УДК 623.827:621.352.6

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_02
EDN: EOBTLX

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АНПА

В.В. Княжев, В.В. Лощенков

Необходимо увеличение продолжительности автономной непрерывной работы автономных необитаемых подводных аппаратов и дальности их плавания, поэтому для питания бортовых приборов и двигательной установки аппарата нужны мощные и энергоемкие источники энергии. В статье рассмотрена возможность энергоснабжения автономных необитаемых подводных аппаратов от топливных элементов – электрохимических источников тока, питаемых кислородом и топливом, в качестве которого в настоящее время применяется прежде всего водород. Сделан обзор построенных и испытанных автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащенных топливными элементами с системами хранения реагентов: водорода и кислорода, а также приведены результаты, полученные в этих испытаниях. Описаны разные типы топливных элементов, их преимущества и недостатки. Даны особые требования к топливным элементам для автономных необитаемых подводных аппаратов. Рассмотрены и проанализированы характеристики топливных элементов зарубежных и отечественных, которые использовались в экспериментальных аппаратах и тех, что выпускаются серийно и коммерчески поставляются для стационарных объектов, наземного и морского транспорта и для воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок. Отмечена актуальность использования энергетических систем с топливными элементами для энергоснабжения подводных, надводных и воздушных автономных беспилотных аппаратов.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, АНПА, источники энергии, топливные элементы, протонообменные мембраны, щелочные топливные элементы, аккумуляторная батарея, водород, кислород.

Введение

В настоящее время для энергоснабжения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в основном используются литий-ионные вторичные аккумуляторы. Удельные энергетические характеристики ограничивают время автономной работы АНПА. Длительность миссии подводных аппаратов можно повысить за счет меньшего энергопотребления. А так как большая часть энергии расходуется двигателями аппарата, то как вариант используется принцип подводного глайдера, когда аппарат приводится в движение за счет изменения плавучести, а не двигателями с гребными винтами. Однако скорость при этом невысока, и аппарат должен постоянно совершать маневры по глубине. Время автономной работы аппарата без возвращения к кораблю-носителю может быть увеличено за счет его подзарядки на доковых станциях или за счет использования возобновляемых источников энергии в океане. Повысить запасы энергии на АНПА и обеспечить длительное их функционирования без возвращения к материнскому кораблю или к доковой станции подзарядки позволяют топливные элементы (ТЭ), у которых в настоящее время удельные энергетические характеристики выше, чем у литий-ионных аккумуляторов. Топливным элементам также требуется меньшее время для перезарядки, чем аккумуляторным батареям, благодаря быстрой заправке реагентами. ТЭ могут начинать работу при низких температурах, когда у аккумуляторных батарей значительно снижается разрядная емкость [1]. В этих электрохимических источниках тока химическая энергия прямо преобразуется в электрическую. Наиболее широко применяются и уже освоены топливные элементы, в которых в качестве топлива используется водород, а в качестве окислителя – кислород. Топливные элементы могут использоваться в комбинации с аккумуляторами, образуя гибридную энергетическую установку АНПА, ТЭ обеспечивают энергией аппарат в стабильном

режиме и заряжают аккумуляторы, которые отдают энергию в пиковом режиме.

АНПА на топливных элементах

С начала этого тысячелетия ведутся исследования по разработке и созданию систем энергоснабжения АНПА на топливных элементах. Для этого использовались как уже существующие аппараты, так и совершенно новые, специально разработанные.

АНПА URASHIMA

В Японском агентстве наук и технологий о Земле и Море (JAMSTEC) в 1998 году был создан АНПА URASHIMA для исследований на морском дне. В качестве источника питания для аппарата использовался литий-ионный аккумулятор. В связи с тем, что планировались работы в Арктике подо льдом Северного Ледовитого океана, потребовался аппарат, способный преодолевать большие расстояния. Для увеличения дальности хода в 2003 г. источник питания был заменен на топливные элементы. На аппарате поставлены две топливных батареи мощностью по 2 кВт и напряжением 120 В. Кроме них в гибридную систему энергоснабжения входит литий-ионная батарея емкостью 30 а./ч, используемая на пиковых нагрузках. В отличие от топливных элементов, использующихся в воздушной среде, в АНПА URASHIMA система топливных элементов полностью замкнутого цикла. Топливные элементы помещены в изготовленный из титанового сплава сосуд под давлением. Газообразный кислород подается из кислородного баллона высокого давления (14,7 Мпа). Водород поступает из сосуда высокого давления с металлогидридом. Гидрид металла выделяет водород при нагреве теплой водой, подаваемой из батареи. Для получения 1 кг водорода необходимо 66 кг гидрида. Не прореагировавший газ рециркулируется в системе, а получившаяся в реакции вода собирается в резервуаре с реакционной водой в корпусе топливных элементов под давлением (рис. 1) [2, 3].

