

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СРЕДСТВ АВТОНОМНОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ КОСМОНАВТА

Окорокова Н.С.<sup>1\*</sup>, Перченко А.В.<sup>2\*\*</sup>, Пушкин К.В.<sup>1\*\*\*</sup>,  
Севрук С.Д.<sup>1\*\*\*\*</sup>, Фармаковская А.А.<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

<sup>2</sup> ЭнергоГрад,

ул. Часовая, 10/1, Москва, 125315, Россия

\* e-mail: ok.nadezhda@mail.ru

\*\* e-mail: perchenok@engrad.ru

\*\*\* e-mail: konstantin-val@yandex.ru

\*\*\*\* e-mail: sds46@yandex.ru

\*\*\*\*\* e-mail: a.a.farmakovskaya@gmail.com

---

Приведён проектировочный расчёт и определены удельные энергомассовые характеристики нового типа энергоустановок (ЭУ) для средства автономного передвижения космонавта в открытом космосе с использованием кислород-алюминиевого ( $O_2/Al$ ) химического источника тока (ХИТ). Показано, что минимальную массу и самые высокие удельные энергетические характеристики имеет ЭУ, предназначенная для работы в течение 15 циклов по 6 часов.

Впервые показано, что в космических условиях возможно также применение гидронного ХИТ с алюминиевым анодом в качестве генератора водорода для кислород-водородных ( $O_2/H_2$ ) топливных элементов (ТЭ) в составе комбинированной ЭУ, что позволяет эффективно и безопасно решать проблему длительного хранения водорода для автономных ЭУ на основе  $O_2/H_2$  ТЭ.

*Ключевые слова:* алюминий, анод, водород, кислород, источник тока, космонавт, масса, щёлочь, электролит, энергоустановка.

---

На сегодняшний день в пилотируемой космонавтике существует острая потребность в средствах автономного передвижения (САП) космонавта в открытом космосе. Помимо экстренных ситуаций, таких, как необходимость возвращения к станции из-за случайного отрыва, САП способны обеспечить полностью автономную работу космонавта в космосе и существенно расширить ряд выполнимых им задач.

Однако главной проблемой для реализации таких САП и для полностью автономной работы в открытом космосе является энергоустановка, которая должна обеспечивать необходимый запас энергии для активного функционирования в течение длительного времени.

В современной пилотируемой космонавтике существует только два возможных источника энергии: солнечные батареи (СБ) и химические источники тока. Применение СБ для энергоснабжения

космонавта в режиме автономной работы в космосе не эффективно из-за высоких габаритных характеристик СБ и необходимости их постоянной ориентации по отношению к Солнцу, а также ввиду чрезвычайной сложности самого перемещения и работы космонавта в целом.

На данный момент единственным возможным вариантом ЭУ для автономного энергопитания космонавта являются химические источники тока. Однако большинство современных применяемых в пилотируемой космонавтике аккумуляторных батарей не обладают достаточными энергомассовыми характеристиками для обеспечения длительного времени работы при приемлемых массогабаритных характеристиках.

Таким образом, актуальной задачей для пилотируемой космонавтики на сегодняшний день является разработка новых типов высокоэнергетических ХИТ.

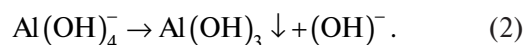
Среди всех известных электрохимических систем первичные ХИТ на основе системы «кислород-алюминий» (O<sub>2</sub>/Al) имеют одни из самых высоких удельных энергомассовых характеристик — стандартная удельная энергия O<sub>2</sub>/Al топлива составляет 29,16 МДж/кг (8,1 кВт·ч/кг). По этим параметрам они уступают только ЭУ на основе кислород-водородных (O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) топливных элементов с криогенным хранением компонентов и некоторым типам ХИТ с литиевым анодом [1].

Кроме высоких удельных энергий топлива, преимущество O<sub>2</sub>/Al ХИТ состоит в том, что алюминий является дешёвым, легкодоступным материалом. Еще одна важная особенность такой системы: алюминий, являющийся расходуемым компонентом (горючим), находится в твердом состоянии, что обеспечивает чрезвычайно удобные возможности для его длительного хранения. В ЭУ на основе O<sub>2</sub>/Al ХИТ в зависимости от мощности, времени разряда, применяемого электролита и конструктивного исполнения может быть реализована удельная энергия 200—400 Вт·ч/кг [2—5].

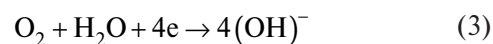
При работе O<sub>2</sub>/Al ХИТ процессу анодного растворения алюминия в щелочном электролите отвечает уравнение



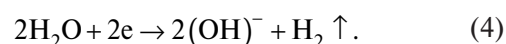
с последующей кристаллизацией гидроксида алюминия из насыщенного или пересыщенного раствора алюмината:



Сопряжёнными процессами являются токообразующая реакция восстановления кислорода на кислородном газодиффузионном катоде (ГДК)



и реакция восстановления водорода из воды на поверхности алюминия в результате коррозии анода:



Суммарно токообразующая реакция в O<sub>2</sub>/Al ХИТ имеет вид

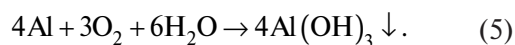


Схема O<sub>2</sub>/Al ХИТ с щелочным электролитом представлена на рис. 1.

