

УДК 620.9:629.78

ОТ ЭНЕРГЕТИКИ ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН» К ЭНЕРГЕТИКЕ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ И СТАНЦИЙ

© 2013 г. Матренин В.И.¹, Овчинников А.Т.¹, Поспелов Б.С.¹, Соколов Б.А.², Стихин А.С.¹

¹ООО «Завод электрохимических преобразователей» (ЗЭП),
г. Новоуральск, Свердловская область, Россия, e-mail: zep@novozep.ru

²ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва» (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Подведены итоги разработки электрохимических генераторов «Волна» и «Фотон» для Лунной программы Советского Союза и космического корабля «Буран». Проведено сравнение с зарубежными разработками. Экспериментально подтверждена возможность хранения изготовленных электрохимических генераторов без какого-либо обслуживания и изменения электрохимических характеристик в течение 15 и более лет. Представлены направления дальнейших разработок, и показана возможность использования результатов разработки в других областях: никель-водородные аккумуляторы, глубоководные аппараты, автомобили. В перспективе подобные генераторы могут быть использованы в системах хранения электроэнергии на лунной базе и в источниках бесперебойного (аварийного) питания на Земле.

Ключевые слова: орбитальный корабль, водородно-кислородные топливные элементы, щелочной, матричный, электрохимический генератор.

FROM POWER SYSTEM OF BURAN ORBITER TO POWER SYSTEM OF SPACE VEHICLES AND STATIONS

Matrenin V.I.¹, Ovchinnikov A.T.¹, Pospelov B.S.¹, Sokolov B.A.², Stikhin A.S.¹

¹Electrochemical Transducers Plant (ETP),
Novouralsk, Sverdlovsk Region, Russia, e-mail: zep@novozep.ru

²S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia, e-mail: post@rsce.ru

The development of electrochemical generators Volna and Foton for the Moon program of the Soviet Union and BURAN Orbiter is summarized. A comparison with foreign developments has been made. A possibility of storing manufactured electrochemical generators with no maintenance and changes in electrochemical characteristics for 15 years or more has been verified. The areas of further development are presented, and a possibility of using the development results in other areas, i.e. nickel-hydrogen batteries, deep-sea vehicles, cars is shown. In the future, these generators can be used in energy storage systems at the lunar base and in uninterrupted (emergency) power supplies on Earth.

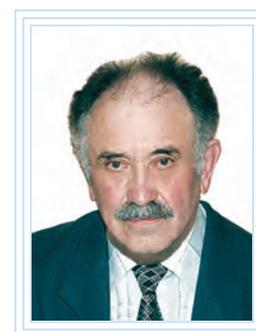
Key words: orbiter, hydrogen-oxygen fuel cells, alkaline matrix electrochemical generator.



МАТРЕНИН В.И.



ОВЧИННИКОВ А.Т.



ПОСПЕЛОВ Б.С.



СОКОЛОВ Б.А.



СТИХИН А.С.

МАТРЕНИН Владимир Иванович — первый заместитель генерального директора—начальник ОКБ ЗЭП, e-mail: zep@novozep.ru

MATRENIN Vladimir Ivanovich — First Deputy General Director, Head of ETP ОКБ

ОВЧИННИКОВ Анатолий Тихонович — ктн, инженер ЗЭП, e-mail: zep@novozep.ru

OVCHINNIKOV Anatoly Tikhonovich — Candidate of Science (Engineering), Engineer, ETP

ПОСПЕЛОВ Борис Сергеевич — ктн, инженер ЗЭП, e-mail: zep@novozep.ru

POSPELOV Boris Sergeevich — Candidate of Science (Engineering), Engineer, ETP

СОКОЛОВ Борис Александрович — дтн, профессор, советник президента РКК «Энергия», e-mail: boris.sokolov@rsce.ru

SOKOLOV Boris Alexandrovich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Adviser to the President of RSC Energia

СТИХИН Александр Семенович — генеральный директор ЗЭП, e-mail: zep@novozep.ru

STIKHIN Alexander Semenovich — General Director, ETP

Введение

Создание все усложняющихся космических аппаратов (КА) потребовало создания новых систем энергообеспечения.

Орбитальный корабль (ОК) «Буран» использовал достижения отечественной ракетно-космической техники 70–80-х годов прошлого века. Вместе с тем он явился основой для дальнейших разработок по расширению выполняемых в полете задач и совершенствованию технических решений [1].