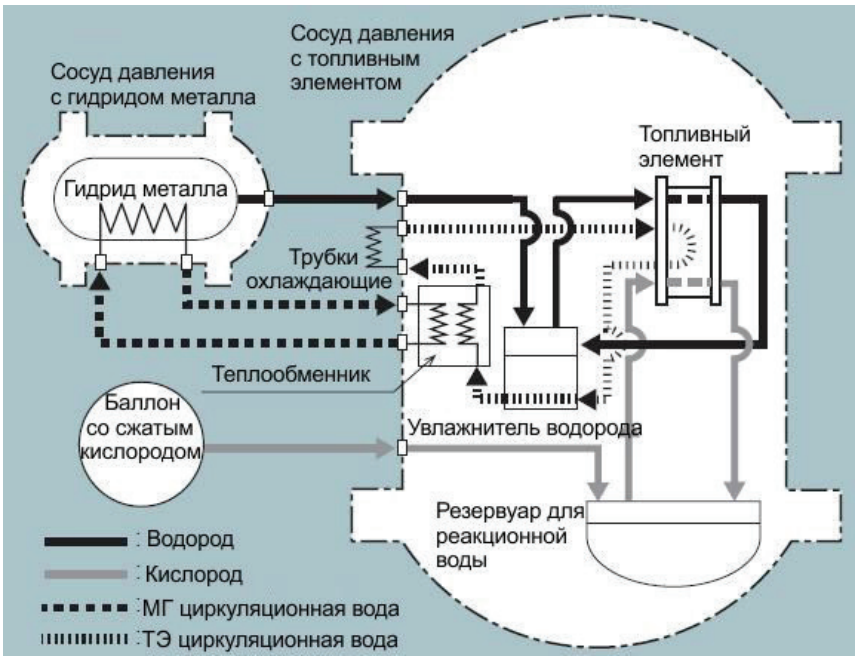


Рис. 1. Блок-схема энергетической топливной системы АНПА URASHIMA

Примерные характеристики АНПА URASHIMA (рис. 2): размеры, м – 10,7×1,3×1,5, вес на воздухе – 10 т, максимальная рабочая глубина – 3500 м, максимальная дальность хода – 300 км, скорость – 1,55 м/с.

Дальность плавания АНПА URASHIMA с аккумуляторными батареями была больше 100 км, а после установки батареи топливных элементов превысила 300 км. В феврале 2005 г. АНПА URASHIMA в непрерывном автономном режиме прошел 317 км на глубине 800 м со средней скоростью 1,55 м/с.

JAMSTEC совместно с компанией Mitsubishi Heavy Industries продолжили работы над АНПА второго поколения с большей дальностью плавания. Для этого в компании Mitsubishi Heavy Industries разработали систему топливных элементов HEML с твердополимер-

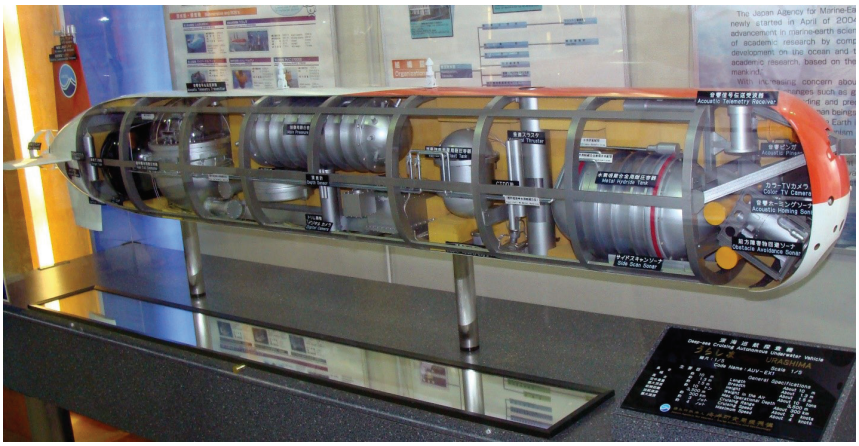


Рис. 2. Макет АНПА URASHIMA в штаб-квартире JAMSTEC в Йокосука

ной мембраной (High-Efficiency Multi-Less – высокоэффективная система без вентилятора, увлажнителя и без утечек). В частности, в конструкции используется клапан для переключения между входной и выходной сторонами батареи топливных элементов через фиксированные интервалы – конфигурация, которая устранила необходимость в вентиляторе и увлажнителе, что позволило уменьшить размер системы. Прототип системы, состоящий из двух батарей топливных элементов мощностью 150 Вт, электронного контроллера и сосуда под давлением к январю 2011 г. осуществил 600 ч непрерывной выработки электроэнергии в лабораторных условиях. В ноябре 2013 г. система топливных элементов была установлена на исследовательской подводной буксируемой системе Deep Tow компании JAMSTEC. Система была погружена на глубину 180 м, и топливные элементы обеспечивали электропитанием две единицы наблюдательной аппаратуры. На этом принципе может быть создана компактная система топливных элементов для подводных аппаратов мощностью несколько киловатт [4, 5].

АНПА DeepC

Работы по проекту АНПА DeepC начаты в 2001 г. компанией Atlas Elektronik при финансировании Федерального министерства образования и исследований Германии. Atlas Elektronik – это военно-морское предприятие по производству электроники и гидролокационных систем, базирующееся в Бремене (Германия).

АНПА DeepC состоит из трех корпусов [6] (рис. 3): в двух верхних двигательных корпусах помещены топливные батареи с протонообменными мембранами, а в нижнем корпусе размещают полезную нагрузку. Для достижения оптимального веса аппарата часть элементов выполнена из углепластика.

Система энергоснабжения аппарата состоит из двух топливных батарей, по 30 ячеек в каждой, суммарной мощностью 3,6 кВт. Каждая батарея размещена в отдельном корпусе, для обеспечения безопасности они помещены в герметичные камеры с предохранительными клапанами. Водород и кислород подаются из газовых баллонов, давление в них 35 и 25 МПа соответственно, при этом может быть произведено 140 кВт.ч электроэнергии.

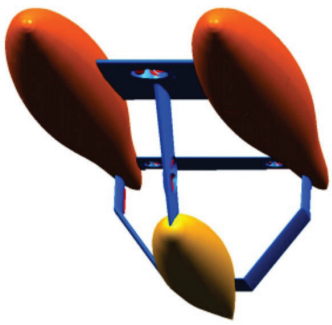


Рис. 3. АНПА DeepC

Основные характеристики АНПА DeepC: глубина погружения до 4000 м (раздавливание на 6000 м), вес на воздухе 2,4 т, крейсерская скорость 2м/с, максимальная скорость 3м/с, продолжительность миссии до 80 ч, запас хода до 400 км, полезная нагрузка 250 кг. Работы по проекту завершены в 2004 году глубоководными испытаниями, которые прошли успешно [7, 8].

