

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.454.2, 629.7.036.54

doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-113-123

Анализ основных методов получения ракетного топлива путем электролиза воды

М.А. Шалашов, Р.А. Пешков

Политехнический институт Южно-Уральского горного университета

Analysis of the Main Methods of Obtaining Propellant by Electrolysis of Water

M.A. Shalashov, R.A. Peshkov

Polytechnic Institute, South Ural State University

Дан обзор бортовых электролизных установок, входящих в состав двигательных установок космических аппаратов и предназначенных для получения компонентов ракетного топлива из воды. Исследован технический уровень разработок по бортовым электролизным установкам. Выполнены анализ тенденций и прогноз развития бортовых электролизных установок. Оценена возможность их использования в составе космических аппаратов.

Ключевые слова: кислородно-водородная двигательная установка, бортовая электролизная установка, малый космический аппарат

The article presents a review of onboard electrolysis plants being the part of the spacecraft propulsion systems and designed for obtaining propellant components from water. The technical level of development on on-board electrolysis plants was studied. The analysis of tendencies and the forecast of development of onboard electrolysis plants were carried out. The possibility of their use as a part of space vehicles is assessed.

Keywords: oxygen-hydrogen propulsion system, onboard electrolysis unit, small spacecraft

Полномасштабное освоение Солнечной системы невозможно осуществить без построения цепочек поставок, основной задачей которых будет снабжение и поддержание космических миссий на всех этапах с минимальным применением доставки грузов с Земли для снижения стоимости таких операций. Полноценную цепочку поставок нельзя построить, если все космические аппараты (КА), задействованные в космических миссиях (например, при добыче полезных ископаемых на астероидах или транспортировании астероидов к Земле [1])

привязаны к земной инфраструктуре и используют для дозаправки только ее [2].

Для класса КА, выполняющих операции, требующие высокой тяги (транспортирование грузов с поверхности небесных тел и спуск грузов на поверхность) в качестве альтернативы можно применять унифицированный вид топлива.

Таким топливом может служить вода [3, 4], из которой с помощью электролиза можно получать компоненты топлива ($H_{2r} + O_{2r}$) для КА, находящегося на орбите. Это в свою очередь

позволит решить проблему малого времени хранения $H_{2r} + O_{2r}$ в баках КА. Данный подход открывает возможности для многоразового применения КА и их дозаправки.

Вода в различном состоянии присутствует по всей Солнечной системе [5]. В настоящее время высокими темпами идет развитие средств добычи воды с поверхности небесных тел. Основным элементом нового типа КА, от которого зависит получение топлива на борту (in-situ), является бортовая электролизная установка (БЭУ).

Проектирование КА нового типа, подробно описанного в работе [6], предназначенного для многократного использования в цепочке поставок при транспортных операциях по освоению Солнечной системы должно начинаться с исследования текущего уровня развития и технологической готовности БЭУ.

Достижения в технологии хранения топлива позволили уменьшить массу баков для хранения топлива в виде кислорода и водорода под высоким давлением, а инновации в технологии кислородно-водородных двигательных установок (ДУ) повысили удельный импульс подобных систем до 400 с.

Эффективность солнечных батарей, вырабатывающих электроэнергию для КА, также возросла. Передовые разработки в области электролиза воды под высоким давлением обеспечили уменьшение массы системы электролиза воды и повышение эффективности электропитания, что делает реализацию ДУ на основе электролиза воды более перспективной за счет уменьшения габаритных размеров и массы солнечных батарей КА.

Цель работы — обзор конструкций и характеристик разрабатываемых в России и за рубежом БЭУ для КА.

Постановка задачи. Рассмотрены концепции и конструкции БЭУ для КА массой до 500 кг. Исследуемыми вопросами при обзоре БЭУ с использованием воды в качестве рабочего тела являлись:

- принципиальные схемы ДУ и БЭУ;
- конструктивные особенности БЭУ;
- схемы и системы подачи воды в БЭУ;
- способы обеспечения температурного режима воды;
- массогабаритные характеристики БЭУ.

Двигательные установки на основе электролиза воды, предложенные в качестве возмож-

ной концепции ДУ, разработаны в 1985, 1987 и 1997 годах прошлого столетия [7–9].

В статье [7] предложена структура системы ориентации и стабилизации, дозаправляемая водой, где применены вытеснительные системы ее подачи в электролизер с использованием баллона с гелием под давлением и электролизер. Источником энергии служат солнечные панели, а в периоды нахождения в тени — никель-кадмиевые аккумуляторные батареи и аккумуляторы сжатого газа.

Кислород и водород, полученные в результате электролиза, поступают в специальные емкости. При полном заполнении емкостей для хранения открываются электроклапаны, и компоненты топлива попадают в микродвигатель, где воспламеняются. Продукты сгорания истекают из сопла, и ДУ работает в импульсном режиме.

Для эксплуатации в условиях космических полетов в составе КА перспективным можно считать использование электролизеров с водным щелочным электролитом матричного типа и твердым полимерным электролитом.