Как видно из приведённых уравнений, расходуемыми компонентами токообразующей реакции в O<sub>2</sub>/Al ХИТ являются алюминий, кислород и вода.

В результате большого ряда проведенных нами исследований по поиску оптимальных рабочих компонентов для O<sub>2</sub>/Al ХИТ [6—12] была найдена ком-

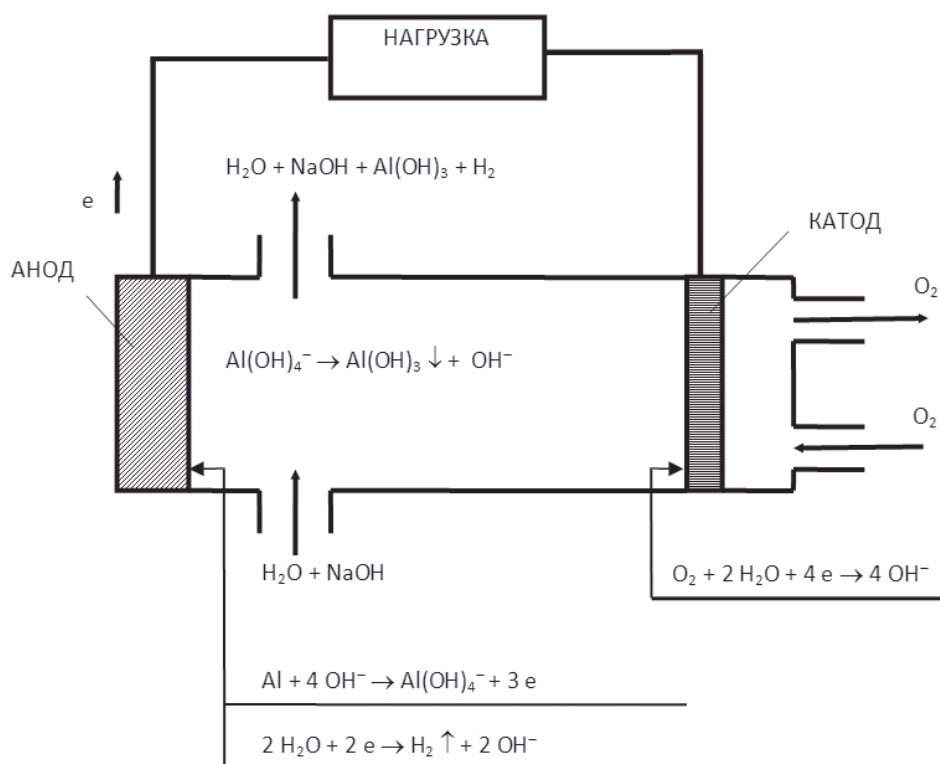


Рис. 1. Принципиальная схема кислород-алюминиевого ХИТ с щелочным электролитом

позиция, обеспечивающая его максимальные энергетические характеристики при минимальной коррозии алюминиевого анода из алюминий-индиевого сплава (А995+0,6 масс.% In Ин0) в щелочном электролите: 4М NaOH+0,06М станната натрия  $Na_2SnO_3$  [13, 14]. Данная композиция легла в основу наших последующих расчётов и разработок при проектировании ЭУ с  $O_2/Al$  ХИТ для средства автономного передвижения космонавта («космического мотоцикла»).

На основе ряда проведенных НИР и НИОКР совместно с РКК «Энергия» предусматривалось разработать ЭУ с номинальной мощностью 100 Вт, напряжением  $27 \pm 3$  В и кратковременным изменением тока от 0,45 до 35 А. Время работы должно было составлять 180 часов (30 циклов по 6 часов) с длительными паузами и возможностью хранения до начала работы в течении года.

Схема ЭУ, рассчитанной на 15 циклов работы, показана на рис. 2.

Выход на рабочий режим этой ЭУ должен осуществляться от бортового источника. По достиже-

нии заданных параметров все системы переключаются на питание от  $O_2/Al$  батареи. В процессе работы производится регулирование температуры и давления в контуре электролита и кислорода, а также очистка электролита от продукта реакции — гидроксида алюминия  $Al(OH)_3$  и подача израсходованной воды. При останове ЭУ необходимо произвести консервацию  $O_2/Al$  батареи.

При подготовке ЭУ для следующего запуска необходимо произвести дозаправку кислородом и водой от бортовых систем хранения, а также отсоединить ёмкость с накопленными продуктами реакции и подсоединить новую.

Наличие щелочного разъема, при удалении продуктов реакции из ЭУ, на космическом аппарате в некоторых случаях может быть нежелательным, поэтому были рассмотрены схемы ЭУ, рассчитанные на работу в течение одного и пяти 6-часовых циклов, не требующие удаления продуктов реакции. ЭУ со временем работы 6 часов имеет наиболее простую функциональную схему (рис. 3).

