

УДК 621.352

Трапезников А.Н., Шайхатдинов Ф.А., Хохонов А.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Абаева Е.

ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ И ПРИМЕНЯЕМЫХ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ В РОССИИ

Трапезников А.Н., Шайхатдинов Ф.А., Хохонов А.А., ПАО «КАМАЗ», Научно-технический центр, Набережные Челны, Россия

Агарков Д.А., Бредихин С.И., ИФТТ РАН, Черноголовка, Россия

Чичиров А.А. - Казанский Государственный Энергетический Университет, Казань, Россия

Абаева Е. Российской химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

В данной работе приводятся исследования, направленные на обобщение технологий и возможностей, полученные в результате проведения ряда встреч с ГК «Газпром» и научными институтами, объединениями, задействованными в разработках, проведенными и проводимыми на территории Российской Федерации, определены основные направления и уровни развития тематики электрохимических генераторов и силовых установок, применяемых на автомобильном транспорте.

Ключевые слова: топливные элементы, автомобильный транспорт, энергетические установки, щелочные топливные элементы (ЩТЭ), твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ), протон-обменные топливные элементы (ПОМТЭ).

OVERVIEW OF CHARACTERISTICS OF FUEL CELLS MANUFACTURED AND APPLIED ON MOTOR TRANSPORT IN RUSSIA

Trapeznikov A.N., Shaikhatdinov F.A., Khokhonov A.A., PJSC "KAMAZ", Scientific and Technical Center, Naberezhnye Chelny, Russia

Agarkov D.A., Bredikhin S.I., ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

A.A. Chichirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abaeva E. Russian University of Chemical Technology. DI. Mendeleev, Moscow, Russia

This work presents studies aimed at summarizing the technologies and capabilities obtained as a result of a number of meetings with the Gazprom Group and scientific institutes, associations involved in the developments carried out and carried out in the territory of the Russian Federation, the main directions and levels of development of the subject of electrochemical generators and power plants used in road transport.

Key words: fuel cells, road transport, power plants, alkaline fuel cells (AFC), solid oxide fuel cells (SOFC), solid polymer fuel cells (TPFC), proton-exchange fuel cells (PEMFC).

В настоящий момент в мире наблюдается достаточно развитый тренд на применение энергетических установок на базе различных типов топливных элементов в автомобильном транспорте [1,2]. Из всего изобилия представленных технологий топливных элементов и направлений их развития и применения в мире, на территории Российской Федерации можно выделить три лидирующие технологии изготовления топливных элементов (см. Рис. 1), получившие воплощение в виде силовых (маршевых) энергетических установок [3], а также в виде небольшого генерирующего устройства – расширителя пробега (REX – range extender), – предназначенного для подзаряда тяговой аккумуляторной батареи электрического транспортного средства [4]. Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ, SOFC) – данные топливные элементы заняли свою нишу развития на территории РФ, как перспективные стационарные установки катодной защиты ГК «Газпром», имеющие широкий диапазон доступных мощностей, включая малые мощности около 1 кВт, малый ресурс по количеству циклов включения/выключения (с охлаждением от рабочей до комнатной температуры) до момента выхода из строя (процесс похож на

осыпание пластин в свинцовой стартерной батарее), большие габаритные размеры, продолжительный процесс выхода энергетической установки на режим работы (либо установка должна работать постоянно) с крайне низкой виброустойчивостью. К несомненным преимуществам ТОТЭ перед другими типами топливных элементов следует отнести возможность работы на газообразных углеводородах, а не только на чистом водороде (за счет высокой рабочей температуры, совмещенной с возможностью и энергетической выгодностью проведения частичного пред-риформинга). Примеры доступного для использования в энергетических установках на ТОТЭ топлива – метан [5,6], пропан-бутан [7,8], диметиловый эфир [9,10], диметоксиметан [11], биогаз [12,13] или даже подготовленное дизельное топливо [14,15]. Лидером в части применения энергетических установок на ТОТЭ в автомобилестроении является ПАО «КАМАЗ», использующий электрохимический генератор в качестве расширителя пробега на городском коммунальном автомобиле с прогрессивной в этом направлении технологией ТОТЭ – металл-поддерживающей структурой (MSC) ячейки топливного элемента (см. Рис. 2) [17].