Электролизер с водным щелочным электролитом матричного типа. В работе [10] предложен проект ДУ на основе электролиза воды и входящего в ее состав щелочного электролизера воды упрощенной конструкции (без движущихся частей) [11], предназначенного для малых КА. Устройство двигательной установки аналогично рассмотренной в работе [7], за исключением того, что подача воды в этот электролизер осуществляется отдельным насосом.

Схема щелочного электролизера приведена на рис. 1. Практическая реализация этой конструкции электролизера разработана в МЭИ и приведена в работе [12] (рис. 2).

Рассматриваемый щелочной электролизер состоит из герметичного корпуса 1, который изнутри покрыт слоем пористого гидрофильного материала 2. (см. рис. 1). Корпус содержит пористую гидрофильную мембрану 6, два пористых электрода — анод 5 и катод 9, две гибкие эластичные перегородки 3 и 11.

Перегородки делят внутреннее пространство электролизера на полости для кислорода 4, водорода 10 и электролита 12. Полость электролита соприкасается с мембраной, пористым слоем и каналом подачи воды 13. Через каналы кислорода 7 и водорода 8 газы подаются в емкости для хранения.

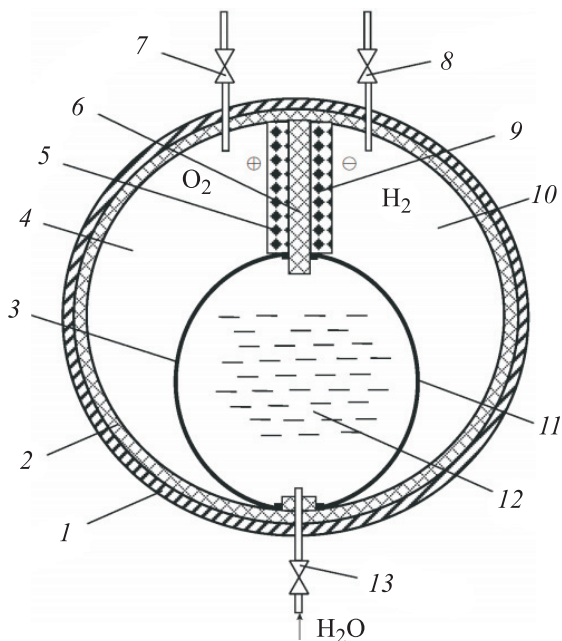


Рис. 1. Схема щелочного электролизера

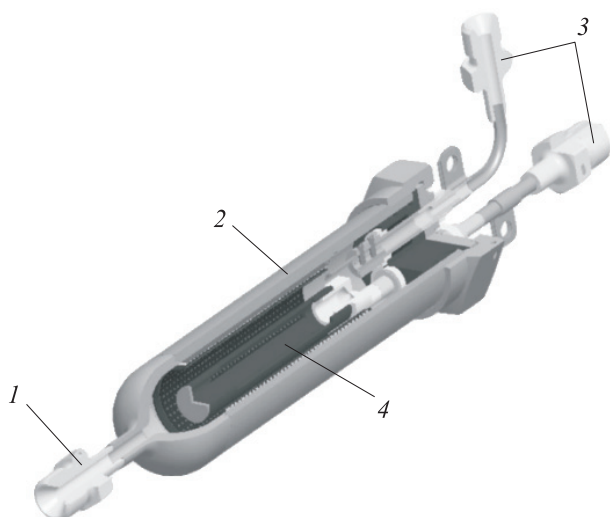


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной ячейки:

- 1 — штуцер подачи воды; 2 — прочный корпус;
- 3 — штуцеры вывода водорода и кислорода;
- 4 — электрохимическая группа

Работа электролизера начинается с подачи в полость электролита определенного количества воды через канал 13. Вода разбавляет электролит в электролизере до минимальной рабочей концентрации (20...25 %).

В момент, когда на анод и катод подается напряжение, через мембрану, пропитанную электролитом, начинает проходить ток, и на границе между анодом и мембраной выделяется кислород, а на границе между катодом 9 и мембраной — водород. Газы не проникают через мембрану из-за сил поверхностного натя-

жения жидкости, вследствие чего они проходят через пористые электроды в полости кислорода и водорода соответственно.

Так как при работе щелочного электролизера происходит нагрев мембраны, процесс испарения воды из электролита усиливается. Водяной пар проходит через электроды с поверхности мембраны в газовые полости и частично конденсируется на более холодном слое пористого гидрофильного материала 2. Образовавшаяся вода впитывается в гидрофильный слой.

Тепло от конденсации водяного пара передается телу и отводится от него внешними средствами аналогично механизму действия тепловой трубы. Избыточная вода в гидрофильном слое под действием капиллярного давления перемещается в полость электролита 12 вследствие того, что капиллярное давление в гидрофильном слое выше, чем упругое давление перегородок 3 и 11 на электролит.

Катод и анод, выполненные цилиндрическими, расположены коаксиально и состоят из никелевых сеток, между которыми установлена полимерная мембрана. Электрохимическая группа помещена в герметичный металлический корпус. Трубопроводы вывода газов, являются также токоподводами и изолированы от корпуса. Третий трубопровод предназначен для заправки электролитом и дистиллированной водой.