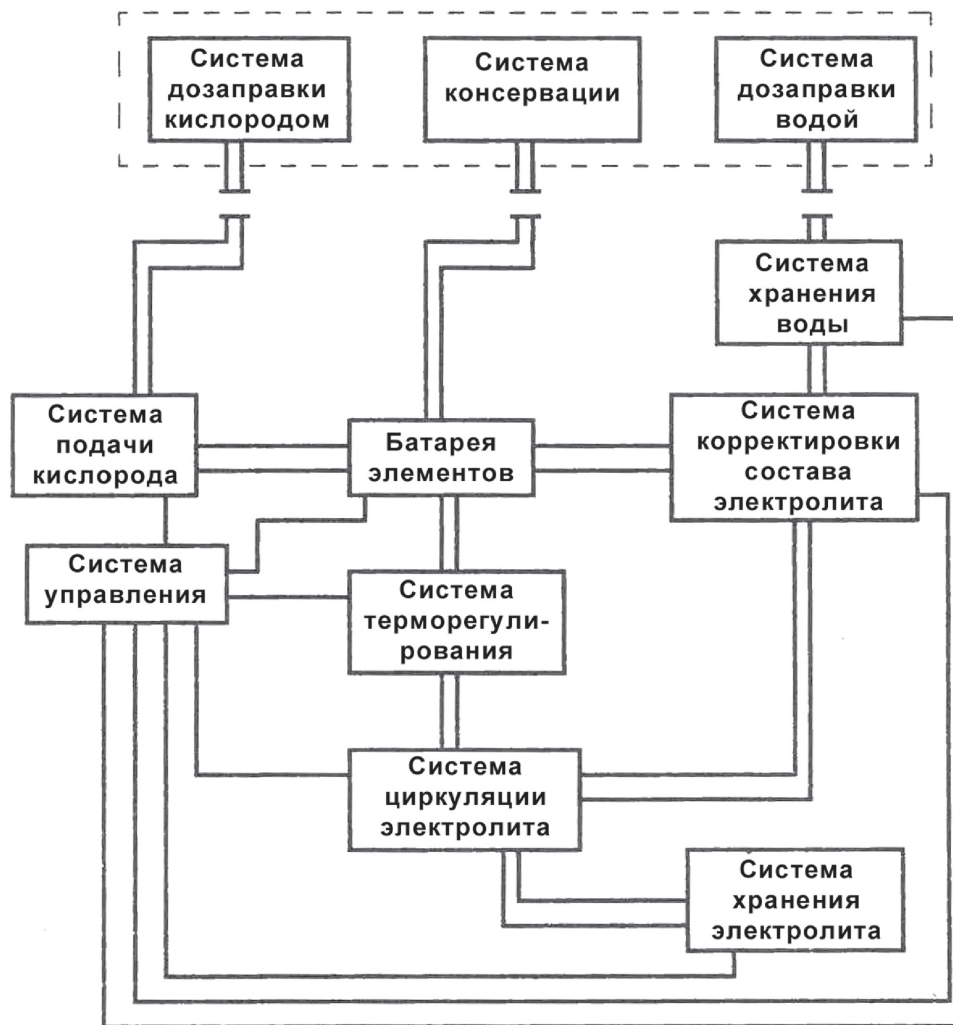


Рис. 2. Функциональная схема  $O_2/Al$  ЭУ на 15 циклов работы

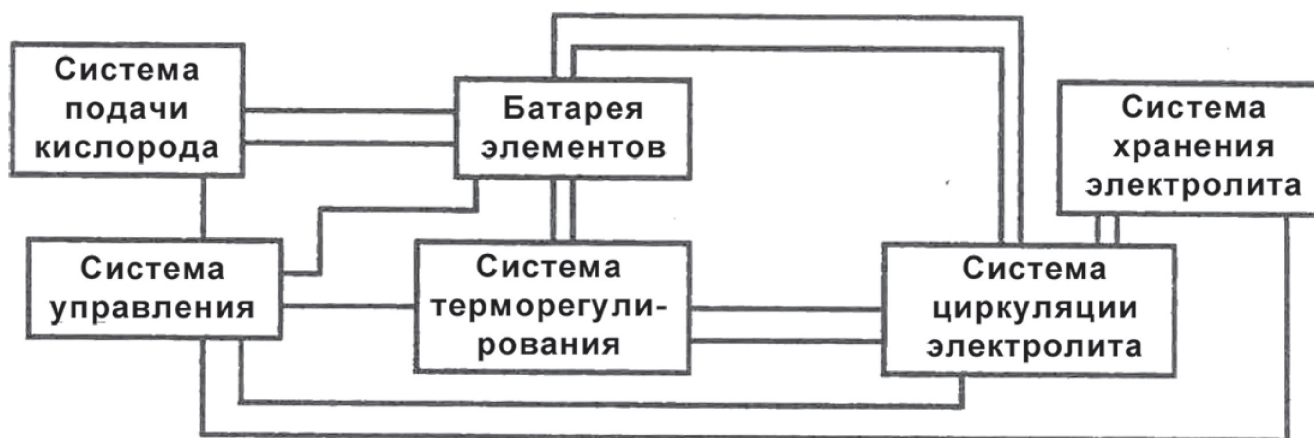


Рис. 3. Функциональная схема  $O_2/Al$  ЭУ для 6-часового цикла

Запуск и работа данной ЭУ аналогичны запуску и работе 15-цикловой ЭУ, за исключением необходимости очистки электролита. Эта наиболее простая по структуре и эксплуатации ЭУ обладает почти полной автономностью по отношению к бортовым системам и высокой надежностью. Но для обеспечения всей программы необходимо иметь на борту космического аппарата 30 таких ЭУ. После окончания работы такая ЭУ либо утилизируется, либо возвращается на Землю для перезаправки.