Вновь созданная и полностью отработанная система электроснабжения ОК «Буран» мощностью 40 кВт была основана на применении кислородно-водородных электрохимических генераторов (ЭХГ) тока. Она включала в себя энергомодуль и криостаты для хранения кислорода и водорода. Система обеспечивала работу ОК в течение двухнедельного полета. В длительных полетах ОК для хранения компонентов топлива предусматривалось применение маломощных холодильных машин.

На первом летном ОК «Буран» для обеспечения двухвиткового полета основой системы электроснабжения были аккумуляторные батареи (АБ), на втором и последующих кораблях должны были использоваться ЭХГ.

За 25 лет, прошедших после успешного полета ОК «Буран», РКК «Энергия» и ее основным смежникам удалось сохранить и развить направление электрохимической энергетики как для ракетно-космической техники, так и для других областей применения.

Электрохимические генераторы для применения в космосе

Электрохимические генераторы для лунного орбитального корабля. Работы по созданию ЭХГ электрического тока на водородно-кислородных топливных элементах (ТЭ) по инициативе профессора Ю.Л. Голина и Е.А. Шадрина начались на Уральском электрохимическом комбинате (УЭХК) в 1967 г. на базе разработок и производства фильтров для диффузионного разделения изотопов урана. В 1968 г. результаты работы были доложены министру среднего машиностроения Е.П. Славскому, а затем, по его инициативе, — генеральному конструктору НПО «Энергия» академику В.П. Мишину. В мае 1969 г. по техническому заданию НПО «Энергия» был выпущен эскизный проект ЭХГ «Волна» на щелочном циркулирующем электролите для разрабатываемого в то время лунного ОК. Поставка ЭХГ «Волна»

мощностью ~1 кВт и временем работы на полезную нагрузку 500 ч началась в 1971 г., серийное производство на УЭХК и Уральском электромеханическом заводе (УЭМЗ) — в 1972 г. Генератор прошел полный цикл отработки и в 1973 г. был установлен на лунный орбитальный комплекс Н1-Л3 для его запуска к естественному спутнику Земли. Включенная на старте связка из трех ЭХГ работала в течение 107 с вплоть до аварийного возврата на Землю ракеты-носителя. Однако в 1975 г. производство ЭХГ «Волна» пришлось закрыть в связи со свертыванием в Советском Союзе работ по Лунной программе. Всего было выпущено 192 генератора «Волна».

Электрохимические генераторы для орбитального корабля «Буран». В связи с правительственным постановлением об организации работ по созданию многоразовой космической транспортной системы в 1976 г. на УЭХК и УЭМЗ была возложена ответственность за создание ЭХГ для ОК «Буран» [1].

Эскизный проект ЭХГ «Фотон» мощностью 10 кВт на щелочных матричных топливных элементах (электролит не циркулирует, как в ЭХГ «Волна», а неподвижно находится в порах асбестовой матрицы) для ОК «Буран» был защищен в НПО «Энергия» в марте 1981 г. Было организовано опытное производство, и первые поставки комплектов по четыре ЭХГ в НПО «Энергия» начались в 1983 г. Генератор прошел полный цикл наземной отработки. В 1991 г. для отработки эксплуатационной документации и действий персонала на стартовой позиции до команды «пуск» он использовался в «сухом» вывозе космической системы «Энергия–Буран». По результатам этих испытаний было дано заключение о годности ЭХГ «Фотон» к летно-конструкторским испытаниям в составе системы энергопитания корабля «Буран».

Сравнительные характеристики ЭХГ «Волна» с циркулирующим электролитом и «Фотон» с матричным электролитом приведены в табл. 1. Видно, что переход к матричному электролиту позволил существенно улучшить как электрохимические, так и массогабаритные характеристики ЭХГ на ТЭ.

Таблица 1

Характеристики ЭХГ «Волна» и «Фотон»

Характеристика	ЭХГ «Волна»	ЭХГ «Фотон»
Напряжение, В	27...37	27...37
Удельная масса, кг/кВт	65	14,5
Материал каркаса ТЭ	магний	никель
Плотность тока при номинальной мощности, мА/см ²	100	220
Ресурс, ч	500...1 000	5 000...7 000

Внешний вид рассматриваемых ЭХГ приведен на рис. 1, а их сравнительные вольт-амперные характеристики см. на рис. 4.