АНПА IDEFX

В 2005 г. французская компания HELION, занимающаяся водородной энергетикой, приступила к разработке системы топливных элементов для АНПА. Эту систему адаптировали для установки в существующий АНПА IDEFX Французского научно-исследовательского института эксплуатации моря (IFREMER).

Батарея топливных элементов состояла из 63 ячеек с протонообменными мембранами. Мощность ее составляла 1,5 кВт при напряжении 48 В. Эффективность системы 55%. Непрореагировавшие водород и кислород проходят через батарею, и поток этих газов уносит воду. Газы отделяются от воды и направляются на рециркуляцию, что обеспечивает полное потребление реагентов. Таким образом, при работе под водой не требуется продувка. Вода собирается в резервуаре внутри системы, чтобы поддерживать постоянную плавучесть АНПА.

Система топливных элементов с замкнутым циклом, в которую входят батарея и контроллер, помещена в алюминиевый резервуар, заполненный азотом под давлением. Инертная среда предотвращает образование взрывоопасной смеси водорода и кислорода при их возможной утечке. Батарея работает при низкой температуре (около 70°С), поддерживаемой охлаждающим контуром. Теплообменник этого контура прижат к корпусу аппарата для отвода тепла в море.

Газы хранятся в обычных стальных баллонах объемом 50 л: два баллона с водородом под давлением 30 Мпа и один баллон с кислородом под давлением 25 МПа. Это обеспечивает для системы топливных элементов запас энергии в 36 кВт/ч. Система топливных элементов и хранилище реагентов представляют собой дополнительную секцию АНПА массой 800 кг и длиной 1,5 м.

Исходный аппарат был оснащен литий-ионными аккумуляторами емкостью 10 кВт/ч. Система топливных элементов увеличивает запас энергии до 46 кВт/ч. При этом масса АНПА равна 1600 кг, а длина – 6 м. Сначала эта система была проверена в бассейне. Затем, в октябре 2009 г., этот аппарат в ходе морских испытаний совершил 7 погружений с заправ-

кой газами на корабле перед каждым погружением. Максимальная глубина погружения была 400 м [9].

АНПА Solus

Канадская морская технологическая компания Cellula Robotics в 2018 г. начала проектирование АНПА Solus-LR с источником энергии на водородных топливных элементах и литий-ионной вторичной аккумуляторной батареей. Сжатые водород и кислород хранятся в баллонах высокого давления. В следующем году построенный аппарат был готов к испытаниям в фьорде Индиан-Арм, Британская Колумбия. Осенью 2020 г. компания сообщила о завершении ходовых испытаний аппарата. АНПА Solus-LR имеет такие предварительные характеристики: дальность подводного плавания 2000 км, длина 8,5 м, диаметр 1 м, вес 3700 кг (на воздухе), скорость 0,7–2 м/с, водоизмещение системы переменной плавучести 50 кг, водородно-кислородный топливный элемент высокого давления с полезной энергией 250 кВт/ч (рис. 4), автономность 360 ч при скорости 1,5 м/с, глубина погружения до 3000 м. В АНПА используется литий-ионная внутренняя вторичная батарея в пиковом режиме.

На основе опыта создания этого АНПА был создан аппарат Solus-XR большего размера и с большей дальностью хода (рис. 5). Этот аппарат может перемещаться непосредственно из порта в порт и ему не требуются вспомогательные суда. Компания Cellula Robotics 30 августа 2023 г. объявила о начале ходовых испытаний АНПА Solus-XR [10, 11]. АНПА Solus-LR имеет такие предварительные характеристики: дальность подводного плавания 2000 км, длина 8,5 м, диаметр 1 м, вес 3700 кг (на воздухе), скорость 0,7–2 м/с,

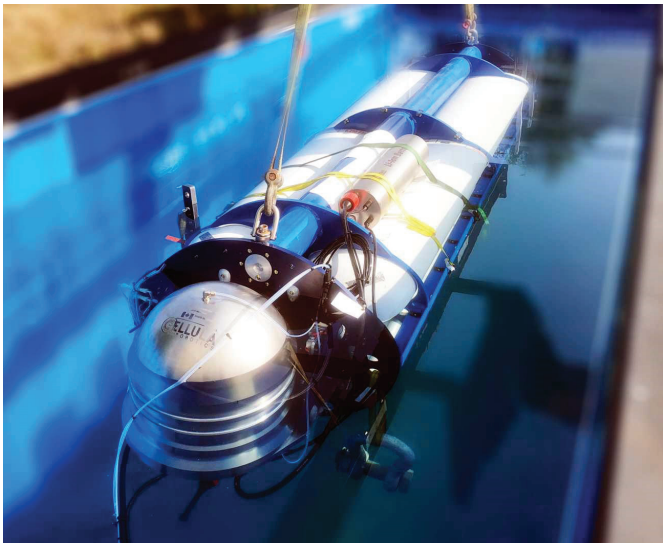


Рис. 4. Водородно-кислородный топливный элемент высокого давления с литий-ионной батареей АНПА Solus-LR

Рис. 5. АНПА Solus-XR

водоизмещение системы переменной плавучести 50 кг, водородно-кислородный топливный элемент высокого давления с полезной энергией 250 кВт/ч (рис. 4), автономность 360 ч при скорости 1,5 м/с, глубина погружения до 3000 м. В АНПА используется литий-ионная внутренняя вторичная батарея в пиковом режиме.