Электролизеры на основе твердой полимерной мембраны. В электролизной ячейке полимерно-электролитной мембраны (ПЭМ) использован прочный пластик из сульфонированного перфторированного полимера, производимого компанией DuPont под торговым названием Nafion [13]. Когда мембрана полностью гидратирована водой, она является отличным ионным проводником и функционирует как единственный электролит в электролизной ячейке ПЭМ.

На каждой стороне мембраны закреплены тонкие слои катализатора, образующие анодный и катодный электроды ячейки. Этот твердый полимерный электролит с присоединенными каталитическими электродами представляет собой мембранно-электродную сборку (МЭБ).

Ионную проводимость обеспечивают функциональные группы сульфоновой кислоты в мембране. Гидратированные ионы водорода (или протоны) мигрируют от анода к катоду, проходя между гидратированными группами

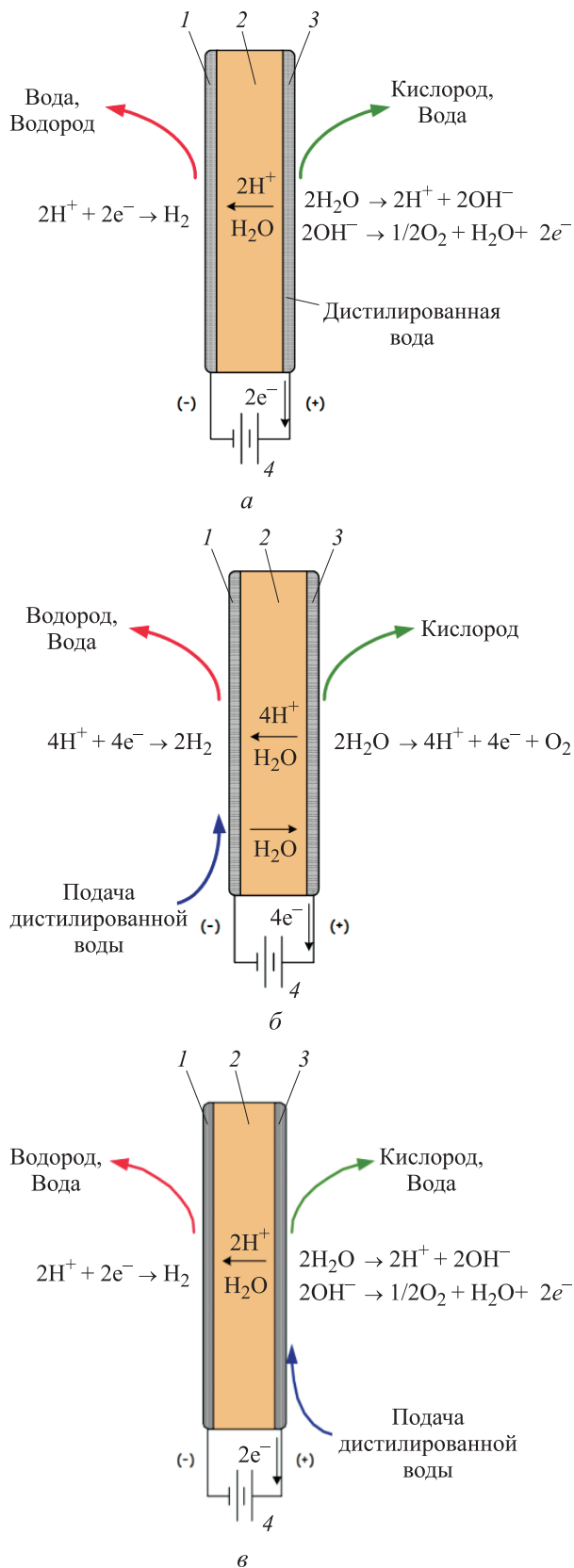


Рис. 3. Схема работы электролизной ячейки с использованием ПЭМ (а), при подаче воды со стороны анода (б) и катода (в):

1 — катод; 2 — протонпроводящая полимерная мембрана (ПЭМ); 3 — анод; 4 — источник постоянного тока

сульфоновой кислоты, которые закреплены и не мигрируют в твердом полимерном электролите. На рис. 3, а показаны электрохимические реакции, происходящие в одной ячейке электролиза воды с использованием ПЭМ.

Вода диссоциирует на аноде или кислородном электроде с образованием гидроксильных ионов и протонов. Гидроксильные ионы разряжаются с образованием нейтрального газообразного кислорода, а протоны мигрируют через мембрану от анода к катоду под действием электрического поля. Электроны переносятся источником постоянного тока к катоду, где протоны разряжаются с образованием нейтрального газа водорода. Протоны, мигрирующие через мембрану, полностью гидратируются, выделяя при разряде воду в катодной полости ячейки.

Скорость переноса воды к катоду ячейки может в 8 раз превышать скорость выделения водорода на молярной основе в зависимости от условий работы ячейки. Кислород и водород образуются в стехиометрическом соотношении со скоростью, пропорциональной току ячейки. При правильной конструкции ячейки и системы давление подачи газа можно увеличить для удовлетворения потребностей системы простым обратным давлением на выходе из электролизной ячейки.