Следует отметить, что в процессе отработки и поставок ЭХГ для ОК «Буран» параллельно разрабатывались ЭХГ для других космических систем. В 1987 г. был разработан эскизный проект на ЭХГ «Луч» мощностью 6 кВт и временем безотказной работы 6 000 ч, предназначенный для нового многоразового космического корабля «Заря» (для ОК «Буран», по техническому заданию, время безотказной работы — 2 000 ч).

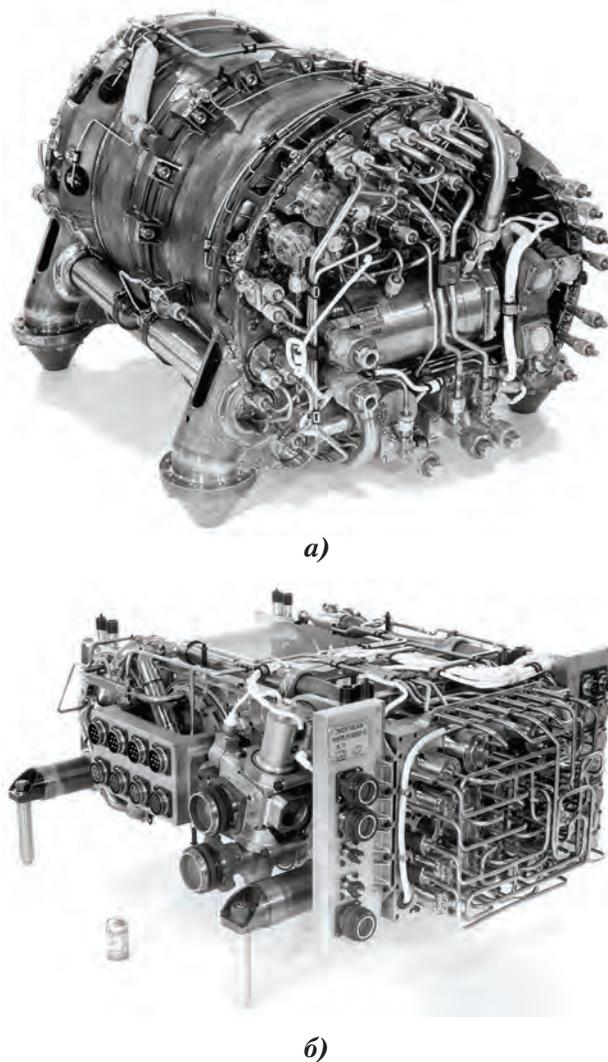


Рис. 1. Электрохимические генераторы для ОК «Буран»: а — ЭХГ «Волна»; б — ЭХГ «Фотон»

К сожалению, в 1993 г. работы по системе «Энергия–Буран» были прекращены. За время производства было изготовлено 120 генераторов, 80 из которых было поставлено в НПО «Энергия». Генератор имел высокие электрохимические характеристики, поэтому работы в конце 80-х — начале 90-х гг. были направлены на увеличение его ресурсных возможностей. В результате ресурс работо-

способности каждого из пяти последних генераторов, подвергнутых испытаниям, носящим «износный характер» — до отказов, составил 6 800 ч и более. К этому времени были изучены причины, ограничивающие ресурс ТЭ при их функционировании в составе ЭХГ, и экспериментально, на примере батареи, состоящей из 128 элементов, была показана возможность увеличения ресурса по крайней мере до 10 000 ч.

Сравнение с зарубежными разработками

Разработанный Заводом электрохимических преобразователей ОАО «УЭХК» (сейчас ООО «ЗЭП») ЭХГ «Фотон» интересно сравнить с американским генератором *PC17C*, установленным на американских челноках *Space Shuttle*. Электрохимические генераторы *PC17C*, разработанные компанией *United Technologies Corp. (UTC)*, эксплуатируются при средней температуре 90 °С и давлении кислорода и водорода 4 бар [2]. При этом не очень понятно, что входит в состав этого генератора: только энергоблок (батарея + приборы систем, обеспечивающих условия функционирования батареи ТЭ) или энергоблок с соответствующим блоком автоматики.

