

# ТВЕРДООКСИДНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОТЭ) И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ИХ ОСНОВЕ

**АГАРКОВ Д.А., БРЕДИХИН С.И.**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

На сегодняшний день не известна более эффективная технология генерации электрической и тепловой энергии, чем энергетические установки на базе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). В качестве топлива может использоваться широкий набор газообразных углеводородов: метан, пропан, бутан, диметиловый эфир, диметоксиметан, газифицированное дизельное топливо. КПД таких систем достигает 60 % по электрической энергии и до 95 % – с учетом высокопотенциального тепла. В статье описываются принцип работы, ключевые преимущества технологии, а также современный статус разработок энергоустановок на ТОТЭ в мире.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, водородная энергетика, твердооксидные топливные элементы, энергетические установки на ТОТЭ

В настоящее время один из трендов развития мировой энергетики – распределенная генерация, когда электрическая и/или тепловая энергия генерируются непосредственно в месте ее потребления, а мощность генераторов выбирается, исходя из потребностей локальных потребителей. Такой подход позволяет снизить потери на передачу энергии между генерирующими мощностями и потребителями, повысить автономность объектов, а также надежность энергосистемы в целом. Однако, для построения энергосистемы по принципам распределенной энергетики тре-

буются эффективные и надежные автономные источники электрической и, при необходимости, тепловой энергии.

В настоящее время в качестве таких источников чаще всего применяются дизельные генераторные установки (ДГУ). Однако, они обладают целым рядом важных недостатков:

- относительно низкий КПД, особенно для малых мощностей (для генераторов киловаттного класса) и не в рабочей точке;
- низкий межсервисный интервал на уровне 250–300 часов, приводящий к необходимости двойного и тройного резервирования мощности, причем от-

дельными генераторами, а не установленной мощностью одного генератора;

- высокая шумность системы.

На сегодняшний день не известна более эффективная технология генерации электрической и высокопотенциальной тепловой энергии, чем твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) и энергетические установки на их основе. Принцип работы ТОТЭ следующий. Единичный твердооксидный топливный элемент – мембранно-электродный блок – состоит из мембраны твердого электролита с проводимостью по анионам кислорода ( $O^{2-}$ ), а также катода и анода, которые нахо-

## SOLID OXIDE FUEL CELLS (SOFC) AND POWER PLANTS BASED ON THEM

**AGARKOV D.A., BREDIKHIN S.I.**, Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Today no more efficient technology for generating electrical and thermal energy is known than a power plant based on solid oxide fuel cells (SOFC). A set of gaseous hydrocarbons can be used as a fuel: methane, propane, butane, dimethyl ether, dimethoxymethane, gaseous diesel fuel. The efficiency of such systems reaches 60% in terms of electrical energy and up to 95% – taking into account high-potential heat. The article describes the principle of operation, the key advantages of the technology, as well as the current status of the development of SOFC-based power plants in the world.

**Keywords:** distributed generation, hydrogen energy, solid oxide fuel cells, SOFC power plants

дятся с разных сторон от мембраны. На катод ТОТЭ подается воздух, за счет каталитических свойств материала катода молекулярный кислород ( $O_2$ ) восстанавливается до анионов ( $O^{2-}$ ), которые далее за счет градиента концентрации диффундируют от катода через мембрану твердого электролита на анод. На анод поступает сингаз – смесь водорода ( $H_2$ ) и монооксида углерода ( $CO$ ) – который готовится во внешнем устройстве – топливном процессоре – или непосредственно на аноде. Анионы кислорода, приходящие из мембраны твердого электролита, окисляют водород ( $H_2$ ) до воды ( $H_2O$ ), а монооксид углерода ( $CO$ ) – до диоксида углерода ( $CO_2$ ). Возникающие при реакции окисления топлива на аноде электроны проходят через внешнюю электрическую цепь, совершая полезную работу, и участвуют в реакции восстановления кислорода до анионов кислорода, протекающей на катоде. Рабочая температура ТОТЭ в зависимости от конструкции и применяемых функциональных материалов составляет 600–850 °С, что позволяет получать высокопотенциальное тепло в форме горячего водяного пара (продукта анодной реакции) или горячего воздуха, применяемого для терморегуляции системы. Высокопотенциальное тепло может быть использовано для обогрева помещений и/или получения горячей воды.