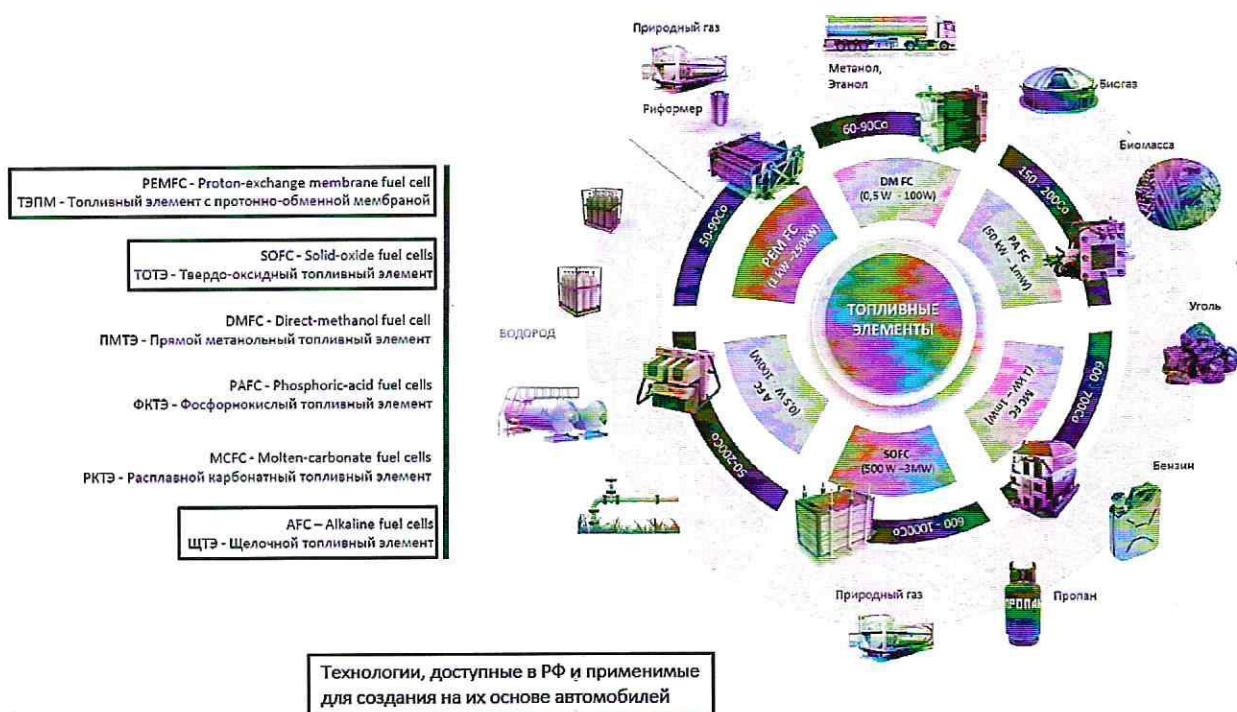


Рис. 1 –Лидирующие технологии топливных элементов по данным ООО "ИнЭнерджи"[16].

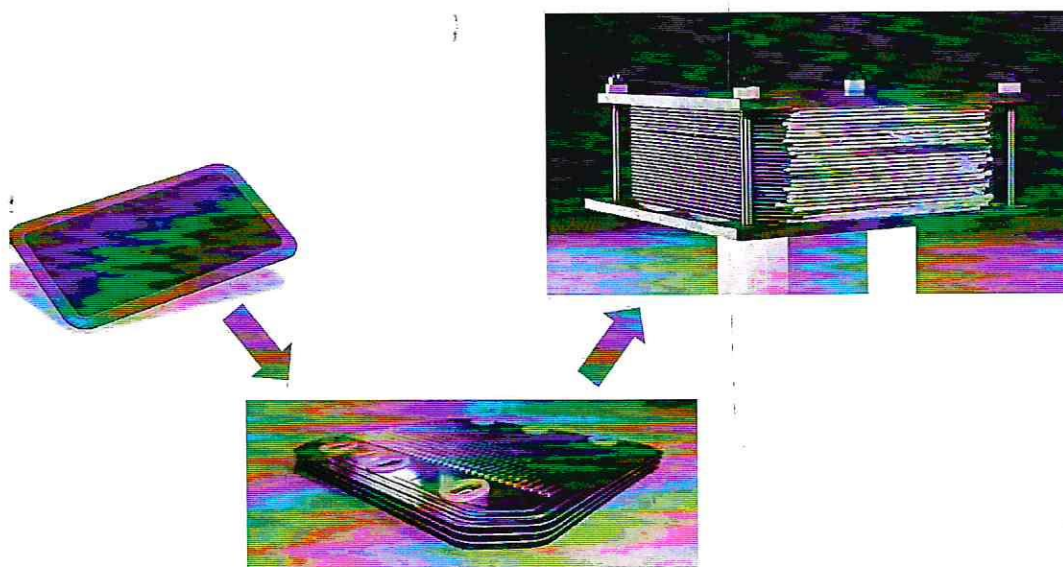


Рис. 2 – Металл-поддерживающая структура ТОТЭ – MSC

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ, ПОМТЭ, PEMFC) – данные топливные элементы также применяются как в стационарных, так и автономных подвижных энергетических установках с широким выходным параметрами, работающих на водороде чистотой не менее 99,99 %. Помимо работы только на сверхчистом водороде, одним из наиболее серьезных недостатков силовых установок на ТПТЭ (ПОМТЭ) является использование в мембранах платины, такие мембраны должны работать в условиях постоянного увлажнения, близкого к насыщению, как в анодной, так и в катодной областях, что требует введения