Более сложную функциональную схему имеет ЭУ, рассчитанная на работу в течение пяти циклов с длительными паузами (рис. 4).

Запуск и работа данной ЭУ аналогичны запуску и работе одноразовой ЭУ. По окончании цикла работы ЭУ подключается к системе консервации. Перед следующим запуском производится дозаправка кислородом. Наличие систем консервации и дозаправки кислородом существенно усложняет эксплуатацию и обслуживание ЭУ. В процессе работы ЭУ возможно изменение её энергетических характеристик вследствие накопления в электролите продуктов реакции, но на борту космического ЛА можно запастись уже не 30, а шесть таких установок.

Для описанных выше вариантов схем ЭУ проведены сравнительные расчёты масс, а в качестве

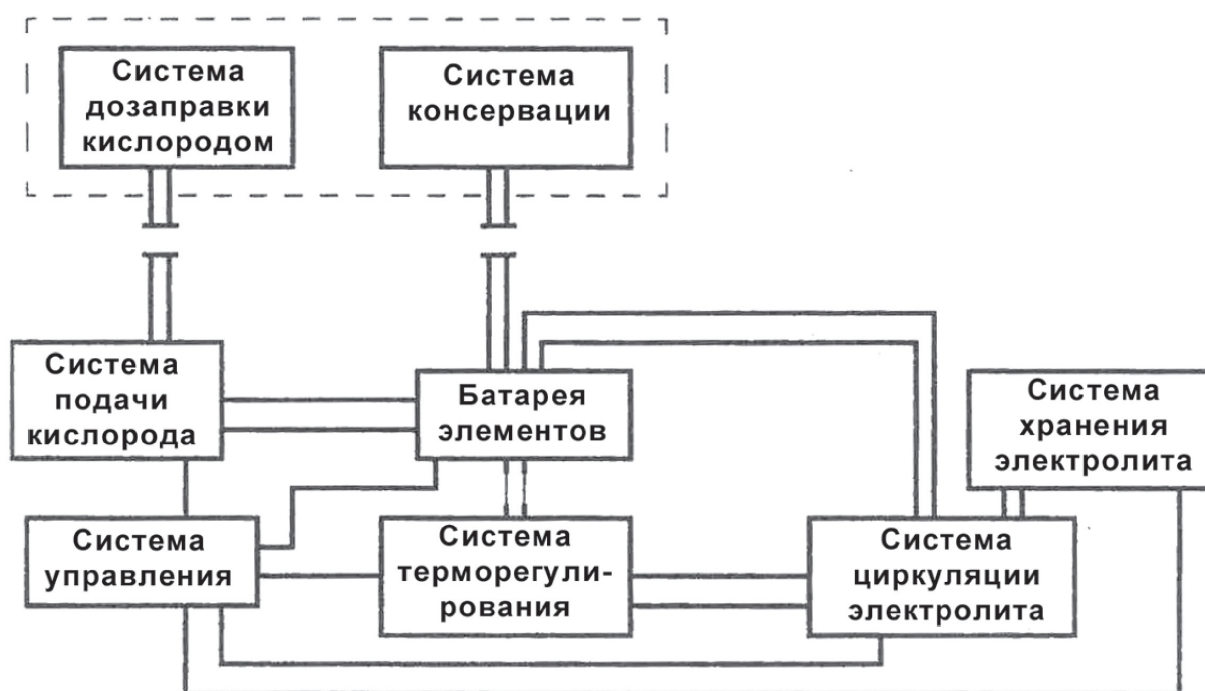


Рис. 4. Функциональная схема  $O_2/Al$  ЭУ на пять циклов работы

критерия оптимизации выбрана минимальная масса ЭУ, которая, с учетом уровня детализации, равна

$$M_{ЭУ} = M_{Al} + M_{ГДК} + M_{КОН} + M_{O} + M_{КБ} + M_{БЭ} + M_{БК} + M_{СЦ} + M_{СК} + M_{ПГА} + M_{СО}, \quad (6)$$

где  $M_{Al}$  — масса алюминиевых анодов;  $M_{ГДК}$  — масса газодиффузионных катодов;  $M_{КОН}$  — масса электролита;  $M_{O}$  — масса кислорода;  $M_{КБ}$  — масса корпуса батареи;  $M_{БЭ}$  — масса бака электролита;  $M_{БК}$  — масса бака кислорода;  $M_{СЦ}$  — масса системы циркуляции электролита;  $M_{СК}$  — масса системы консервации;  $M_{ПГА}$  — масса пневмогидроаппаратуры; для ЭУ, работающей на режиме с корректировкой состава электролита, добавляется масса системы очистки —  $M_{СО}$ .