Следует отметить ряд важных преимуществ энергоустановок на ТОТЭ по сравнению с другими автономными генераторами, например, дизельными генераторными установками:

- КПД по электрической энергии составляет до 55–60 % [1, 2], что позволяет кратно снизить потребление топлива;
- суммарный КПД с учетом высокопотенциального тепла превышает 90 % [3, 4];
- возможность создавать гибридные системы с газовыми и паровыми турбинами, дополнительно повышая общую эффективность [5, 6];
- высокий межсервисный интервал на уровне года, с коротким и простым техническим обслуживанием – замена картриджа серочистки;
- высокий срок службы на уровне 40–50 тыс. часов, существуют масштабные программы исследований и

разработок, ставящих целью повышение срока службы до уровня 100 тыс. часов;

- мультитопливность – возможность использования в качестве топлива водород и широкий спектр газообразных углеводородов: метан, пропан, бутан, диметиловый эфир, диметоксиметан, биоэтанол, биогаз, свалочные газы, газы от сточных вод, газифицированное дизельное топливо и другие виды топлива;

- единственными продуктами работы являются вода и углекислый газ (для случая использования в качестве топлива углеводородов);

- высокая экологичность: выбросы  $CO$  и  $NO_x$  в сотни раз ниже, чем значения, указанные в экологических стандартах Euro-6 и Tier-4 [7].

- плоская зависимость КПД от мощности за счет модульности конструкции – энергетические установки различной мощности собираются из однотипных блоков.

Указанные выше преимущества энергетических установок на твердооксидных топливных элементах перед другими генераторами электроэнергии приводят к большому интересу к данной технологии в большинстве развитых и развивающихся стран. Наиболее широкая ниша применения, которую занимают энергетические установки на ТОТЭ в настоящий момент – коммунальные хозяйства (ЖКХ). Движители применения ТОТЭ в ЖКХ – газовые компании, которые в этой связи являются прямыми конкурентами компаний, осуществляющих сбыт электроэнергии. Поскольку твердооксидные топливные элементы не только источники электричества, но и тепла, их можно использовать для обслуживания небольших жилищных хозяйств. Используя на входе газ и холодную воду на выходе можно получить горячую воду и электрическую энергию. Генерация тепловой энергии и электричества непосредственно «на месте» помогает избежать потерь на передачу.

В Японии с 2008 года действует программа EneFarm: более 80 000 систем на ТОТЭ установлены в жилых домах [8–10]. В Европе существует зеркальная программа EneField [11–12], основу европейской программы составляют энергетические установки



**Рис. 1.** Когенерационные энергетические установки мощностью 3 кВт производства LG (слева) и мощностью 4,2 кВт производства Miura (справа), устанавливаемые в домашних хозяйствах и объекты малого бизнеса в рамках программы ENE-FARM в Японии

на ТОТЭ с поддерживающей анодной подложкой. На рис. 1 показаны установки производства LG и Miura мощностью 3 и 4,2 кВт, соответственно. КПД систем по электроэнергии составляет 48–52 %, а с учетом тепловой мощности – свыше 90 %.

Американская компания BloomEnergy – мировой лидер по суммарной мощности произведенных энергоустановок на ТОТЭ, занимается установкой систем мощностью 150–250 кВт для обеспечения энергетической независимости дата-центров и вычислительных мощностей крупных корпораций, таких как Google, eBay, Bank of America, Coca-Cola, FedEx, Walmart [13]. Суммарная мощность установленных систем на 2018 год составляет свыше 90 МВт. Подавляющее большинство установлено в США, около 3 МВт – в Японии. Использовании систем на ТОТЭ позволяет корпорациям предотвратить перебои доступа к их дата-центрам в случае отключения обеспечения целого побережья.

Еще одна перспективная ниша применения энергоустановок на ТОТЭ – транспортная. Энергоустановки на ТОТЭ используются в качестве расширителей пробега в автомобилях. Такие автомобили были разработаны австрийской компанией AVL совместно с японской корпорацией Nissan [14]. В них электромоторы получают энергию от мощной литий-ионной батареи, которая, в свою очередь, во время движения подзаряжается энергетической установкой на ТОТЭ. В качестве топлива в таком силовом агрегате используется экологически чистый био-этанол, по-



Рис. 2. Электромобиль с расширителем пробега на базе ТОТЭ, разработанный компаниями Nissan и AVL

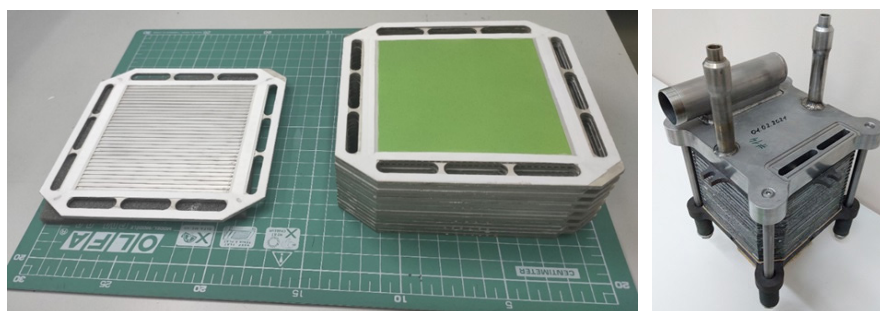


Рис. 3. Батарея планарных ТОТЭ с поддерживающим электролитом мощностью 500–700 Вт