Топливные элементы

В топливных элементах происходит непосредственное прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую энергию. В качестве топлива используются водород, а также метан, метанол и пр., а окислителем является кислород, в основном из воздуха. Наиболее хорошо освоено промышленное производство низкотемпературных топливных элементов с рабочей температурой ниже 200°С. Эффективность таких элементов достигает 60%. А если использовать и тепло реакции, например, в паросиловой установке, то эффективность достигает 75 %. Анод и катод, на которых происходят реакции окисления и восстановления выполнены обычно из платины, которая является катализатором. Платина обычно наносится на пористый материл с высокой удельной поверхностью, например, углерод. Ведется поиск более дешевых эффективных катализаторов. Электроды разделяет среда, пропускающая ионы, но не проводящая электроны. В низкотемпературных топливных элементах это раствор щелочи или протонообменная полимерная мембрана. Для высоких температур используется раствор ортофосфорной кислоты, а для более высоких температур – расплав карбонатов и керамические оксидные мембраны.

В последнее время уделяется внимание развитию топливных элементов, в которых в качестве топлива используют спирты или карбоновые кислоты, в связи с их компактностью и удобством хранения топлива.

Но пока удельные характеристики таких топливных элементов на порядок ниже, чем у водородно-воздушных [12].

Теоретическая расчетная ЭДС одной ячейки топливного элемента на водороде и кислороде равна 1,23 В. Реальное напряжение на этой ячейке будет ниже из-за омического сопротивления электролита и электродов и поляризации анода и катода, и для большинства топливных элементов оно равно 0,8–0.9 В. Поэтому для получения необходимого напряжения ячейки соединяются последовательно по току и складываются в стопку, образуя батарею топливных элементов.

В отличие от топливных элементов, эксплуатируемых на воздухе, для топливных элементов на АНПА необходим источник кислорода. Они работают по замкнутому циклу с рециркуляцией реагентов и сбором образовавшейся в реакции воды, так как надо поддерживать постоянную плавучесть. Также необходимо рациональное размещение батареи топливных элементов и резервуаров с реагентами, чтобы не изменялся дифферент аппарата по мере выработки реагентов.

До настоящего времени в АНПА использовались низкотемпературные топливные элементы с протонообменными мембранами или щелочные. В разрабатываемых АНПА предполагается использование топливных элементов таких же типов.

Протонообменные мембраны обычно изготавливаются из перфторсульфоновой кислоты (коммерческие названия Nafion и Aquivion). Топливные элементы с протонообменными мембранами (ТЭПМ) имеют следующие преимущества: простота герметизации, могут работать при низких температурах, небольшой вес и высокая удельная мощность, которая может быть с ними получена. К недостаткам ТЭПМ относятся следующие: необходимость соблюдать баланс воды на мембране, т.к. при излишке воды будет затруднено поступление кислорода в топливный элемент, а при высыхании мембраны возрастет ее сопротивление; возможность отравления катализатора примесями в реагентах, а ионы металлов в топливе или ионы, образующиеся при коррозии элементов конструкции, могут нарушать протонную проводимость мембраны; ограничение рабочей температуры сверху, так как при высокой температуре мембрана высохнет.

В качестве электролита в щелочных топливных элементах (ЩТЭ) чаще используют водные растворы гидроксида калия [13]. Электролит может быть матричным, когда он удерживается в пористой матрице (обычно асбестовой), или свободным, циркулирующим между электродами. Для топливных элементов наиболее освоены технология и использование щелочных топливных элементов. Они применялись на американских и советских космических аппаратах: Аполлон, Шаттл, Буран. Также щелочные топливные элементы использовались в энергетической установке мощностью 280 кВт советской подводной лодки «Катран» проекта 613Э. Она успешно прошла государственные испытания в 1988 г.

Преимуществом щелочных топливных элементов по сравнению с другими низкотемпературными топливными элементами является большая эффективность при тех же плотностях тока, лучшая вольт-амперная характеристика [14]. Щелочные топливные элементы более дешевы по сравнению с другими топливными элементами. К большему удешевлению может привести еще и то, что в качестве воздушного электрода можно использовать электроды, не содержащие благородные металлы. Однако в настоящее время это ведет к понижению КПД и удельной мощности [13].

Основным недостатком щелочных топливных элементов считается карбонизация электролита углекислым газом, содержащимся в воздухе. Но при использовании чистых кислорода и водорода в топливных элементах для АНПА, а также для космических аппаратов это исключается.

Блоки топливных элементов обеспечивают генерацию энергии для АНПА. Так как на элементы конструкции АНПА налагаются ограничения по массе и объему, то одно из основных требований к ТЭ, применяемым в АНПА, – высокая удельная мощность и плотность энергии. В связи с тем, что коммерческие АНПА с топливными элементами только еще создаются, то и коммерческие топливные элементы для этого еще только разрабатываются [5]. В таблице приведены характеристики разных типов топливных элементов. По удельным энергетическим параметрам ТЭ для БПЛА ближе всего к ТЭ для АПНА, весовые требования для которых даже жестче.