В качестве варьируемого параметра выбрана величина плотности тока в  $O_2/Al$  элементах. Полученные результаты приведены в таблице.

Как и следовало ожидать, минимальную массу имеет установка, рассчитанная на один цикл работы, однако наименьшую суммарную массу и лучшие удельные характеристики имеет ЭУ, предназначенная для работы в течение 15-ти циклов.

В результате проведенных нами исследований [7, 9, 10, 15—17] было установлено, что применение ХИТ с алюминиевым энергоносителем возможно не только для получения электроэнергии, но и для получения водорода как целевого продукта. В этом случае катодным компонентом является не кислород  $O_2$ , а вода из электролита, а вместо воздушного, газодиффузионного катода используется инертный металлический катод, на котором происходит реакция восстановления водорода из воды по реакции:



Принципиальная схема такого гидронного ХИТ с щелочным электролитом и основными реакциями,

указанными по месту их протекания, дана на рис. 5.

Анодные процессы при работе гидронного ХИТ в щелочном электролите протекают те же, что и в  $O_2/Al$  ХИТ, а суммарная токообразующая реакция имеет вид



Скорость выделения водорода в гидронном ХИТ можно изменять и контролировать в широком диапазоне, поэтому он может выполнять функцию генератора водорода для последующего использования в кислородно-водородных ( $O_2/H_2$ ) топливных элементах, которые достаточно давно применяются в составе ЭУ на пилотируемых космических аппаратах.

Среди всех ХИТ  $O_2/H_2$  ТЭ имеют лучшую удельную энергоёмкость топлива (119,0 МДж/кг или 33,1 кВт·ч/кг) и из всех известных ЭУ — самый высокий термодинамический КПД, достигающий 94% [1]. Однако для ЭУ на основе  $O_2/H_2$  ТЭ особо остро стоит проблема хранения водорода. Так, газобаллонное хранение сильно снижает удельные энергомассовые характеристики всей ЭУ, а криогенное хранение, несмотря на то, что является наиболее эффективным с точки зрения энергомассовых характеристик, не применимо при длительных паузах, так как криожидкость достаточно активно испаряется. Ввиду этого применение  $O_2/H_2$  ТЭ при длительных паузах в работе ЭУ недостаточно эффективно.

Безопасное и эффективное хранение и получение водорода с нужными скоростями для  $O_2/H_2$  ТЭ возможно в составе комбинированной космической энергоустановки (КЭУ) «гидронный ХИТ+ $O_2/H_2$  ТЭ» [18—21]. Энергетические характеристики такой КЭУ превышают характеристики ЭУ только на базе  $O_2/H_2$  ТЭ; при её реализации она

### Результаты расчетов параметров трех вариантов ЭУ

Параметры ЭУ	Варианты исполнения ЭУ		
	Один цикл (6 часов)	Пять циклов (по 6 часов)	Пятнадцать циклов (по 6 часов)
Мощность, Вт	100	100	100
Напряжение, В	24-34	24-34	24-34
Масса ЭУ, кг	6,5	9,75	15,6
Удельная мощность, Вт/кг	7,6	6	3,6
Удельная энергия Вт·ч/кг	46	150	320
Необходимое количество ЭУ, шт	30	6	2
Суммарная масса, кг	195	58,5	31,2