Электролизеры ПЭМ на основе воды можно спроектировать и эксплуатировать в соответствии с тремя режимами подачи воды: со стороны анода и катода и статической подачи воды. Реакции в ячейках, показанные на рис. 3, а, одинаковы для всех режимов подачи, но состав системы в целом существенно различается.

Подача воды со стороны анода. В таком режиме дистиллированная вода поступает на анод или кислородную сторону электролизной ячейки для преобразования в водород и кислород, а также для терморегулирования ячейки. Этот режим выгоден в случаях, требующих высокой скорости производства газа, так как вода поступает непосредственно к месту, где происходит реакция ее диссоциации.

Поток протонов/воды, движущийся от анода к катоду, обеспечивает непрерывное прохождение воды через мембрану, тем самым поддерживая ее содержание в полимерном электролите. Так как градиент воды через мембрану очень мал, ее омическое сопротивление лишь незначительно зависит от плотности тока. Поэтому

электролизная ячейка ПЭМ, работающая в режиме анодной подачи, способна обеспечить самую высокую плотность тока и выход газа, достижимые при самых низких потенциалах ячейки с одинаковыми рабочими температурой и давлением.

В результате для получения определенного выхода газа требуется меньшее количество ячеек, чем в других режимах питания. Для терморегулирования ячеек избыток воды подается в анодную полость, и тепло, генерируемое реакциями в ячейках, переносится и отводится во внешний теплоотвод. На рис. 3, б приведена схема работы электролизной ячейки с анодной подачей воды. Следует отметить, что системы с жидкой анодной подачей требуют значительно вспомогательного технологического оборудования, чтобы очистить газы для конечного использования.

Так как вода присутствует в обоих газовых потоках, для отделения продуктов электролиза от двухфазных технологических потоков нужны фазовые сепараторы высокого давления в линиях кислорода и водорода. В контуре водород/вода требуется фазовый разделитель низкого давления или другое устройство, например, электрохимический водородный насос, для предотвращения возврата растворенного водорода на анод.

В гравитационном поле силы плавучести, действующие на коалесцирующие пузырьки газа, упрощают его отделение от жидкости, по-

скольку газ просто поднимается из жидкости на поверхность.

В отсутствие этих сил требуются более сложные и энергоемкие средства разделения двухфазной смеси. Роторные фазовые сепараторы прикладывают к смеси центробежную силу и основаны на эффекте плавучести для разделения смеси [14]. Хотя эти компоненты эффективны для разделения фаз, они увеличивают нагрузку на систему и создают для нее значительный риск в случае работы с потоками жидкости при повышенном давлении.

В работах [15–19] предложена конструкция ДУ, оснащенная БЭУ с катодной подачей воды (рис. 4), содержащая бак с водой, насос подкачки воды в буферную емкость, электролизную установку высокого давления, включающую в себя электролизный модуль, регулятор перепада давления (РПД), пневмогидравлические агрегаты, систему терморегулирования (СТР), баллоны для хранения газообразных водорода и кислорода, систему управления и электрообеспечения, датчики, двигатели, работающие на продуктах разложения воды (газообразных кислороде и водороде), электрохимический генератор. Принципиально можно совместить электролизер с электрохимическим генератором в едином регенеративном блоке.

БЭУ, описанная в работе [15] (рис. 5), содержит электролизный модуль высокого давления (ЭМВД), блоки очистки кислорода (БОК) и водорода (БОВ), РПД, емкости для кислорода

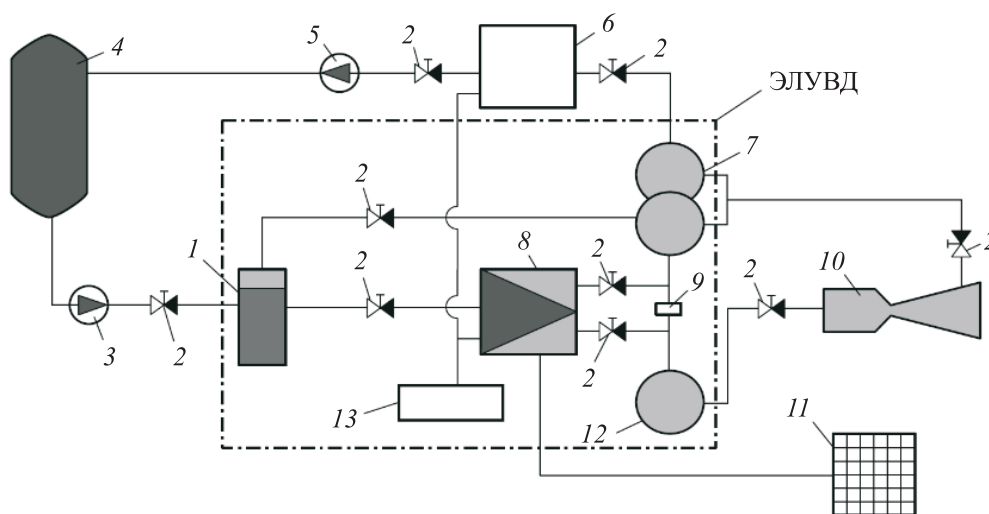


Рис. 4. Блок-схема ДУ, оснащенная БЭУ с катодной подачей воды:

- 1 — буферная емкость; 2 — пневмогидравлические агрегаты; 3 — насос подкачки воды; 4 — бак с водой;
 5 — насос возврата воды в бак; 6 — электрохимический генератор; 7 — баллоны с газообразным водородом;
 8 — электролизер; 9 — РПД; 10 — двигатель; 11 — солнечная батарея; 12 — баллон с газообразным кислородом;
 13 — СТР; ЭЛУВД — электролизная установка высокого давления

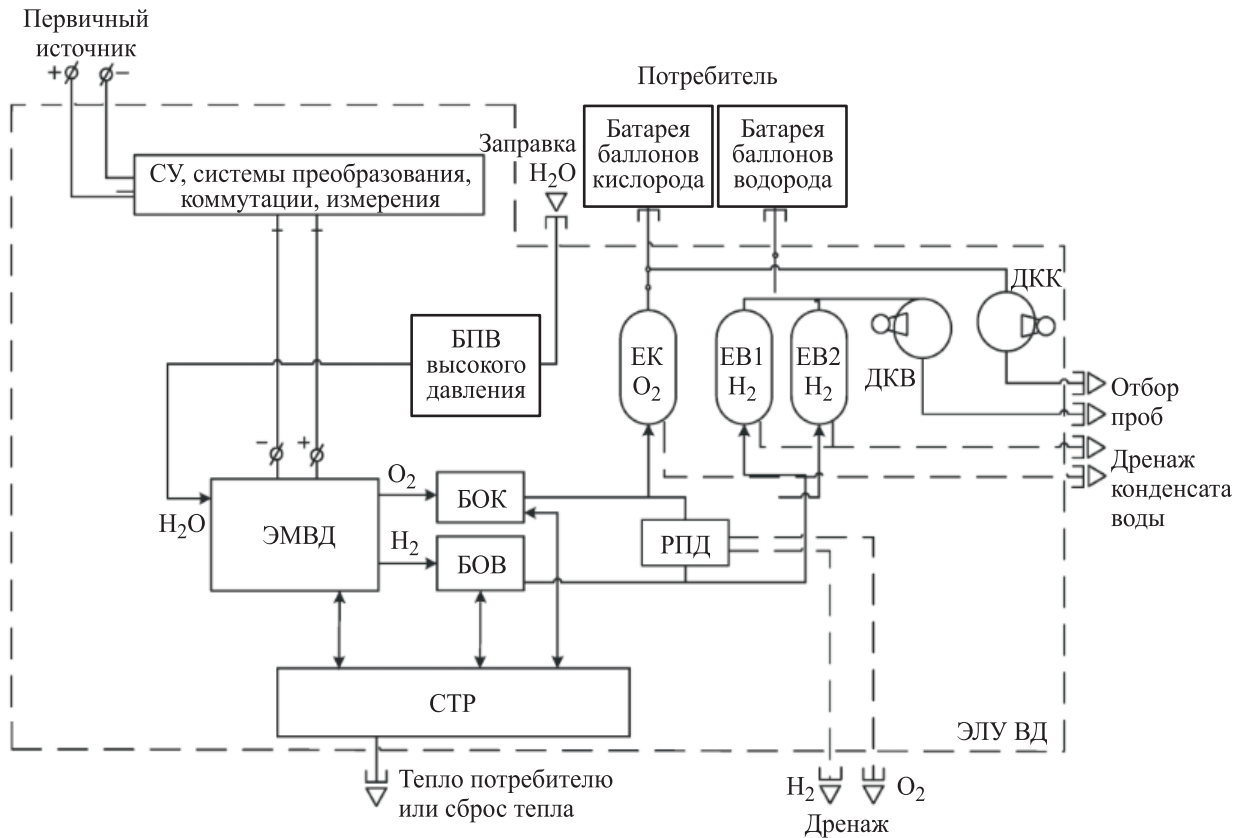


Рис. 5. Блок-схема БЭУ

(ЕК) и водорода (ЕВ), блок подачи воды (БПВ), СТР, систему управления (СУ), датчики концентрации кислорода (ДКК) и водорода (ДКВ).

ЭМВД [16] спроектирован специалистами ФГУП «Красная звезда» и РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Электролизный модуль состоит из сборки мембранно-электродных блоков и разгрузочного корпуса. Сборка представляет собой фильтр-прессную конструкцию (пакет) из последовательно собранных и чередующихся мембранно-электродных ячеек и биполярных пластин. Пакет из двенадцати ячеек, размещенный между опорным фланцем и замыкающей плитой, стянут шпильками (рис. 6).