Разработанные для ОК «Буран» ЭХГ были высоко оценены зарубежными коллегами. В 1992 г. были проведены испытания ЭХГ «Фотон» в Европейском центре космических исследований и технологий (*ESTEC*) в г. Нордвайк (Голландия). Испытания подтвердили высокие («выдающиеся», как указано в официальных документах) тактико-технические характеристики генератора, и было высказано мнение о возможности использования этого изделия в европейских космических программах. Результаты испытаний позволили специалистам Европейского космического агентства (*ESA*) сделать заключение, что по выходным характеристикам, внутреннему сопротивлению, оперативности запуска и удобству эксплуатации ЭХГ «Фотон» не имеет аналогов в мире. Результаты испытаний опубликованы в *ESA Journal* [3].

В 1999 г. фирмой *IFC* (дочернее предприятие *UTC*) была начата программа по увеличению ресурса и повышению энергоотдачи (*LLAFC*) [2]. Фирмой были запланированы два новшества: замена никелевой сетки в кислородном электроде на перфорированную никелевую фольгу и замена концевых изолирующих плат, сделанных из *Noryl*, на платы из полиэфиркетона. Все это должно позволить увеличить ресурс с 2 600 до 5 000 ч.

ЭХГ «Фотон» (энергоблок + блок автоматики) так же, как и установленный в амери-

канских челноках *Space Shuttle* ЭХГ *PC17C*, функционирует при давлении газов 4 бар. Его рабочая температура 85 °С, напряжение ТЭ при 500 мА/см² составляет 0,92 В. Топливные элементы ЭХГ «Фотон» способны генерировать ток до 4 А/см².

Проведенная в начале 2000-х годов модернизация ЭХГ «Фотон» позволила увеличить его номинальную мощность до 40 кВт при сохранении массогабаритных характеристик. Сравнительные характеристики упомянутых выше генераторов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики ЭХГ «Фотон» и *PC17C*

Характеристика	ЭХГ <i>PC17C</i> для <i>Space Shuttle</i>	ЭХГ «Фотон» для ОК «Буран»	Модернизированный ЭХГ «Фотон»
Мощность номинальная, кВт	12	10	40
Мощность максимальная, кВт	16, в течение 15 мин	16, время не ограничено	56
Напряжение на одном ТЭ, В (номинальное)	0,88	0,95	0,81
Плотность тока, мА/см ²	470	200	1 000
Массовая удельная мощность ЭХГ, кг/кВт (номинальная)	10,6	16	4
Объемная удельная мощность ЭХГ, л/кВт (номинальная)	12,92	12,5	5
Массовая удельная мощность батареи ТЭ, кг/кВт (номинальная)	3,6	8	2
Электрохимический КПД, %	70	77	66
Ресурс, ч	2 600	6 800	6 800

Никель-водородная аккумуляторная батарея для информационного КА «Ямал-100»

Результаты разработки ТЭ для ЭХГ «Фотон» были использованы при создании никель-водородной аккумуляторной батареи (НВАБ) фильтр-прессной конструкции, в которой все аккумуляторы собраны в единую батарею и размещены в одном прочном корпусе. Водородный электрод этого аккумулятора аналогичен водородному электроду щелочного топливного элемента (ЩТЭ). В 1999 г. комплект из двух таких аккумуляторов был установлен на космический спутник-ретранслятор

«Ямал-100» и успешно обеспечивал его функционирование в течение более 10 лет [4]. Внешний вид аккумулятора приведен на рис. 2.

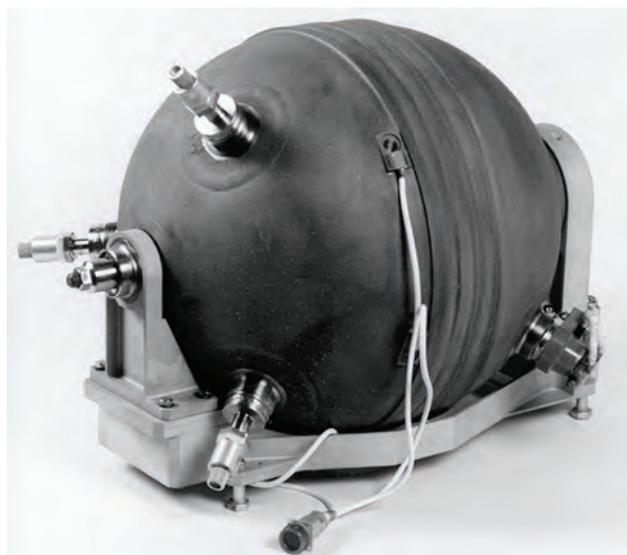


Рис. 2. Никель-водородная аккумуляторная батарея 18 НВ-85 для КА «Ямал-100»

Его характеристики следующие:

- номинальная электрическая емкость, А·ч 100;
- количество единичных аккумуляторов в батарее, шт 18;
- напряжение разряда, В 26...18;

- номинальная энергоемкость, Вт·ч 2 655;
- масса, кг 38;
- объем, дм³ 20;
- удельная энергоемкость НВАБ, Вт·ч/кг 69,8;
- удельная плотность НВАБ Вт·ч/л 20.