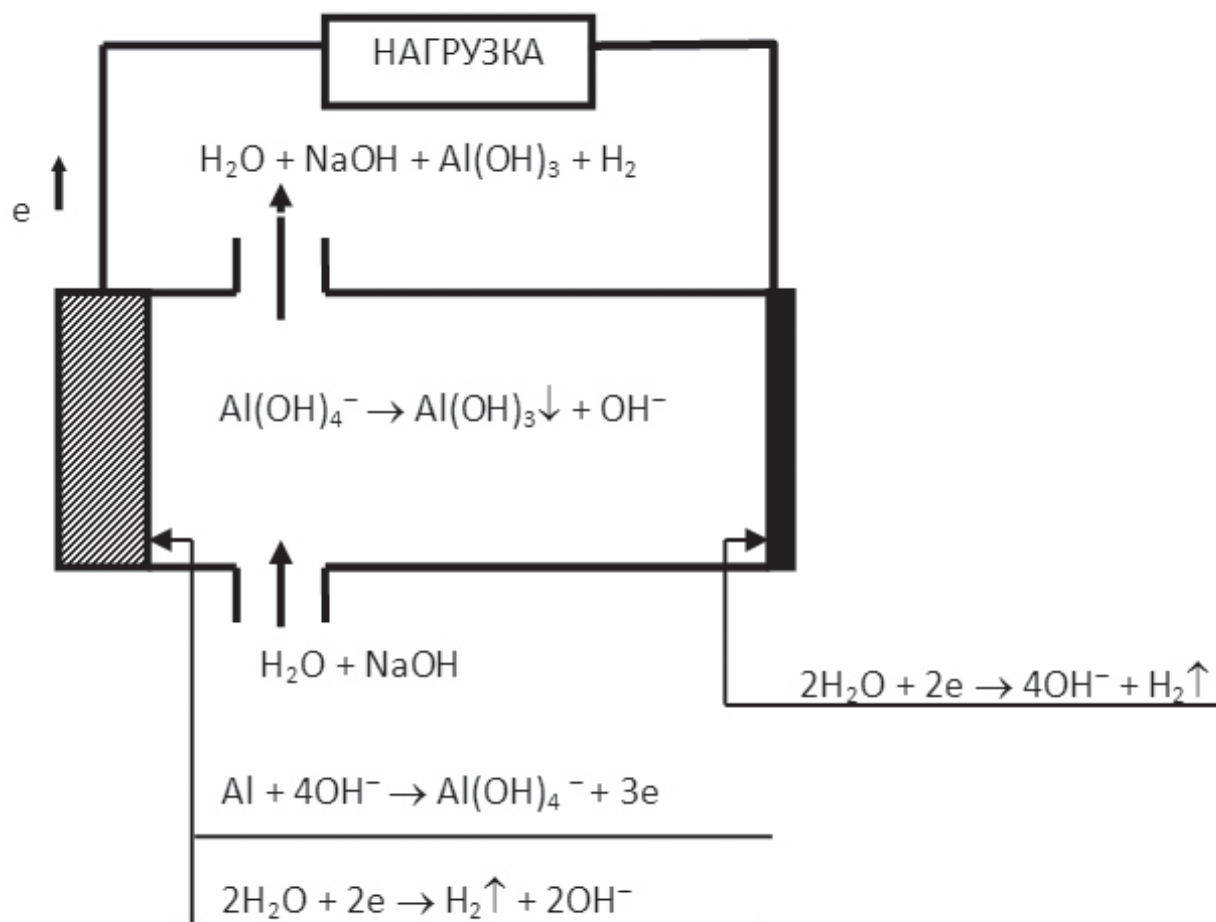


Рис. 5. Принципиальная схема гидронного источника тока с алюминиевым анодом и щелочным электролитом

будет способна удовлетворять требованиям длительных пауз между запусками и может рассматриваться в качестве приемлемой для «космического мотоцикла».

В ряде исследований [7, 10, 15, 16] для гидронного ХИТ как для генератора водорода был проведен поиск и определена оптимальная композиция рабочих компонентов (анод-электролит-катод), обеспечивающая лучшие энергетические характеристики.

**Выводы**

Впервые проведен проектировочный расчёт новой ЭУ с использованием  $O_2/Al$  ХИТ для средств автономного передвижения космонавта в открытом космосе.

Для ЭУ определены удельные энергомассовые характеристики, которые существенно превышают характеристики ХИТ, применяемых на сегодняшний день в пилотируемой космонавтике.

Предлагаемая ЭУ позволяет решать принципиально новые задачи для пилотируемой космонавтики в будущем и открывает новое направление в

создании и применении высокоэффективных электрохимических ЭУ.

Показано, что применение комбинированной ЭУ «гидронный ХИТ+ $O_2/H_2$  ТЭ» является эффективным и безопасным решением проблемы длительного хранения водорода для автономных ЭУ на основе  $O_2/H_2$  ТЭ, что позволяет решать новые, ранее невозможные задачи.

Применение комбинированной ЭУ «гидронный ХИТ+ $O_2/H_2$  ТЭ» целесообразно не только в космических условиях, но и весьма перспективно в наземных: беспилотные ЛА, электромобили, автономные ЭУ для электронных устройств, аварийные источники питания и т.д.

**Библиографический список**

1. Клочкова Л.Л. Рабочие тела энергосиловых установок летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1984. — 151 с.
2. Алашкин В.М., Севрук С.Д., Удальцов В.Г., Фармаковская А.А. Состояние разработки механически перезаряжаемых воздушно-алюминиевых источников тока большой удельной энергоёмкости // Электрохимическая энергетика. 2006. Т. 6. № 3. С. 156-159.

3. Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Возможность и перспективы использования алюминия в системах хранения и генерирования водорода как горючего для кислородно-водородных топливных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 106-116.
4. Farmakovskaya A.A., Popov V.V., Sevruk S.D., Tumanov B.I., Udaltsov V.G. Oxygen-aluminum fuel cells and most practical fields of their applications, proc. of ASME 2003 1st International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, paper No. FUELCELL2003-1730, 2003, 273-277 pp.
5. Farmakovskaya A.A., Klochkova L.L., Kulakov E.B., Latyshev L.A., Popov V.V., Sevruk S.D. Oxygen-Aluminum Fuel cells for ground and space applications, proc. of 33rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Colorado Springs, Colorado, August 2-6, 1998, Book of Abstracts, 138 p.
6. Перченко А.В. Исследование процессов в кислородно-алюминиевых химических источниках тока и системах энергетических установок, рассчитанных на длительную работу: Дисс. канд. техн. наук; 05.14.08. — М.: МАИ, 1996. С. 153.
7. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Влияние состава алюминиевого анода гидронного источника тока на эффективность его работы в режиме генератора водорода // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 65-72.
8. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Баланс энергии и КПД воздушно-алюминиевых химических источников тока для авиационной и космической техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 104-109.
9. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Моделирование физико-химических процессов, протекающих при работе химических источников тока с алюминиевым анодом // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 65-71
10. Огорокова Н.С. Разработка оптимальных композиций рабочих тел для энергетических установок на базе химических источников тока с алюминиевым анодом: Дисс. канд. техн. наук; 05.14.08. — М.: МАИ, 2012. С. 153.
11. Жук А.З., Илюхина А.В., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Исследование влияния добавок органических ингибиторов щелочной коррозии алюминия на характеристики воздушно-алюминиевого электрохимического генератора // Труды МАИ, 2014, вып. № 69, <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43313>
12. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Исследование путей повышения энергетических характеристик и функциональных возможностей энергоустановок на базе воздушно-алюминиевых химических источников тока // Труды МАИ, 2015, №80. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56929>
13. Кароник В.В., Клочкова Л.Л., Кулаков Е.Б., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Процессы на алюминиевом аноде в щелочном электролите при активировании и ингибировании его поверхности // Электродные процессы в новых источниках тока. Сб. научн. тр. МЭИ № 169. М.: МЭИ, 1988. С. 28-33.
14. Клочкова Л.Л., Кулаков Е.Б., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Кислородно-алюминиевый элемент с щелочным электролитом и улучшенными параметрами и характеристиками // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции «Электрохимическая энергетика». М., 1984. С. 122-123.
15. Огорокова Н.С., Пушкин К.В. Управляемый генератор водорода на базе гидронного химического источника тока // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. 51. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29175>
16. Кравченко Л.Л., Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Влияние свойств катода гидронного источника тока с алюминиевым анодом на эффективность его работы в режиме генератора водорода // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 74-81.
17. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Оптимальный модульный типоразмерный ряд энергоустановок с алюминием в качестве энергоносителя // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 78-85.
18. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Комбинированный источник тока // Патент на полезную модель № 105528, приоритет 24.12.2010.. Бюл. № 16, 10.06.2011.
19. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Комбинированный источник тока с параллельным подключением батарей // Патент на полезную модель № 116275, приоритет 07.12.2011. Бюл. № 14, 20.05.2012.
20. Pushkin K.V. Controlled hydrogen generator for independent power plants based on oxygen-hydrogen fuel cells, proc. of 9th Pegasus-AIAA Student Conference, Milano, 3-5 April, 2013; [http://www.pegasus-europe.org/AIAA\\_Pegasus/Papers/MAI\\_Pushkin.pdf](http://www.pegasus-europe.org/AIAA_Pegasus/Papers/MAI_Pushkin.pdf)
21. Pushkin K.V. Controlled hydrogen generator and additional source of electrical current for independent oxygen-hydrogen power plants, proc. of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), September 7-12, 2014, Saint-Petersburg, Russia; [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014\\_0558\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0558_paper.pdf)

## POWER PLANT FOR VEHICLE OF ASTRONAUT'S AUTONOMOUS MOVEMENT

Okorokova N.S.<sup>1\*</sup>, Perchenok A.V.<sup>2\*\*</sup>, Pushkin K.V.<sup>1\*\*\*</sup>,  
Sevruk S.D.<sup>1\*\*\*\*</sup>, Farmakovskaya A.A.<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

<sup>2</sup> EnergoGrad,  
10/1, Chasovaya str., Moscow, 125315, Russia

\* e-mail: ok.nadezhda@mail.ru

\*\* e-mail: perchenok@engrad.ru

\*\*\* e-mail: konstantin-val@yandex.ru

\*\*\*\* e-mail: sds46@yandex.ru

\*\*\*\*\* e-mail: a.a.farmakovskaya@gmail.com

### Abstract

The paper presents designing computation and defines specific energy-mass characteristics of a new type of power plants (PP) for off-line power supply of an astronaut in space, based on oxygen-aluminum O<sub>2</sub>/Al chemical current source (CCS).

Such PP with 100 W rated power of  $27 \pm 3$  VDC and short-term current change from 0.45A to 35A should provide necessary energy storage for active operation during 180 hours (30 six-hour cycles) with long-lasting pauses, as well as storage capability within a year before setting to operation.

The authors developed structural diagrams for 1, 5 and 15 six-hour cycles. The simplest PP structure and operation mode demonstrates the PP meant for one-cycle. It almost fully autonomous in relation to on-board systems and highly reliable. However, to support the entire program we will need to install 30 PPs of such kind on-board a spacecraft. After mission completion such kind of PP either recycled, or returned to Earth for recharging.