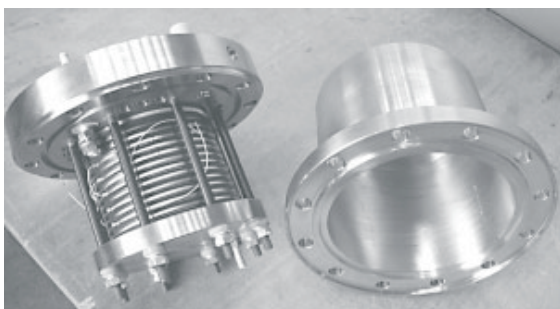


Рис. 6. Внешний вид ЭМВД и его разгрузочный корпус

Таким образом, при работе ЭМВД в анодную полость через ее входные патрубки поступает вода (см. рис. 5). При этом из ее выходных патрубков «O₂» выделяется смесь кислорода и капель воды, а из патрубков «H₂» — смесь водорода и капель воды, которые требуют последующего разделения в сепараторах электролизной установки.

Подача воды со стороны катода. В этом режиме дистиллированная вода подается на катод, или водородную сторону электролизной ячейки. Жидкая вода под действием физико-химического градиента потенциала диффундирует через полимерный электролит к аноду (кислородная сторона), где она диссоциирует на соответствующие компоненты.

Как и в ячейке с анодной подачей, гидратированные протоны мигрируют через полимерный электролит от анода к катоду и электроосмотически увлекают воду от анода. Это условие эффективно поддерживает низкое содержание воды на анодной стороне мембраны (анолит). Таким образом, выходящий кислородный газ несколько суше, чем при подаче со стороны катода.

Вследствие повышенного градиента концентрации воды в мембране омическое сопротивление полимерного электролита зависит от плотности тока в ячейке. Это приводит к более высокой поляризации ячейки (повышенному напряжению), чем в ячейке с подачей со стороны анода, работающей в тех же условиях.

Для предотвращения полного высыхания анолита и потенциального повреждения ячеек плотность тока при катодной подаче воды ограничена, что приводит к увеличению количества ячеек, необходимых для получения определенного объема газа. На рис. 3, в приведена схема работы электролизной ячейки с катодной подачей воды.

Системы с жидким катодным питанием требуют меньше вспомогательных компонентов обработки, чем системы с жидким анодным питанием, так как из ячейки выходит только водород в виде двухфазной смеси. Для удаления воды из выходящего потока водорода применяют сепаратор газ/жидкая фаза. Вся вода в водородном контуре рециркулирует на катодную сторону ячейки, поэтому нет необходимости удалять растворенный водород, а следовательно, не нужен фазовый сепаратор.

Основным недостатком рассмотренной схемы является ее сложная конструкция (насосная циркуляция воды или щелочи, отдельные блоки отделения газов, дожигания примесей, теплосъема), необходимость дополнительного разде-

ления парогазовой смеси и большая масса для применения на малых КА и тем более в кубсатах.

Статическая подача воды. Электролизные ячейки со статической подачей воды (Static water feed) упрощают требования к системе электролиза и устраняют необходимость в разделителях фаз газ/жидкость, что требуется для электролизеров в составе ДУ КА. МЭБ спроектирован со встроенной системой дозирования воды, которая подает воду на электролизную мембрану только в том объеме, в котором она потребляется (рис. 7).

Вода содержится за полупроницаемой мембраной, называемой барьером подачи рабочего тела, которая позволяет ей поступать на электролизную мембрану только в том объеме, в котором вода, уже присутствующая в мембране, будет израсходована. Вода мигрирует под действием градиента химического потенциала, установленного между мембраной барьера для подачи воды и катодной поверхностью электролизной мембраны.

Затем вода проходит через электролизную мембрану к аноду, как в ячейке с жидким катодом, где она подвергается электролизу. Газы водорода и кислорода подаются в равновесии с давлением водяного пара над электролизной мембраной при температуре процесса.

Так как циркулирующая жидкость не находится в прямом контакте с электролизной мем-

