УДК 623.827

РАЗВИТИЕ ИНОСТРАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

603095 г. Нижний Новгород, ул. Минина д. 24, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

В статье представлена информация по зарубежным разработкам в области воздухонезависимых энергетических установок для подводных объектов на основе топливных элементов. Приведены основные разработчики Германии и США, а также других странах и характеристики энергетических установок.

Ключевые слова: воздухонезависимая энергетическая установка; топливный элемент; подводная лодка; необитаемый подводный аппарат

DEVELOPMENT OF FOREIGN POWER INSTALLATIONS FOR UNDERWATER OBJECTS ON THE BASIS OF FUEL ELEMENTS

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

The Nizhny Novgorod state technical university of R.E.Alekseev

603950, Nizhny Novgorod, Russia, st. Minin 24, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

Summary: Information on foreign development in the field of airindependent power installations for underwater objects on the basis of fuel elements is provided in article. The main developers of Germany and the USA, and also other countries and characteristics of power installations are brought.

Keywords: airindependent power installation; fuel element; submarine; uninhabited submersible

В настоящее время все большее распространение получают различные топливные элементы как для неатомных подводных лодок (ПЛ), так и для необитаемых подводных аппаратов различного водоизмещении, а также элементов сети необитаемых станций и аппаратов мониторинга обстановки [1 - 5]. Для обеспечения работы которых применяют различные энергетические установки.

Первый топливный элемент был создан в 1838 – 1845 году Кристианом Фридрихом Шенбайном (Christian Friedrich Schoenbein) и Уильямом Робертом Гроувом (William Robert Grove). Примерно с того же времени известен двигатель внутреннего сгорания изобретенный Николаусом Отто (Nikolaus Otto), газовая турбина была изобретена Джоном Барбером (John Barber) еще в 1791 году. Однако до настоящего времени распространение топливных элементов незначительно по сравнению с тепловыми двигателями. Прорыв был достигнут в 50 – 60 годах, когда активно стали развиваться щелочные топливные элементы для использования в космических программах Apollo mission и Space shuttle, для корабля Gemini был разработан топливный элемент на основе протонобменной мембраны. Первым подводным аппаратом на топливных элементах стал созданный в 1974 году «Deep Quest».

В настоящее время серийно ПЛ с воздухонезависимой энергетической установкой (ВНЭУ) на топливных элементах строятся в Германии, кроме того концепция создания необитаемых подводных аппаратов (НПА), базирующихся на атомных подводных лодках, начала разрабатываться в научно-исследовательском центре подводной войны ВМС США (Naval Underwater Warfare Center – NUWS) еще с 1996 года [6].

Водород имеет малый удельный вес и низкую температуру кипения, что сильно затрудняет его хранение на борту подводного средства. При хранении водорода в баллонах высокого давления процент веса водорода в системе, как правило, составляет 2 - 4% от общего веса системы хранения. С развитием материалов баллонов могут быть получены существенные улучшения, и есть сообщения о многослойных баллонах, которые могут запасать до 11%-й по массе водород при давлении 5000 psi. Углеродные нанотрубки являются объектом интенсивных исследований как перспективные материалы для хранения водорода. Криогенное хранение водорода также может применяться в различных системах, однако ограничено технической и экономической обоснованностью [7-9].