ТЭПМ BZM компании Siemens – это развитие серии топливных элементов SINAVY, разработанных изначально в сотрудничестве с ВМС Германии и компанией и HDW, которая в настоящее время называется ThyssenKrupp Marine Systems - tk MS [21, 22]. ТЭПМ BZ100 использовался в АНПА DeepC [5]. ТЭПМ BZM34 устанавливаются на дизель-эликтрические подводные лодки проекта 212А немецко-итальянского производства. На этих подводных лодках дизели используются для движения на поверхности и для зарядки аккумуляторов, а топливные элементы – для энергообеспечения экономичного подводного хода. На подводной лодке проекта 2121А девять

Характеристики топливных элементов

Топливный элемент	КПД, %	Напряжение, В	Мощность, кВт	Удельная мощность, Вт/кг	Плотность энергии, Вт/л	Рабочая температура, °С
Энергетические установки космических аппаратов на ЩТЭ [13]						
Апполон	63	26,5–31	3–0,9	8		200–260
Шаттл	60	27,5–32	3–7	62,5		82–110
Буран	60	30,5–34	4–10	62,5		85–100
Топливные элементы с протонообменной мембраной						
Подборка из нескольких ТЭПМ разных фирм [15]	49–50		0,01–200	10,9–449	14,7–471	50–80
ТЭПМ в АНПА						
BZ100 [5]			1,2	78	127	
ТЭ HELION [9]	55	48	1,5			70
BZM34 [16]	59	52,3	35,4			80
ТЭ Корпорации аэрокосмической науки и технологий (CASC), КНР [16]	61	135	32,5			80
SuZhou Hydrogine Power Technology Co., Ltd., КНР [17]		15	0,95	250	396	
ТЭПМ для БПЛА [5]						
Protonex* UAV C250			0,25	208	185	
Protonex Ion Tiger UAV (NRL)			0,55	550		
Horizon** AEROSTACK A-1000			1	571	224	
Horizon AEROSTACK A-500			0,5	434	162	
Коммерческие ТЭПМ [5]						
Horizon 100W [18,19]	40	9,6	0,1	250	130	65
Horizon H500XP [5,19]	56	21	0,5	86	316	63
Horizon H1000XP [5,19]	48	30	1	169	179	65
Horizon H-500 [5,19]	40	14,4	0,5	196	117	65
Horizon H-1000 [5,19]	40	28,8	1	250	139	65
Horizon H-2000 [5,19]	40	28,8	2	200	103	65
Siemens BZM 34kW			34	52	102	
Siemens BZM 120kW			120	133	257	
ТЭ «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [20]						
БТЭ-50	60	137–180	50	68	111	60
БТЭ-100	60	345–420	100	250	500	60

*Компания Protonex (США) разрабатывает и производит ТЭ для мобильных и портативных устройств в диапазоне от 100 до 1000 Вт. Использует технологии ТЭПМ и твердооксидные ТЭ.

**Horizon Fuel Cell Technologies – производитель водородных топливных элементов с протонообменными мембранами, находится в Сингапуре. Компания основана в 2003 году, производит весь спектр ТЭПМ от малоразмерных до многокиловаттных.

батарей BZM34: восемь рабочих общей мощностью 272 кВт и одна в резерве [23]. Продолжая работу над топливными элементами для воздухонезависимых подводных аппаратов, Siemens разработала топливный элемент четвертого поколения BZM evo. Мощность одиночного модуля BZM evo 40 кВт [21]. Помимо установки ТЭ BZM evo на подводные лодки с воздухонезависимыми двигательными установками ими могут оснащаться и АНПА (рис. 6) [22]. Эта серия топливных элементов может обеспечить мощность от 5 до 60 кВт.

В филиале «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» (ЦНИИ СЭТ), ФГУП «Крыловский государственный научный центр» разрабатывают и создают батареи топливных элементов с твердополимерными мембранами и установки для производства водорода из углеводородов методом паровой конверсии, раз-

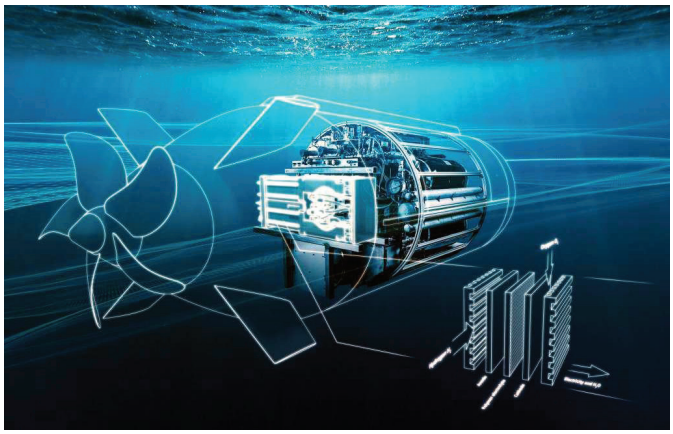


Рис. 6. Демонстрационная модель ТЭ Siemens внутри АНПА

рабатывают технологию интерметаллидных систем хранения водорода [20]. В 2012–2014 гг. разработали и создали опытные образцы батарей топливных элементов с протонообменной мембраной мощностью 5 кВт (БТЭ-84) и 50 кВт (БТЭ-50В) (рис. 7). Батареи топливных элементов большой мощности могут использоваться на морском и наземном транспорте, а также на стационарных объектах.

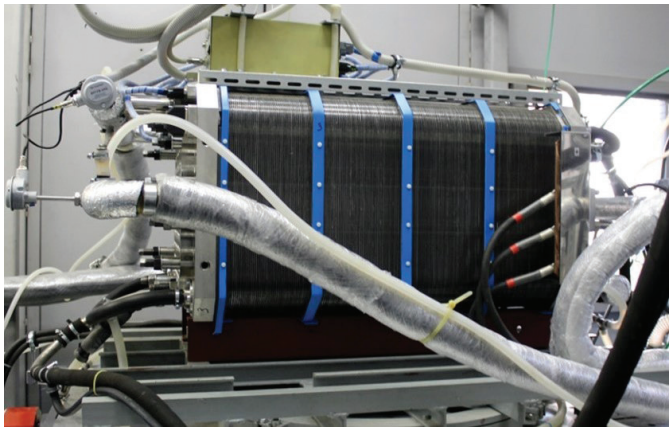


Рис. 7. Батарея топливных элементов «ЦНИИ СЭТ» БТЭ-50

В России разработкой энергетической установки АНПА на основе ТЭ занимаются в НПО «Аврора» [24]. Они выбрали вариант ЩТЭ с хранением реагентов в баллонах высокого давления, так как достоинством таких ТЭ является минимальный расход реагентов и использование отечественных компонентов и комплектации. Недостаток – более высокие требования к чистоте реагентов. Макет батареи ЩТЭ для АНПА будет изготовлен на предприятии ООО «НПО «Центротех» (г. Новоуральск), где на Уральском электрохимическом комбинате, вошедшем потом в состав этого НПО, и ранее занимались разработкой и производством топливных элементов [14].

