plansee.com/>
5. URL: <http://sofcman.com/>
6. Национальная инновационная компания «новые энергетические проекты» // Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 2. – С. 13–20.
7. Твердооксидные топливные элементы: проблемы, пути решения, перспективы развития и коммерциализации (Аналитический обзор) // ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы Москва, 2015.
8. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Сравнительный обзор и оценка эффективности воздухонезависимых энергетических установок различных конструкций // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 67.
9. Васильев В.А., Романов И.Д., Романова Е.А., Романов А.Д. История развития подводных лодок с воздухонезависимыми энергоустановками в России и СССР // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2012. – № 4 (97). – С. 192–201.
10. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Современные малые подводные лодки // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 3. – С. 68–71.
11. Романова Е.А., Романов А.Д., Чернышов Е.А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок // Вооружение и экономика. – 2015. – № 1 (30). – С. 99–105.
12. Программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы <http://ibch.ru>.