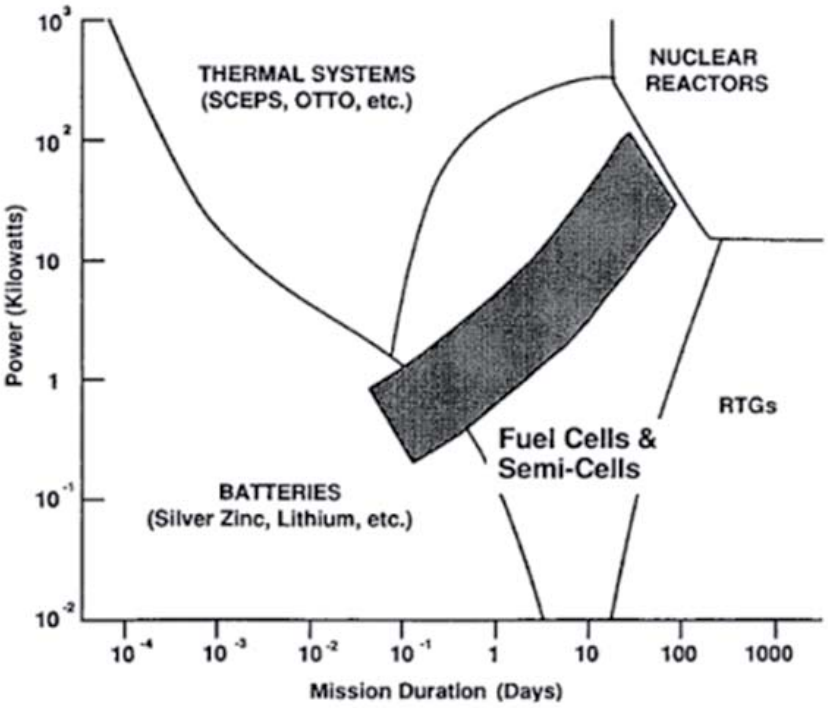

Рис. 1. Использование различных энергетических установок в зависимости от времени работы и развиваемой мощности

Таблица 1

Основные параметры наиболее распространенных топливных элементов

Тип элемента Англ./Рус.	AFC/ТЩЭ	PEMFC/ ПОМТЭ	SOFC/ТОТЭ	PAFC/ ФКТЭ	MCFC/РКТЭ
Рабочая температура	60 – 150	60-120	650-1000	160-220	600-700
Анодная реакция	H2 + 2OH = 2H2O + 2e-	H2=2H+ + 2e-	H2 + O2- = H2O + 2e-	H2=2H+ + 2e-	H2 + CO3 2- = H2O + CO2 + 2e-
Катодная реакция	0,5 O2 + 2H2O + 2e- = 2OH-	0,5 O2 + 2H+ + 2e- = H2O	0,5 O2 + 2e- = O 2-	0,5 O2 + 2H + 2e- = H2O	0,5 O2 + CO2 + 2e- = CO3 2-
Окислитель	Особо чистый кислород	Кислород / воздух	Кислород / воздух	Кислород / воздух	Кислород / воздух
Топливо	Особо чистый водород	Очищенный водород	Газовые смеси содержащие H2 и CO	Очищенный водород	Газовые смеси содержащие H2 и CO
Требования к топливу					
CO	Яд, > 10 ppm	Яд, > 10-100 ppm	Топливо	Яд, > 0,5 об %	Топливо
CO2	Яд, > 1 ppm	разбавитель	разбавитель	разбавитель	разбавитель
CH4	разбавитель	разбавитель	топливо	разбавитель	разбавитель
H2S COS	Яд	Яд	Яд, 1 - 10 ppm	Яд > 50 ppm	Яд 0,5 - 5 ppm

Наиболее распространенный вариант хранения водорода на борту - это металлогидридные аккумуляторы и интерметаллидные соединения. Например, при использовании интерметаллидных соединений LaNi5, FeTi, Mg2Ni и ZrV2 количество водорода варьируется в диапазоне от 1-8% массы системы.

Химические источники водорода это также альтернативный вариант обеспечения топливного элемента топливом. Также значительная часть установок на топливных элементах в настоящее время ориентирована на применение в качестве топлива углеводородов.

Кроме того из аммиака при повышенной температуре в присутствии катализатора возможно получить чистый водород, однако данные системы в настоящее время не получили широкого распространения.

Содержание кислорода воды 150 μmole O2/л слишком низко, чтобы сделать эффективную систему получения кислорода непосредственно из воды для обеспечения работы топливного элемента.

Таблица 2

Сравнение различных систем хранения водорода и кислорода*

	Energy Density Плотность хранения (Wh/L)	Specific Energy Плотность хранения (Wh/kg)
Компримированный водород	560–820	1100-1820
Жидкий водорода	1220-1860	1620-2050
Металлогидридное хранение	770-1670	280-520
Сжатый кислород	600–1090	770–1680
Сжиженный кислород	2780–2980	2900–3300
Химические соединения	1340–2090	1170–1610
Кислородные свечи	2200-3260	1260-1560

*данные могут значительно отличаться в разных источниках и даже у одного автора в разное время [10, 11].