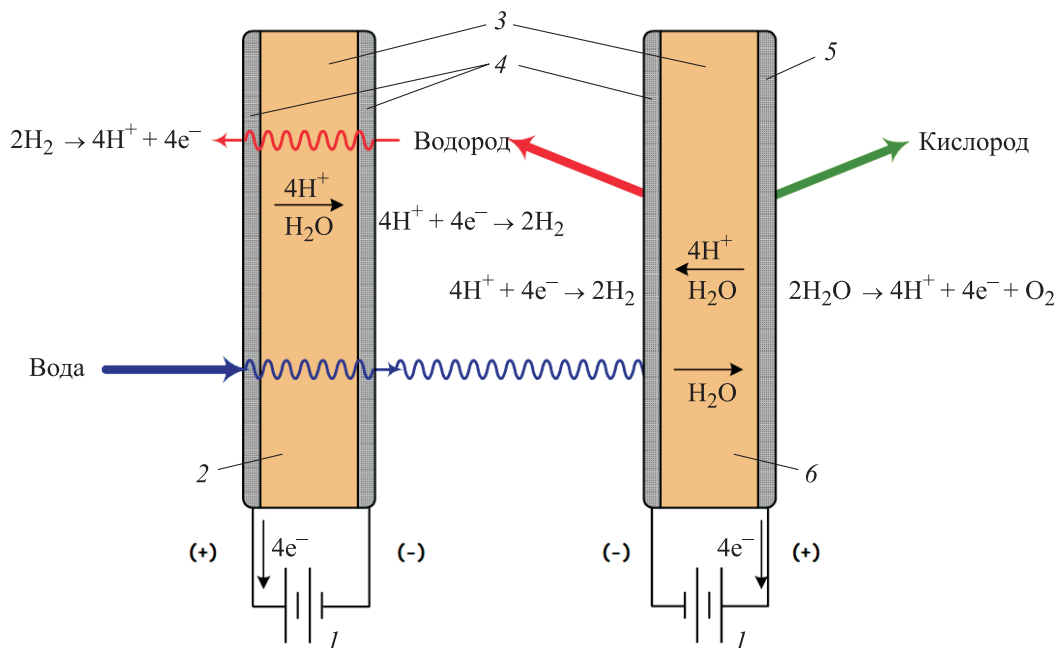


Рис. 7. Схема работы электролизной ячейки со статической подачей воды:

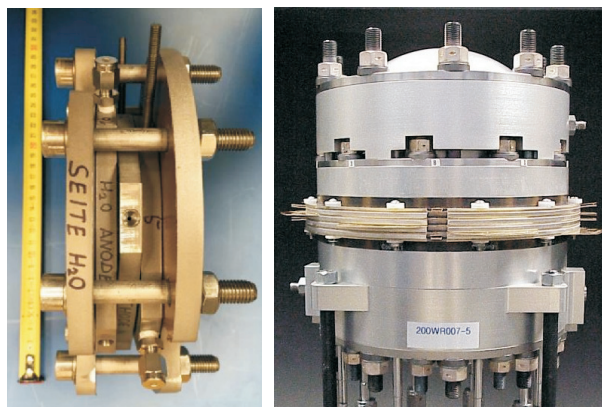
1 — источник постоянного тока; 2 — барьер для подачи воды; 3 — PEM; 4 — катод; 5 — анод; 6 — мембрана

браной и связанным с ней оборудованием, требуется средство для отвода тепла от ячейки. Изолированное охлаждающее устройство, расположенное рядом с кислородной стороной ячейки, позволяет применять различные варианты охлаждения, включая активное охлаждение с помощью циркулирующей жидкости.

Движущая сила воды через мембраны не связана с гидравлическим давлением, поэтому полость ее подачи может поддерживаться при низком давлении, что еще больше упрощает конструкцию системы. Вставка пластины пористой металлической среды в полость подачи воды низкого давления обеспечивает адекватную поддержку мембраны, когда водородная сторона барьерной мембраны подачи воды находится под давлением.

Электрический потенциал прикладывается к барьеру для подачи воды, чтобы поддерживать питательную воду свободной от растворенного водорода. Любой растворенный водород, мигрирующий под действием установленного градиента давления, преобразуется в протоны, которые электроосмотически перекачиваются обратно в водородную полость и выбрасываются обратно в водородный газ.

С точки зрения общей системы статический электролиз воды позволяет значительно умень-



а

б

Рис. 8. Внешний вид ПЭМ электролизеров, разработанных Университетом космических систем Штутгарта (а) и Высшей школой энергетических наук совместно с компанией Hamilton Sundstrand (б)

шить количество вспомогательных компонентов, необходимых для обеспечения работы электролизера, однако сами МЭБ имеют более сложную конструкцию.

Рассмотренная конструкция электролизера, предложенная в работе [20], реализована в Высшей школе энергетических наук (Япония) [21–23] и Hamilton Sundstrand по заказу DARPA [24]. Также специалисты Университета космических систем Штутгарта и Arian Group разра-

Техническая характеристика БЭУ

Параметр	БЭУ разработки		
	МЭИ	ISS, University of Stuttgart	ПАО «РКК «Энергия», ФГУП «Красная звезда»
Тип электролизера	Щелочной	Твердополимерный	Твердополимерный
Тип электролита	Матрица из асбеста толщиной 500 мкм, пропитанная КОН (30 %)	Пропитанные водой ионообменные мембраны Nafion 115 и Nafion 117	Пропитанные водой ионообменные мембраны Nafion, МФ-4СК толщиной 220...250 мкм (рН эквивалентна 10 % серной кислоты)
Производительность по водороду, л/мин	–	0,25	1,6
Давление на выходе, МПа	10	5	12
Мощность, Вт	500	20	500
Площадь активной зоны, см ²	50	25	50
Требуемый тип воды	Дистиллированная		
Диапазон рабочей температуры, °С	–60...+25	+20...+60	+70...+100
Источник данных	[10–12]	[19–24]	[13–17]
<i>Примечание.</i> Прочерк «–» означает, что в источнике данных значение параметра не указано.			

ботали прототип кислородно-водородной двигательной установки с применением твердополимерного электролизера аналогичной конструкции [25] (рис. 8).

Техническая характеристика рассмотренных БЭУ приведена в таблице.