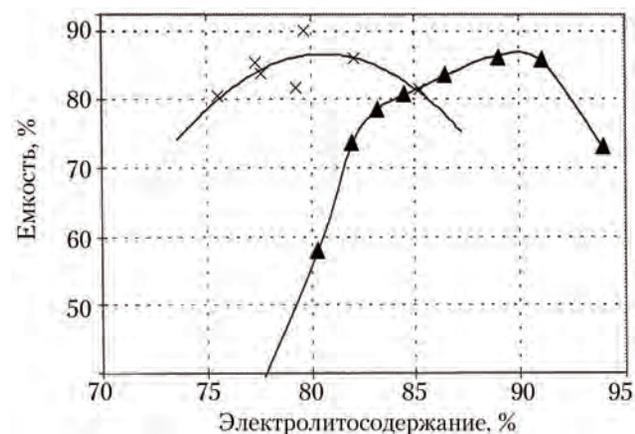


Рис. 3. Зависимость электрической емкости никель-водородной аккумуляторной батареи КА «Ямал-100» от электролитосодержания: x – в начале ресурса; ▲ – после 600 циклов

На рис. 3 приведено изменение электрической емкости НВАБ в начале и конце ресурса.

Сравнительные характеристики никель-водородных аккумуляторных батарей разработки различных организаций для телекоммуникационных геостационарных КА приведены в табл. 3 [4].

Таблица 3

Сравнительные характеристики никель-водородных аккумуляторных батарей

Характеристики НВАБ	РКК «Энергия» - УЭХК 18НВ-85 (КА «Ямал-100»)	22НВ-60 (КА IRIDIUM)	АО «Сатурн» 40НВ-70 (КА Sesat)
	Батарея с общим газовым коллектором и единым корпусом		Батарея с индивидуальными сосудами
Энергоемкость, Вт·ч			
– на начало ресурса	1 800 × 2	1 900	3 526
– на конец ресурса	1 600 × 2	1 650	2 800
Среднее напряжение, В			
– единичного аккумулятора	1,28	1,26	1,25
– батареи	23,0	27,7	50
Масса НВАБ, кг	34 × 2	36,3	71,45
Удельная энергоемкость:			
– Вт·ч/кг	59	52,4	49,34
– Вт·ч/л	87	68	37,3
Саморазряд при t = 30 °С, % /сут	7,0	нет данных	10
Количество параметров управления	2	2	56

Электрохимические генераторы для подводных аппаратов

В 90-х годах мир увлекся низкотемпературными (рабочая температура до 100 °С) ТЭ с протонообменной полимерной мембраной. Считалось, что применение этих ТЭ позволит в полной мере решить все проблемы водородной энергетики, включая их использование в автономной стационарной энергетике и автомобильном транспорте. Промышленно развитые европейские страны, США, Япония, Южная Корея, а затем и Китай вкладывали в эту проблематику миллиарды долларов. Однако задача оказалась слишком сложной, и до настоящего времени массового производства источников энергии на этих ТЭ нет, хотя крупные автомобильные и ряд специализированных фирм продолжают вести работы в этом направлении, и количество опытных установок на таких ТЭ непрерывно растет. Единственной фирмой, которая довела разработку ТЭ с полимерной мембраной до практического применения, является немецкая фирма *Siemens*, установившая ЭХГ с этими ТЭ на немецкие подводные лодки проекта 212 [5], которые были приняты на вооружение. Работы в этом направлении были начаты еще в 70-х годах на ТЭ со щелочным циркулирующим электролитом и получены, как утверждается в статьях, положительные результаты, но затем фирма перешла на ТЭ с полимерными мембранами и довела эту разработку до внедрения.

На УЭХК вариант подобной установки был проработан на щелочных матричных ТЭ. Сравнение вольтамперных характеристик (ВАХ) этих установок приведено на рис. 4, а соответствующие характеристики — в табл. 4.