Заключение

В последнее время значительно возросла роль беспилотных аппаратов разных типов: подводных, надводных и воздушных, приводимых в движение электродвигателями. Для длительного автономного функционирования таких аппаратов необходимы источники энергии большой емкости. В качестве таких источников энергии в первую очередь могут рассматриваться топливные элементы с запасом реагентов. Сделанный обзор показывает, что в создании ТЭ для АНПА все еще только в начале пути. Разработка и создание таких ТЭ сложны и требуют высоких затрат. Но все равно уже созданные ТЭ имеют более высокую удельную энергию, чем обычно используемые в АНПА литий-ионные батареи. И уже созданные АНПА с ТЭ осуществили рекордные миссии под водой по продолжительности и дальности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цзян Х. Протонообменные мембранные топливные элементы // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 7–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/protonoobmennye-membrannye-toplivnye-elementy/viewer
2. Performance of the fuel cell underwater vehicle URASHIMA / Sawa T. [and others] // Acoustical Science and Technology. Japan Science and Technology Information Aggregator. 2005. Vol. 26, No. 3. P. 249–257. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ast/26/3/26_3_249/_pdf/-char/en
3. Fuel Cell AUV "URASHIMA"/ Maeda T. [and others] // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. 2006. Vol. 43, No. 1. URL: https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e431/e431024.pdf
4. Innovative Marine-use Fuel Cell System Marks World First Passing Trial Operation in Actual Marine Setting // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Press Information. Tokyo, 2013. No. 1734. URL: https://www.mhi.com/news/1311131734.html
5. Mendez A., Leo T. J., Herreros M. A. Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: state of art // Conference Proceedings Paper. 1st International e-Conference on Energies. 2014. P. 1–19. URL:https://sciforum.net/manuscripts/2345/manuscript.pdf
6. Hornfeld W. DeepC – the new deep Water AUV generation // Proceedings of OMAE03 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Cancun: Mexico, 2003. OMAE2003-37358. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1115/omae2003-37358
7. Hornfeld W. AUV DeepC: Technology Platform for the Atlas Elektronik AUV Family // ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. URL: https://www.researchgate.net/publication/267603647
8. Reviews of fuel cells and energy storage systems for unmanned undersea vehicles / Jun Lu [and others] // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2020. P. 1–22. URL:https://www.sci-hub.ru/10.1080/15567036.2020.1795313
9. Raugel E., Rigaud V., Lakeman Ch. Sea experiment of a survey AUV powered by a fuel cell system // Autonomous Underwater Vehicles (AUV). IEEE, 2010. IEEE/OES. Monterey, CA, 2010. 978-1-61284-980-5 URL: https://www.researchgate.net/publication/251995078
10. Solus-LR Autonomous Underwater Vehicle // Cellula Robotics. URL: https://www.cellula.com/solus-lr
11. Solus-XR Autonomous Underwater Vehicle // Cellula Robotics.URL: https://www.cellula.com/solus-xr
12. Добровольский Ю.А., Волков Е.В., Писарева А.В., Федотов Ю.А., Лихачев Д.Ю., Русанов А.Л. Протонообменные мембраны

для водородно-воздушных топливных элементов // Российский химический журнал. Т. L, № 6. С. 95–104. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/protonoobmennye-membrany-dlya-vodorodno-vozdushnyh-toplivnyh-elementov/viewer

13. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Водно-щелочные топливные элементы // Транспорт на альтернативном топливе. 2016. № 3 (51). С. 41–50. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/vodno-schelochnye-toplivnye-elementy/viewer

14. Кондратьев Д.Г., Матрёнин В.И., Овчинников А.Т., Поспелов Б.С., Соловьёв Г.С., Стихин Ас., Тихонов В.Н., Шихов Е.Г., Щипанов И.В. Перспективы использования щелочных топливных элементов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ. 2006. № 10 (42). С. 14–18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-schelochnyh-toplivnyh-elementov-1/viewer

15. d'Amore-Domenech R., Raso M.A., Herreros A.V., Santiago Ó., Arévalo E., Leo T. J. Autonomous underwater vehicles powered by fuel cells: Design guidelines // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 387–398. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801818301392

16. Lu J., Tang T., Bai C., Gao H., Wang J., Li C., Gao Y., Guo Zh., Zong X. Reviews of fuel cells and energy storage systems for unmanned undersea vehicles // Energy Sources, Part A,: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2020. P. 1–22. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1080/15567036.2020.1795313

17. Xiu X., Ma S., Yu J., Wang S. Performance analysis and demonstration of fuel cell/battery hybrid system for unmanned undersea vehicles // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 575. 233151. URL: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233151

18. Albarghot M.M., Iqbal M.T., Pope K., Rolland L. Sizing and Dynamic Modeling of a Power System for the MUN Explorer Autonomous Underwater Vehicle Using a Fuel Cell and Batteries // Journal of Energy. 2019. Vol. 2019. Article ID 4531497. URL: https://doi.org/10.1155/2019/4531497

19. H-SERIES // Horizon Fuel Cell Technologies. Catalogs. URL: https://pdf.directindustry.com/pdf/horizon-fuel-cell-technologies-62133.html