лучаемый из органических отходов. Мощность системы на ТОТЭ составляет около 5 кВт, что позволяет увеличить пробег электромобиля с 120 до 600 км. Фотография автомобиля Nissan с расширителем пробега показана на рис. 2.

В Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Московская обл.) с 2003 года проводятся систематические исследования и разработки в области твердооксидных топливных элементов, батарей и энергетических установок на их основе. К настоящему моменту проведены следующие работы и получены следующие результаты:

- выбраны составы и налажено производство на предприятии ЗАО «Неохим» исходных материалов для изготовления несущих мембран твердого электролита ТОТЭ;
- разработана и запатентована [15] конструкция, разработана технология и на предприятии АО «НЭВЗ-Керамикс» налажено производство несущих подложек твердого электролита размером 100×100 мм;

- разработана технология изготовления единичных ТОТЭ планарной геометрии на несущем электролите размером 100×100 мм [16];

- проведено трехмерное компьютерное моделирование и по его результатам разработана конструкция батарей ТОТЭ на несущем электролите;

- разработана эскизная конструкторская документация (ЭКД) и организовано производство на предприятиях ФГУП ЭЗАН и ООО «РАСТР-Технология» биполярных и концевых токовых коллекторов, а также вспомогательных узлов батарей ТОТЭ;

- разработана и запатентована технология нанесения проводящих защитных покрытий на биполярные и концевые токовые коллекторы с целью предотвращения коррозии при эксплуатации в рабочих условиях батарей ТОТЭ;

- изготовлены и испытаны батареи ТОТЭ планарной геометрии мощностью 500–700 Вт (рис. 3);

- проводятся исследования и разработки в направлении снижения рабочей температуры за счет перехода к ТОТЭ второго поколения с поддерживающей анодной подложкой и тонкопленочным электролитом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.solidpower.com/en/bluegen/>
2. [https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/\\_\\_icsFiles/afieldfile/2020/03/03/20200225.pdf](https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/__icsFiles/afieldfile/2020/03/03/20200225.pdf)
3. <https://www.nedo.go.jp/content/100582591.pdf>
4. [https://global.kyocera.com/news-archive/2012/0305\\_woec.html](https://global.kyocera.com/news-archive/2012/0305_woec.html)
5. Penyarat Chinda, Pascal Brault “The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling”, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, iss. 11, 2012, pp. 9237-9248, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.005
6. <https://power.mhi.com/products/sofc>
7. <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/es5-200kw-datasheet-2019.pdf>
8. <https://fuelcellsworks.com/news/worlds-smallest-high-efficiency-household-fuel-cell-cogeneration-system-ene-farm-mini-developed/>
9. [https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/\\_\\_icsFiles/afieldfile/2020/03/03/20200225.pdf](https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/__icsFiles/afieldfile/2020/03/03/20200225.pdf)
10. [https://www.tokyo-gas.co.jp/techno/english/menu5/9\\_index\\_detail.html](https://www.tokyo-gas.co.jp/techno/english/menu5/9_index_detail.html)
11. <https://enefield.eu/>
12. <https://www.cogeneurope.eu/projects/ene-field>
13. <https://www.bloomenergy.com/technology/>
14. <https://www.avl.com/documents/3961356/7340530/UKPDiM+Keynote+Dr+F.+Moradi%2C+AVL+-+Fuel+Cells+-+The+Opportunities+and+Challenges.pdf>
15. Д.А. Агарков, И.Н. Бурмистров, И.Е. Курицына, О.В. Тиунова, Ю.К. Непочатов, С.И. Бредихин. «Мембрана твердого электролита для твердооксидных топливных элементов». Патент на полезную модель, 161024, дата приоритета 17.09.2015, зарегистрирован 17.03.2016, срок действия 17.09.2025 (2016)
16. I.N. Burmistrov, D.A. Agarkov, E.V. Korovkin, D.V. Yalovenko, S.I. Bredikhin. “Fabrication of membrane-electrode assemblies for solid oxide fuel cells by joint sintering of electrodes at high temperature”, Russian Journal of Electrochemistry, vol. 53, no. 8, pp. 873–879 (2017).