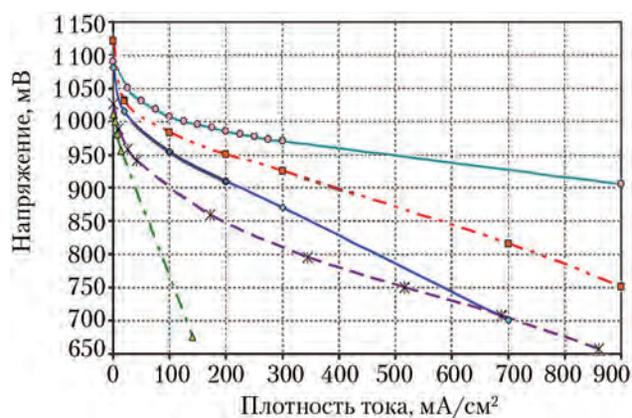


Рис. 4. Вольтамперная характеристика усредненного ТЭ батарей со щелочным электролитом (УЭХК) и с твердополимерным электролитом (*Siemens*): —◻— ВАХ ЩТЭ с матрицей толщиной 100 мкм; 0,2 МПа; начальная (УЭХК); —◻— ВАХ ЩТЭ с матрицей 400 мкм; 0,2 МПа; начальная (УЭХК); —◻— ВАХ ЩТЭ с матрицей 400 мкм; 0,2 МПа; после 5 037 ч (УЭХК); —◻— ВАХ ТЭПЭ; начальная; 0,2 МПа; *Siemens*; —◻— ВАХ ЩТЭ жидкостного, начальная (УЭХК)

Примечание: ЩТЭ — щелочной топливный элемент; ТЭПЭ — топливный элемент с полимерным электролитом.

Таблица 4

Сравнительные характеристики ЭХГ фирмы *Siemens* для подводной лодки и ЭХГ разработки УЭХК для подводного аппарата

Характеристика	<i>SIEMENS</i>	УЭХК
Мощность, кВт	35,4	55
Напряжение, В	52,4	240...385
Электрохимический КПД, % (при номинальной мощности / 20% от номинальной)	59/75	70/79
Габариты, м	0,5x0,5x1,6	0,55x0,78x1,66
Масса, кг	600	500
Ресурс, ч	Не указан (испытания единичного элемента – 8 000)	6 000...7 000 (испытания ЭХГ «Фотон»), 10 000 (испытания батарей из 128 ТЭ)
Навеска драгоценных металлов в мг/см² площади электрода	8	9
Наличие исходных материалов в России	Отсутствуют	Есть в полном объеме
Уровень отработки в России	Единичные образцы батарей	Все решения прошли полный цикл отработки

Из рис. 4 и табл. 4 видно, что щелочной матричный генератор УЭХК имеет лучшую ВАХ и превосходит генератор фирмы *Siemens* на топливных элементах с протонообменной мембраной (ТЭПОМ) по массогабаритным характеристикам и по электрохимическому КПД при практически одинаковом удельном содержании драгоценных металлов на электродах.

Электрохимические генераторы для автомобилей

В конце 90-х – начале 2000-х годов УЭХК совместно с РКК «Энергия» и ОАО «АвтоВАЗ» на базе автомобиля ВАЗ 2131 был изготовлен опытный образец автомобиля на водородно-кислородных ЩТЭ (рис. 5). Начальные дорожные испытания этого автомобиля дали положительные результаты. Его характеристики: мощность 45 кВт; напряжение 240 В; реагенты — водород, кислород; давление 0,4 МПа.



Рис. 5. Автомобиль на топливных элементах «Антэл-1»

Второй экспериментальный автомобиль на базе ВАЗ 2111 был изготовлен с ЭХГ на ШТЭ, предназначенном для работы на воздухе (рис. 6). Автомобиль опробован в процессе дорожных испытаний также с положительными результатами. Его характеристики: мощность 25 кВт; напряжение 240 В; реагенты — водород, воздух; давление 0,3 МПа.



Рис. 6. Автомобиль на топливных элементах «Антэл-2»

Разработка ЭХГ для энергоустановок электрической мощностью в сотни и тысячи киловатт

В 2006-2009 гг. была проведена разработка ТЭ площадью 700 см² (ТЭ700), в основу конструкции которого были заложены надежно зарекомендовавшие себя технические решения, использованные в ЭХГ «Фотон» для ОК «Буран». Однако увеличение рабочей площади в четыре раза, а также необходимость снижения стоимости батареи ТЭ и увеличения ее удельных характеристик внесло свои коррективы в конструкцию и технологичес-

кие подходы к изготовлению ТЭ700. Были использованы более дешевые материалы и разработаны новые технологии изготовления комплектующих, позволяющие организовать технологические процессы их производства в непрерывной «бесконечной» ленте. Для сравнения на рис. 7 показаны электроды с рабочей площадью 176 (ЭХГ «Фотон») и 700 см².