20. Опыт разработок филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» энергоустановок на топливных элементах транспортного и стационарного применения // ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Санкт-Петербург. 2020. URL: https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf_new.pdf

21. Siemens presents the new variable BZM evo series for underwater application // Press release. Siemens. 2019. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9c848718-d39e-4b30-b857-1d862eb13dde/PR201908165332EN.pdf

22. Moersch M. The 4th generation of Siemens fuel cell modules for submarine propulsion // UDT Extended Abstract. 2020. URL: https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion__96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/UDT-2020/media/libraries/draft-abstracts--slides/22-Michael-Moersch.pdf

23. New "BZM evo" AIP PEM fuel cells to be on 212CD submarines? // Submarine & Other Matters. 2021. URL: https://gentleseas.blogspot.com/2021/01/the-new-bzm-evo-aip-pem-fuel-cell-to-be.html

24. Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Ларионов М.В., Сурин С.Н. Интегрированный подход к энергообеспечению автономных необитаемых подводных аппаратов // Морской вестник. 2020. № 3(75). С. 91–94.

Справка об авторах

КНЯЖЕВ Валерий Викторович, к.т.н., лаборатория энергетики подводных робототехнических комплексов, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, энергоснабжение АНПА

E-mail: kvv@marine.febras.ru

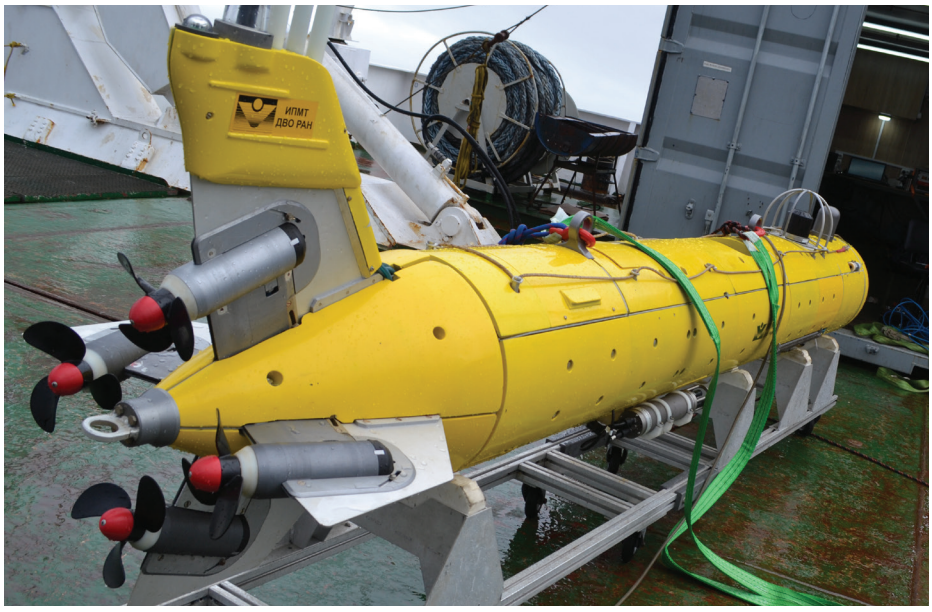
ЛОЩЕНКОВ Владимир Васильевич, лаборатория энергетики подводных робототехнических комплексов, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

Адрес места работы: г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, энергоснабжение АНПА

E-mail: lvv@marine.febras.ru



Для цитирования:

Княжев В.В., Лощенков В.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 4 (50). С. 11–20. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_02. EDN: EOBTLX.

DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_02

FUEL CELLS FOR AUV POWER SUPPLY

V.V. Knyazhev, V.V. Loshchenkov

It is necessary to increase the duration of autonomous continuous operation of autonomous uninhabited underwater vehicles and their cruising range, therefore, powerful and energy-intensive energy sources are needed to power the on-board instruments and propulsion system of the vehicle. The article examines the possibility of powering autonomous uninhabited underwater vehicles from fuel cells - electrochemical current sources powered by oxygen and fuel, which is currently primarily used as hydrogen. A review of the built and tested autonomous uninhabited underwater vehicles equipped with fuel cells with reagent storage systems: hydrogen and oxygen, and what results were obtained in these tests is made. The different types of fuel cells, their advantages and disadvantages are described. Special requirements for fuel cells for autonomous uninhabited underwater vehicles are given. The characteristics of foreign and domestic fuel cells, which were used in experimental devices and those that are mass-produced and commercially supplied for stationary facilities, land and sea transport, and for air-independent power plants of submarines, are reviewed and analyzed. The relevance of using energy systems with fuel cells for power supply of underwater, surface and aerial autonomous unmanned vehicles is noted.

Keywords: autonomous uninhabited underwater vehicles, AUVs, energy sources, fuel cells, proton exchange membranes, alkaline fuel cells, battery, hydrogen, oxygen.

References

1. Czjan H. Protonoobmennye membrannye toplivnye jelementy. Global'naja jenergija. 2023. Vol. 29, No. 3. P. 7–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/protonoobmennye-membrannye-toplivnye-elementy/viewer. (In Russ.).