дополнительных устройств и, следовательно, ведет к увеличению себестоимости электрохимических генераторов на основе топливных элементов, а также снижению надежности систем на их основе. Следует также отметить, что при работе с водородом, полученным, например, в процессе риформинга из природного газа, существует серьезная проблема отравления платины примесями CO в водороде, что, в свою очередь, оказывает губительное влияние на характеристики топливного элемента. Твердополимерные топливные элементы (см. Рис. 3), применяемые на территории РФ в настоящий

момент, имеют низкий ресурс и большой процент содержания импортных комплектующих [17-19].

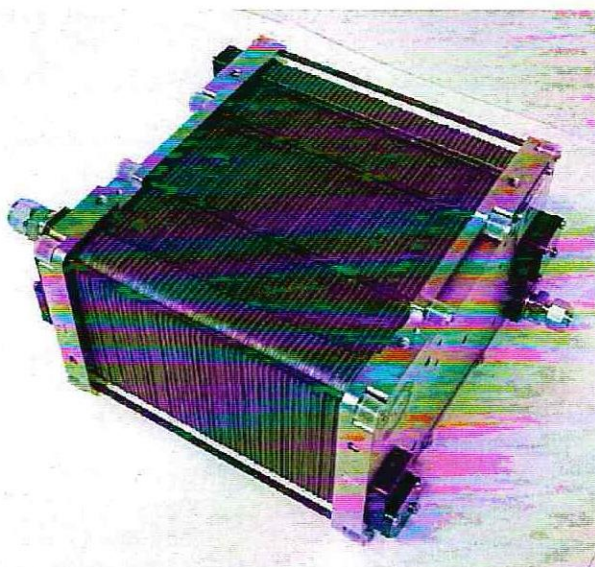


Рис.3 – Твердополимерные топливные элементы PEMFC

Щелочные топливные элементы (ЩТЭ, AFC) (см. Рис. 4) – данные топливные элементы имеют устойчивость к вибрационным нагрузкам, возникающим в процессе движения автомобиля, достаточно быстрый выход энергетической установки на установившейся режим работы (не менее 30 минут). Небольшие габариты, более лоялен к чистоте водорода – 99,9%. Способен включаться и

отключаться в работу без последствий. К недостаткам следует отнести жидкое агрегатное состояние электролита, приводящее к необходимости введения в состав энергоустановки специальных устройств, обеспечивающих поток электролита, а также работу только на водороде в качестве топлива. Данный тип топливных элементов имеет большие перспективы для применения на автотранспорте [18, 19].

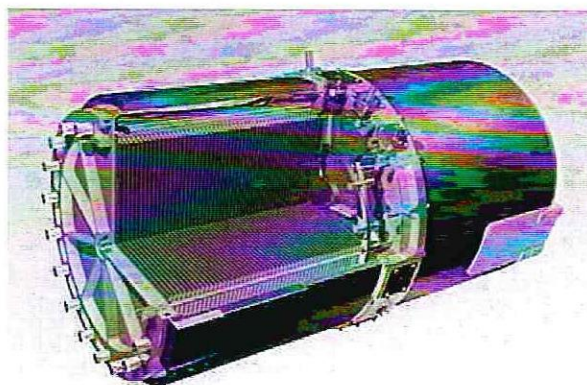


Рис.4 – Щелочной топливный элемент (ЩТЭ, AFC)

Ниже представлена сравнительная таблица (см. табл. 1), с внесенными в нее данными о степени развития и применения электрохимических генераторов на топливных элементах.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики электрохимических генераторов на топливных элементах в России