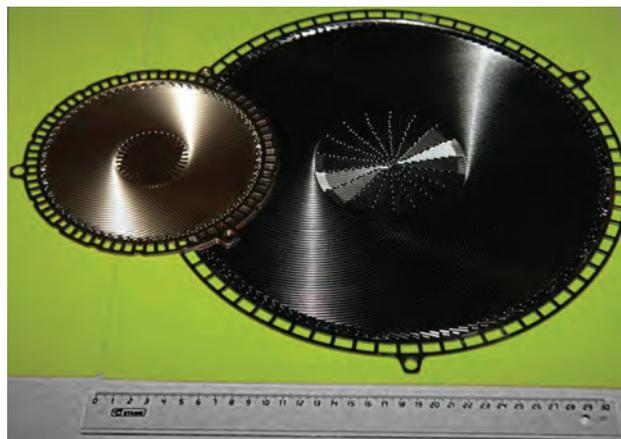


Рис. 7. Электроды с рабочей площадью 176 и 700 см²

ТЭ с рабочей площадью 700 см² используются для изготовления батарей мощностью до 150 кВт, ЭХГ мощностью до 300 кВт и энергоустановок (ЭУ) мощностью в несколько мегаватт. Внешний вид батарей с электродами 176 и 700 см² приведен на рис. 8.



Рис. 8. Батареи топливных элементов: а — батарея топливных элементов БТЭ-700, мощность до 100 кВт для ЭУ до 1 МВт (с рабочей поверхностью 700 см²); б — батарея топливных элементов БТЭ-176, мощность 20 кВт для ЭУ до 150 кВт (с рабочей поверхностью 176 см²)

Результаты длительного хранения ЭХГ «Фотон»

Необходимо подчеркнуть высокий научно-технический уровень выполненной разработки ЭХГ «Фотон» с точки зрения возможности

длительного хранения поставленных изделий. ЭХГ «Фотон» № 79 был изготовлен в 1988 г., хранился на УЭХК и испытывался по программе приемо-сдаточных испытаний в 1989, 1994 и 2000 гг. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний ЭХГ «Фотон» после длительного хранения

Контролируемые параметры	Единицы измерения	Требования ТУ	Результаты испытаний								
			декабрь 1988 г.	октябрь 1989 г.	ноябрь 1994 г.	октябрь 2000 г.					
СКЗ. Напряжение ЭХГ при $I_H = 310 \text{ А}$, $T_{\text{БТЭ}} = 100 \text{ }^\circ\text{С}$:	В	не менее 29,5	30,5	—	—	30,4					
$T_{\text{ВД}} = 68 \text{ }^\circ\text{С}$											
$T_{\text{ВД}} = 63 \text{ }^\circ\text{С}$											
$T_{\text{ВД}} = 58 \text{ }^\circ\text{С}$	В		31,04	31,04	30,93	30,92					
ВАХ. Напряжение ЭХГ при $T_{\text{ВД}} = 60 \text{ }^\circ\text{С}$, $T_{\text{БТЭ}} = 100 \text{ }^\circ\text{С}$:	В	не более 37	35,19	35,1	35,2	35,0					
$I_H = 0 \text{ А}$ (на 7-й с)											
$I_H = 30 \text{ А}$							не более 34	33,5	33,54	33,52	33,46
$I_H = 60 \text{ А}$							не более 33,5	32,81	33,03	32,97	32,85
$I_H = 310 \text{ А}$							30,4...31,5	30,97	30,97	30,93	30,92
$I_H = 350 \text{ А}$							—	—	—	—	30,62
$I_H = 390 \text{ А}$							не менее 28,7	30,45	30,46	30,46	—
P_{O_2} , давление в кислородном контуре	кгс/см ²	3,1...4,2	3,40...3,91	3,42...3,92	3,45...3,90	3,41...3,97					
τ_n^{XX} , время между срабатыванием ПРВ	мин	—	>210	>228	—	>112					
$\Delta P_{\text{O}_2} / \Delta t$, скорость изменения давления	кгс/см ² ·мин	не более 0,0060	0,0011	0,0011	0,0010	0,0038					
q , удельная наработка H_2O	мл/А·ч	$10,8 \pm 0,2$	10,8	10,9	10,84	10,54					
G , удельный расход газов	г/А·ч	не более 11,4	10,9	11,0	10,9	10,6					
n , частота срабатывания сигнала «Сброс газа»	—	не более 5 раз в час	1	2	3	2					