PP designed for five operation cycles with prolonged pauses has more complicated structural diagram. After operation cycle completion, this PP is connected to conservation system, and should be refueled with Oxygen before the next start-up. However, only six of such PPs are necessary on-board the spacecraft, instead of 30 pieces of the previous kind. The structural diagram of O<sub>2</sub>/Al PP for 15 operation cycles is most complicated, since it includes addition electrolyte adjusting systems, as well as its solid resultant (aluminum hydroxide Al(OH)<sub>3</sub>) purification, and consumed water supplying.

Comparative mass calculations were performed for all PP variants. We choose the minimum PP mass as an optimization criterion, and the value of current density in O<sub>2</sub>/Al elements as a variable parameter.

Calculations were performed on experimental data obtained with the O<sub>2</sub>/Al CCS laboratory sample with aluminum anode, made of Aluminum-Indium alloy (A995 + 0.6 wt.% In In0), in alkaline electrolyte based on 4M NaOH with addition of 0,06M sodium stannate Na<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>, that inhibits aluminum corrosion.

As the calculations showed, the installation designed for one-cycle operation has the minimum weight. However, the PP designed for 15-cycle operation exhibits minimum total weight and best specific characteristics.

It was shown for the first time that hydronic CCS with aluminum anode may also be used in space as the hydrogen generator for the hydrogen-oxygen (O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) fuel cell (FC) in the combined PP (CPP). It solves effectively and safely the problem of prolonged storage of hydrogen for autonomous PPs based on O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> FC. Energy characteristics of such CPP exceed those of PP consisted of only of O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> FC. When put into practice such CPP will be able to satisfy the requirements on long pauses between runs and may be considered as an autonomous energy supply for an astronaut.

**Keywords:** aluminum, anode, hydrogen, oxygen, current source, cosmonaut, mass, alkaline, electrolyte, power plant.

### References

1. Klochkova L.L. *Rabochie tela energosilovyh ustanovok letatel'nyh apparatov* (Operating bodies of power-plants for aircrafts), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 151 p.
2. Alashkin V.M., Sevruk S.D., Udal'tsov V.G., Farmakovskaya A.A. *Elektrohimicheskaja energetika*, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 156-159.
3. Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 106-116.
4. Farmakovskaya A.A., Popov V.V., Sevruk S.D., Tumanov B.I., Udal'tsov V.G. *Oxygen-aluminum fuel*



- cells and most practical fields of their applications, *proc. of ASME 2003 1st International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, paper No. FUELCELL2003-1730, 2003, pp. 273-277.
5. Farmakovskaya A.A., Klochkova L.L., Kulakov E.B., Latyshev L.A., Popov V.V., Sevruk S.D. *Oxygen-Aluminum Fuel cells for ground and space applications, proc. of 33rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Colorado Springs, Colorado, 2-6 August 1998, Book of Abstracts, 138 p.
  6. Perchenok A.V. *Issledovanie protsessov v kislorodno-aljuminievyykh himicheskikh istochnikakh toka i sistemakh energeticheskikh ustanovok, rasschitannykh na dlitel'nyu rabotu* (Investigation of processes in oxygen-aluminum chemical current sources and systems of power plants designed for continuous operation), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 1996, 153 p.
  7. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 65-72.
  8. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 3, pp.104-109.
  9. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 65-71.
  10. Okorokova N.S. *Razrabotka optimal'nykh kompozitsij rabochnykh tel dlja energeticheskikh ustanovok na baze himicheskikh istochnikov toka s aljuminievym anodom* (Development of optimal composition of working bodies for power plants based on chemical current sources with aluminum anode), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2012, 153 p.
  11. Zhuk A.Z., Ilyukhina A.V., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2014, no. 69, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=43313> (accessed 10.10.2013).
  12. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI»*, 2015, no. 80, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=56929> (accessed 26.03.2015).
  13. Karonik V.V., Klochkova L.L., Kulakov E.B., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Elektrodnye protsessy v novykh istochnikakh toka. Sbornik statei MEI*, Moscow, 1988, no. 169, pp. 28-33.
  14. Klochkova L.L., Kulakov E.B., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoi konferentsii «Elektrokhimicheskaya energetika»*, Moscow, 1984, pp. 122-123.
  15. Okorokova N.S., Pushkin K.V. *Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI»*, 2012, no. 51, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=29175> (accessed 26.03.2012).
  16. Kravchenko L.L., Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 74-81.
  17. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 78-85.
  18. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Patent RU 105528*, 10.06.2011.
  19. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Patent RU 116275*, 20.05.2012.
  20. Pushkin K.V. *Controlled hydrogen generator for independent power plants based on oxygen-hydrogen fuel cells, proc. of 9th Pegasus-AIAA Student Conference*, Milano, 3-5 April, 2013, available at: [http://www.pegasus-europe.org/AIAA\\_Pegasus/Papers/MAI\\_Pushkin.pdf](http://www.pegasus-europe.org/AIAA_Pegasus/Papers/MAI_Pushkin.pdf)
  21. Pushkin K.V. *Controlled hydrogen generator and additional source of electrical current for independent oxygen-hydrogen power plants, proc. of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 7-12 September, 2014, Saint-Petersburg, Russia, available at: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014\\_0558\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0558_paper.pdf)