Вид топливного элемента	Выходная электрич. мощность, кВт	Кол. циклов вкл./откл. (до выхода из строя)	КПД установ ки, %	Ресурс, ч	Способ получения водорода	Применение в автомобилестроении	Виброустойчивость	Рабочая температура хим. реакции, °С	Доля импортных компонентов, %	Производство для автомобилестроения
Твердооксидные ТОТЭ (SOFC) Имеет 3 подвиды по технологии изготовления (по уровню развития технологии – Электролит-поддерживающие «1», анод-поддерживающие «2», металл-поддерживающие «3»)	Более 1,5	от 30 до 40 «1» от 60 до 80 «2» не ограничено «3»	от 30 до 35 «1» от 35 до 40 «2» от 40 и более «3»	60 000	Стационарный/мобильный, реформингом из любого газообразного углеводородного топлива, либо водород.	Только стационарно «1» Стационарно/мобильно «2» Стационарно/мобильно «3»	Очень низкая «1» Устойчив к вибрации «2» Устойчив к вибрации «2»	от 650 до 1000	3-30	Отсутствует или готовится с возможным размещением на автопредприятиях
Твердополимерные ТПТЭ (PEMFC)	Более 1,5	Не ограничено	от 40 до 50	30 000	Стационарный, реформингом из газа (пропан/метан) или высокоочищенный технический водород	Стационарное/Автомобильное	Устойчив	от 80 до 100	50	Отсутствует или готовится с возможным размещением на автопредприятиях
Щелочные ЩТЭ (AFC)	от 1 до 45	Не ограничено	от 50 до 65	10 000	Мобильно, реформингом из метана	Автомобильное	Устойчив	от 65 до 250	3	Возможно, с частичным размещением на автопредприятиях

ЩТЭ имеют возобновляемый ресурс после перезарядки электролита.

Литература

1. Zachary P. Cano, Dustin Banham, Siyu Ye, Andreas Hintennach, Jun Lu, Michael Fowler & Zhongwei Chen, "Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets", *Nature Energy* volume 3, pages 279–289 (2018)
2. Yong Li, Jie Yang, Jian Song, «Structure models and nano energy system design for proton exchange membrane fuel cells in electric energy vehicles», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 67, 2017, Pages 160-172, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.030>.
3. Aschilean, I.; Varlam, M.; Culcer, M.; Iliescu, M.; Raceanu, M.; Enache, A.; Raboaca, M.S.; Rasoi, G.; Filote, C. Hybrid Electric Powertrain with Fuel Cells for a Series Vehicle. *Energies* 2018, 11, 1294.
4. David Udomsilp, Jürgen Rechberger, Raphael Neubauer, Cornelia Bischof, Florian Thaler, Wolfgang Schafbauer, Norbert H. Menzler, Lambertus G.J. de Haart, Andreas Nenning, Alexander K. Opitz, Olivier Guillon, Martin Bram, "Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells with Exceptionally High Power Density for Range Extender Systems", *Cell Reports Physical Science*, Volume 1, Issue 6, 2020, 100072, ISSN 2666-3864, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100072>.
5. E. P. Murray, T. Tsai, S. A. Barnett, *Nature*, 400(6745), 649 (1999).
6. J. Myung, S.-D. Kim, T. H. Shin, D. Lee, J. T. S. Irvine, J. Moon, *J. Mater. Chem. A.*, 3, 13801 (2005).
7. Z. He, C. Li, C. Chen, Y. Tong, T. Luo, Z. Zhan, *J. Power Sources*, 392, 200 (2018).
8. N. Xu, T. Zhu, Z. Yang, M. Han, *Electrochim. Acta*, 265, 259 (2018).
9. W. Sun, S. Zhang, W. Liu, *Fuel Cells*, 14(4), 561 (2014).
10. N. Laosiripojana, S. Assabumrungrat, *Appl. Catal. A: General*, 320, 105 (2007).
11. K. Kendall, M. Slinn, J. Preece, *J. Power Sources*, 157(2), 750 (2006).
12. A. Lanzini, H. Madi, V. Chiodo, D. Papurello, S. Maisano, M. Santarelli, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 61, 150 (2017).
13. D. Papurello, A. Lanzini, L. Tognana, S. Silvestri, M. Santarelli, *Energy*, 85, 145 (2015).
14. A. S. Martinez, J. Brouwer, G. S. Samuelsen, *Appl. Ener.*, 148, 421 (2015).
15. J. Rechberger, A. Kaupert, J. Hagerskans, L. Blum, *Trans. Res. Proc.*, 14, 3676 (2016).
16. ООО "ИнЭнерджи", www.inenergy.ru.
17. Averina J.M., Zhukov D.Yu., Kurbatov A.Yu., Kalyakina G.E., Desiatov D.Y. Study of technical and economic features of solid oxide fuel cells // В сборнике: 19th International scientific geoconference SGEM 2019. Conference proceedings. 2019. С. 473-480.
18. Сахаров Д.А., Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Субчева Е.Н., Ветрова М.А., Трапезников А.Н. Разработка и исследование электрохимических характеристик экспериментальных сборок металл-поддерживающих твердооксидных топливных элементов // *Химическая промышленность сегодня*. 2019. № 4. С. 16-18.
19. Десятов А.В., Курбатов А.Ю., Аверина Ю.М., Болдырев В.С. Твердооксидные топливные элементы: энергия будущего // *Химическая промышленность сегодня*. 2019. № 3. С. 20-24.