Примечание: $T_{\text{ВД}}$ — температура влагоотделителя, отделяющего наработанную в генераторе воду из пароводородного контура; ПРВ — побудитель расхода водорода.

Аналогичные результаты были получены и на ЭХГ «Фотон», заполненных газовой консервирующей смесью, которые хранились в РКК «Энергия» и на ЗЭП без какого-либо обслуживания, т. е. при испытаниях через 10, 15 и более лет они сохранили свои исходные характеристики в полном объеме.

ЭХГ для применения на лунной базе

Выполненные под руководством главных конструкторов ОКБ-1 и НПО «Энер-

гия» С.П. Королева и В.П. Глушко проектные разработки предусматривали создание лунной базы [6]. Основой развития лунной базы должно было стать ее энергетическое обеспечение. Предусматривалось развертывание лунной атомной электростанции с располагаемой электрической мощностью до 300 кВт. Для начальных этапов создания базы в РКК «Энергия» была разработана концепция построения лунного энергетического комплекса, включающего в себя в качестве аккумулятора электроэнергии водородно-кислородные ЭХГ, разработанные для ОК «Буран». Было

признано целесообразным использование энергомодулей на основе регенеративной энергоустановки с электролизером воды и электрохимическим генератором тока.

Система энергоснабжения на начальном этапе развития лунной базы может быть организована на основе солнечных батарей и аккумулятора энергии. Наиболее привлекательным вариантом системы накопления энергии является использование топливных элементов (электрохимических генераторов тока) с водородным циклом. Энергомодуль в течение лунного дня получает электроэнергию от солнечных батарей и электролитически разлагает воду. Получаемые в процессе электролиза водород и кислород запасаются в баллонах. Проведение электролиза воды при высоком давлении газов позволяет исключить из состава системы компрессоры для сжатия газов. По совокупности свойств накопитель энергии с водородным циклом имеет существенные преимущества по сравнению с обычными аккумуляторами.

Раздельное хранение реагентов обеспечивает нулевой саморазряд в ЭХГ, что позволяет использовать его для длительного хранения запасов энергии.

Заключение

Рассмотрено развитие технологии ЭХГ «Фотон», созданной для ОК «Буран», для применения в космической и других отраслях. Приведено сравнение с зарубежными аналогами, показаны высокие эксплуатационные характеристики ЭХГ «Фотон».

В настоящее время наиболее перспективными объектами применения низкотемпера-

турных ТЭ (рабочая температура 100 °С и ниже) являются:

- система хранения электроэнергии на лунной базе;
- источник бесперебойного (аварийного) питания;
- источник энергии для подводных аппаратов;
- автономный источник энергии для наземного транспорта.

Список литературы

1. Семенов Ю.П., Лозино-Лозинский Г.Е., Лапыгин В.Л., Тимченко В.А. и др. Многоцелевой орбитальный корабль «Буран». М.: «Машиностроение», 1995.
 2. Wagner H.A. *Space-shuttle. Handbook of Fuel Cell // Fundamentals Technology and Applications*. 2003. V. 4. P. 1224–1229.
 3. Schautz M., Dudley G., Baron F., Popov V., Pospelov B. *Testing of Buran Flight-Model Fuel Cell // ESA Journal*. 1994. V. 18. P. 129.
 4. Баженов М.Д., Железняков А.Г., Кондратьев Д.Г., Матренин В.И., Никитин В.А., Соколов Б.А., Стихин А.С. Никель-водородная аккумуляторная батарея с общим газовым коллектором // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 5. С. 21–37.
 5. Strasser K. *H₂/O₂-PEM — fuel cell module for an independent propulsion system in a submarine. Handbook of Fuel Cell // Fundamentals Technology and Applications*. 2003. V. 4. P. 1201–1214.
 6. Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы / Под научн. ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. М.: РКК «Энергия», 2011.
- Статья поступила в редакцию 26.09.2013 г.