Ряд экспериментальных установок применяют химические источники хранения кислорода на основе перекиси водорода, LiClO4, NaClO3 (кислородные свечи / oxygen candles), другие пероксиды / суперокиси. Необходимым условием создания таких систем является тепловые или каталитические процессы, чтобы извлечь кислород из этих составов, что добавляет общую сложность энергетической установке.

Сжатый кислород не обеспечивает достаточную плотность энергии и поэтому практически не применяется. Примерно в 5 раз большую плотность хранения обеспечивает криогенное хранение (liquid oxygen / LOX); наиболее распространенный в настоящее время вариант хранения.

В основном в качестве установки энергоснабжения применяются PEMFC и SOFC элементы, так как и PAFC, и MCFC, и DMFC имеют худшие массогабаритные показатели, не являются компактными. Для AFC необходимы высокочистые водород и кислород, что делает их малоприменимыми.

В начале 60х годов компания DuPont разработала материал Nafion, который с тех пор используется в PEM элементах. Массогабаритные характеристики Proton Exchange Membrane Fuel Cells приведены в табл 3. Однако существуют технические сложности с организацией береговой инфраструктуры, в частности технологические проблемы с получением и хранением водорода, невозможность организации базирования ПЛ в недостаточно оборудованных пунктах, что существенно снижает мобильность, кроме того уничтожение топливозаправочной базы фактически сделает невозможным применение ПЛ.

Опытно-конструкторские работы, проектирование и строительство новых лодок проекта 212 с ЭХГ на основе PEM были выполнены фирмами Thyssen, HDW, Ferrostaal AG и Inggenieurcontor Lubek. Хранение топлива и окислителя осуществляется в следующем виде: кислород - в криогенном состоянии, водород – в адсорбированном виде в интерметаллидных соединениях. ВНЭУ на базе PEMFC на основе топливных элементов Siemens состоит из девяти элементов SINAVYCIS BZM 34 (пр. 212A) или из двух BZM 120 (пр. 214 и 209 PN).

Таблица 3

Применяемые в подводной технике топливные элементы [11]

Модель	Вес (кг)	Габаритные размеры (мм) или объем (л)	Удельная энергия (W/kg)	Удельная энергия (W/L)
Siemens BZM 34 kW	650	480 × 480 × 1450	52	102
Siemens BZM 120 kW	900	500 × 530 × 1760	133	257
Horizon H-500XP	5,8	150 × 203 × 52	86	316
Horizon H-500	2,52	268 × 130 × 122.5	196	117
AREVA Helion 20 kW	160	690 × 470 × 335	125	182
Nedstack HP 5.0	22	353 × 194 × 288	227	254

Кроме того разрабатываются энергоустановки на основе реформера углеводородов и PEMFC. Метанол имеет меньшую теплоту сгорания чем дизельное топливо и более токсичен, однако его чистота позволяет применять его для реформеров без дополнительной очистки. Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH (HDW) разработала концепцию неатомной подводной лодки, предназначенной для решения широкого круга задач в удаленных океанских (морских) зонах, пр. 216. Аналогичный проект разработан испанской компанией Navantia для ПЛ пр. S-80A. Схема имеет преимущества перед PEM в части применяемого топлива, обеспечении большей дальности за счет вспомогательного дизель-генератора и снижением уязвимости береговой инфраструктуры, однако требует дополнительные системы на борту ПЛ – реформинга и системы утилизации CO2.

Solid Oxide Fuel Cell работают при температурах до 1000 °C и могут использовать разнообразное топливо: газообразный водород или углеводороды. Причем их особенностью является возможность применения топлива с меньшей степенью очистки, в частности по сере, в отличие от низкотемпературных топливных элементов где сера и CO отравляют катализатор. Однако высокое содержание серы стандартных дизельных топлив (5000 to 20,000 ppm) может отравить эти топливные элементы, что делает необходимым применение дополнительных блоков сероочистки. Кроме того особенностью работы SOFC является то, что при работе они выделяют CO2 при высокой температуре. Это позволяет использовать для повышения КПД микрогазовую турбину для производства электрической энергии. Но при работе это оставляет тепловой след, что повышает вероятность обнаружения подводного средства.