2. Performance of the fuel cell underwater vehicle URASHIMA. Sawa T. [and others]. Acoustical Science and Technology. Japan Science and Technology Information Aggregator. 2005. Vol. 26, No. 3. P. 249–257. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ast/26/3/26_3_249/_pdf/-char/en

3. Fuel Cell AUV "URASHIMA"/ Maeda T. [and others]. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. 2006. Vol. 43, No. 1. URL: https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e431/e431024.pdf

4. Innovative Marine-use Fuel Cell System Marks World First Passing Trial Operation in Actual Marine Setting. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Press Information. Tokyo, 2013. No. 1734. URL: https://www.mhi.com/news/1311131734.html

5. Mendez A., Leo T. J., Herreros M. A. Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: state of art. Conference Proceedings Paper. 1st International e-Conference on Energies. 2014. P. 1–19. URL:https://sciforum.net/manuscripts/2345/manuscript.pdf

6. Hornfeld W. DeepC – the new deep Water AUV generation. Proceedings of OMAE03 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Cancun: Mexico, 2003. OMAE2003-37358. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1115/omae2003-37358

7. Hornfeld W. AUV DeepC: Technology Platform for the Atlas Elektronik AUV Family. ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. URL: https://www.researchgate.net/publication/267603647

8. Reviews of fuel cells and energy storage systems for unmanned undersea vehicles / Jun Lu [and others]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2020. P. 1–22. URL:https://www.sci-hub.ru/10.1080/15567036.2020.1795313

9. Raugel E., Rigaud V., Lakeman Ch. Sea experiment of a survey AUV powered by a fuel cell system. Autonomous Underwater Vehicles (AUV). IEEE, 2010. IEEE/OES. Monterey, CA, 2010. 978-1-61284-980-5 URL: https://www.researchgate.net/publication/251995078

10. Solus-LR Autonomous Underwater Vehicle. Cellula Robotics. URL: https://www.cellula.com/solus-lr

11. Solus-XR Autonomous Underwater Vehicle. Cellula Robotics. URL: https://www.cellula.com/solus-xr

12. Dobrovol'skij Ju.A., Volkov E.V., Pisareva A.V., Fedotov Ju.A., Lihachev D.Ju., Rusanov A.L. Protonoobmennye membrany dlja vodorodno-vozdushnyh toplivnyh jelementov. Rossijskij himicheskij zhurnal. Vol. L, No. 6. P. 95–104. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/protonoobmennye-membrany-dlya-vodorodno-vozdushnyh-toplivnyh-elementov/viewer. (In Russ.).

13. Kozlov S.I., Fateev V.N. Vodno-shhelochnye toplivnye jelementy. Transport na al'ternativnom toplive. 2016. No. 3 (51). P. 41–50. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/vodno-schelochnye-toplivnye-elementy/viewer. (In Russ.).

14. Kondrat'ev D.G., Matrjonin V.I., Ovchinnikov A.T., Pospelov B.S., Solov'jov G.S., Stihin As., Tihonov V.N., Shihov E.G., Shhipanov I.V. Perspektivy ispol'zovanija shhelochnyh toplivnyh jelementov. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaja jenergetika i jekologija» AJeJe. 2006. No. 10 (42). P. 14–18. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-schelochnyh-toplivnyh-elementov-1/viewer. (In Russ.).

15. d'Amore-Domenech R., Raso M.A., Herreros A.V., Santiago Ó., Arévalo E., Leo T. J. Autonomous underwater vehicles powered by fuel cells: Design guidelines. Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 387–398. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801818301392

16. Lu J., Tang T., Bai C., Gao H., Wang J., Li C., Gao Y., Guo Zh., Zong X. Reviews of fuel cells and energy storage systems for unmanned undersea vehicles. Energy Sources, Part A,: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2020. P. 1–22. URL:https://www.sci-hub.ru/10.1080/15567036.2020.1795313

17. Xiu X., Ma S., Yu J., Wang S. Performance analysis and demonstration of fuel cell/battery hybrid system for unmanned undersea vehicles. Journal of Power Sources. 2023. Vol. 575. 233151. URL: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233151

18. Albarghot M.M., Iqbal M.T., Pope K., Rolland L. Sizing and Dynamic Modeling of a Power System for the MUN Explorer Autonomous Underwater Vehicle Using a Fuel Cell and Batteries.

Journal of Energy. 2019. Vol. 2019. Article ID 4531497. URL:https://doi.org/10.1155/2019/4531497

19. H-SERIES. Horizon Fuel Cell Technologies. Catalogs. URL: https://pdf.directindustry.com/pdf/horizon-fuel-cell-technologies-62133.html

20. Opyt razrabotok filiala «CNII SJeT» FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr» jenergoustanovok na toplivnyh jelementah transportnogo i stacionarnogo primenenija. FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr». Sankt-Peterburg. 2020. URL: https://portal.tpu.ru/files/conferences/htf/landgraf_new.pdf. (In Russ.).

21. Siemens presents the new variable BZM evo series for underwater application. Press release. Siemens. 2019. URL:https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9c848718-d39e-4b30-b857-1d862eb13dde/PR201908165332EN.pdf

22. Moersch M. The 4th generation of Siemens fuel cell modules for submarine propulsion. UDT Extended Abstract. 2020. URL: https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion__96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/UDT-2020/media/libraries/draft-abstracts--slides/22-Michael-Moersch.pdf

23. New "BZM evo" AIP PEM fuel cells to be on 212CD submarines? Submarine & Other Matters. 2021. URL: https://gentleseas.blogspot.com/2021/01/the-new-bzm-evo-aip-pem-fuel-cell-to-be.html

24. Bakumenko L.G., Djadik A.N., Larionov M.V., Surin S.N. Integrirovannyj podhod k jenergoobespecheniju avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov. Morskoj vestnik. 2020. No. 3(75). P. 91–94.

About the authors

KNYAZHEV Valeriy Viktorovich, Ph.D., Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems, Senior Researcher

Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS).

Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a

Research interests: renewable energy sources, power supply for AUVs.

E-mail: kvv@marine.febras.ru

LOSHCHENKOV Vladimir Vasilievich, Laboratory of Energy of Underwater Robotic Systems, Researcher

Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS).

Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a

Research interests: renewable energy sources, power supply for AUVs.

E-mail: lvv@marine.febras.ru