В США в конце 1960 годов компания General Electric разработала 2 экспериментальных энергоустановки мощностью 1,8 и 44 кВт на основе SOFC. В дальнейшем в рамках государственных программ были выполнены следующие работы (Программа U.S. Navy Ship Service Fuel Cell Program):

Фаза 1. 1997- 1999 год. Компаниями Energy Research Corporation, Ballard / McDermott, Ballard Power Systems, McDermott Technology, Inc. созданы энергетические установки на основе MCFC и PEMFC, в качестве топлива использующие водород или F-76 (Navy Distillate Fuel) мощностью до 2500 кВт.

Фаза 2. 2000 – 2008 год. Компаниями McDermott Technology, Inc., Fuel Cell Energy, Inc созданы энергетические установки на основе PEMFC, MCFC и SOFC, работающие на топливе JP-5, JP-8, F-76 мощностью до 625 кВт

В дальнейшем по программе U.S. Navy Advanced Fuel Cell Program (2008 – 2010 год) были созданы энергетические установки на основе PEMFC и SOFC, работающие на топливе JP-5, JP-8, F-76.

В Канаде в 80-х годах Отдел Национальной обороны (Canadian Department of National Defense) начал разработку ВНЭУ базирующейся на PEMFC, разработанном Ballard Corp. для оснащения ПЛ пр. Oberon. В частности, была разработана 300 кВт PEMFC установка.

В Индии исследовательская лаборатория материальных средств ВМС (Naval Materials Research Laboratory), которая входит в состав организации оборонных исследований и разработок (Defense Research and Development Organization), разрабатывает ВНЭУ на базе электрохимического генератора с получением водорода на борту с помощью риформинга дизельного топлива.

Заключение

В настоящее время в мире активно развиваются подводные аппараты с ВНЭУ на основе топливных элементов. Проектирова-

нием и созданием их занимаются как государственные и так и частные компании. Наибольшее распространение для подводной техники получили PEMFC и SOFC элементы. Для малых энергоустановок в основном применяются PEMFC. SOFC, не смотря на большее разнообразие применяемого топлива пока не получили широкого распространения. Однако с переходом НАТО на единое топливо [12], не исключено широкое распространение данных энергоустановок, как для подводной, так и для наземной техники.

Список литературы

1. Системы борьбы с необитаемыми аппаратами – асимметричный ответ на угрозу XXI века / Р.В. Красильников. Инфо-да, СПб, 2013. 106 с.

2. Karen E. Swider-Lyons, Richard T. Carlin, Robert L. Rosenfeld, Robert J. Nowak Technical issues and opportunities for fuel cell development for autonomous underwater vehicles // Naval Research Laboratory, Washington, DC, 4p

3. Jennie Mariko Moton Investigation of low temperature solid oxide fuel cells for air-independent UUV applications University of Maryland. 2012. 113 p.

4. Sheila Mae C. Ang Model-based design and operation of fuel cell systems Department of Chemical Engineering University College London , 2012. 236 p.

5. Fariborz Haghshenass Iran's Asymmetric Naval Warfare // Policy Focus #87 | September 2008 P. 40.

6. Илларионов, Г.Ю. Подводные роботы в минной войне: Монография / Г.Ю. Илларионов, К.С. Сиденко, В.В. Сидоренков. Калининград: ОАО «Янтарный сказ», 2008.

7. 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.

8. Чернышов Е.А., Романов А.Д. Высокометаллизированное топливо на основе алюминия и его применение // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 24. С. 69-73.

9. Дядик, А.Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А.Н. Дядик, В.В. Замуков, В.А. Дядик. СПб: Судостроение. 2006. 424 с.

10. Alejandro Mendez, Teresa J. Leo, Miguel A. Herreros Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: state of the art // Conference Proceedings Paper – Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions» Published: 18 March 2014. 19 p.

11. Alejandro Mendez, Teresa J. Leo, Miguel A. Herreros Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // Energies - 2014. № 7. 18 p. (doi:10.3390/en7074676)

12. Романов А.Д., Романов И.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Развитие концепции «единого топлива» в странах НАТО // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9. С. 34-37.