Вывод

Рассмотренные БЭУ, которые в перспективе должны войти в состав ДУ систем ориентации

и стабилизации КА, имеют высокий технический уровень развития. Различия в конструкции и типе электролита не несут за собой ограничений по функциональности. Все типы БЭУ готовы к применению в ДУ КА. Наиболее перспективной конструкцией БЭУ для использования в условиях невесомости является твердополимерный электролизер с дополнительной мембраной ввиду отсутствия подвижных частей и жидкого электролита.

Литература

- [1] Лемешевский С.А., Графодатский О.С., Ширшаков А.Е. и др. Космическая транспортная система для освоения малых космических тел. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2018, № 2, с. 47–55.
- [2] Grogan P., Armar N., Siddiqi A. et al. A flexible architecture and object-oriented model for space logistics simulation. *AIAA Space Conf. Exposition*, 2009, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2009-6548>
- [3] Merrill R.G. An integrated hybrid transportation architecture for human Mars expeditions. *AIAA SPACE Conf. Exposition*, 2015, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4442>
- [4] Jones C.A., Merrill R.G., McVay E. Cis-lunar reusable in-space transportation architecture for the evolvable mars campaign. *AIAA SPACE*, 2016, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2016-5493>
- [5] Litvak M.L., Sanin A.B. Water in the solar system. *Phys.-Usp.*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 779–792, doi: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038277>
- [6] Shalashov M., Fedorov V., Vaulin S. Concept of application of water electrolysis propulsion system as a component of a universal space platform for asteroid exploration mission. *AS*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00110-0>
- [7] Rosenberg S.D., Judd D.C., Garrison P.W. Integratable propulsion systems for the Space Station. *J. Propuls. Power*, 1985, vol. 1, no. 1, pp. 65–69, doi: <https://doi.org/10.2514/3.22760>
- [8] Sovey J., Tacina R., Morren J.W. et al. Space station propulsion. *JANNAF Propulsion Conf.*, 1987. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880002364>
- [9] De Groot W., Arrington L., McElroy J. et al. Electrolysis propulsion for spacecraft applications. *33rd Joint Propulsion Conf. Exhibit*, 1997, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1997-2948>
- [10] Подобедов Г.Г., Смоленцев А.А., Смоляров В.А. и др. Солнечная водяная двигательная энергетическая установка. *Известия РАН. Энергетика*, 2013, № 1, с. 57–67.
- [11] Терентьев И.П., Туманин Е.Н., Щербаков А.Н. *Электролизер воды и способ его эксплуатации*. Патент РФ 2647841. Заявл. 11.08.2016, опубл. 21.03.2018.
- [12] Королев С.П., Кулешов В.Н., Кулешов Н.В. и др. Электролизер высокого давления с фитильной подачей воды для работы в невесомости. *Известия РАН. Энергетика*, 2019, № 2, с. 68–77, doi: <https://doi.org/10.1134/S0002331019020092>
- [13] Иванчев С.С. Полимерные мембраны для топливных элементов: получение, структура, модифицирование, свойства. *Успехи химии*, 2010, т. 79, № 2, с. 117–134.
- [14] Doyle K., Peck M.A., Jones L.L. Spinning CubeSats with liquid propellant. *AIAA Guidance, Navigation, Control Conf.*, 2016, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1369>
- [15] Глухих И.Н., Лопота В.А., Соколов Б.А. и др. Установки с электролизерами воды высокого давления. *Альтернативная энергетика и экология*, 2007, № 11, с. 73–79.
- [16] Глухих И.Н. *Бортовая электролизная установка космического аппарата*. Патент РФ 2525350. Заявл. 11.12.2012, опубл. 10.08.2014.
- [17] Глухих И.Н., Челяев В.Ф., Щербаков А.Н. Разработка накопителя водорода на основе твердополимерного электролизера воды. *Известия РАН. Энергетика*, 2012, № 2, с. 111–119.
- [18] Глухих И.Н., Старостин А.Н., Щербаков А.Н. Разработка электролизного накопителя энергии для автономных энергоустановок. *Известия РАН. Энергетика*, 2013, № 4, с. 124–132.

- [19] Глухих И.Н., Федорова Ю.М. *Электролизная установка космического назначения и способ ее эксплуатации*. Патент РФ 2543048. Заявл. 21.06.2013, опубл. 27.02.2015.
- [20] Lenoida A. Hydrogen/oxygen SPE electrochemical devices for zero-g applications. *European Space Power Conf.*, 1989, vol. 294, no. 1, p. 227.
- [21] Guo Q. Gas/water and heat management of PEM-based fuel cell and electrolyzer systems for space applications. *Microgravity Sci. Technol.*, 2017, vol. 29, no. 1–2, pp. 49–63, doi: <https://doi.org/10.1007/s12217-016-9525-6>
- [22] Matsushima H. Water electrolysis under microgravity (Part II). *Electrochim. Acta*, 2003, vol. 48, no. 28 (48), pp. 4119–4125, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00579-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00579-6)
- [23] Sakurai M., Sone Y., Nishida T. et al. Fundamental study of water electrolysis for life support system in space. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 100, pp. 3510–357, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.112>
- [24] Papale W., Roy R. A water-based propulsion system for advanced spacecraft. *Space Forum*, 2006, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2006-7240>
- [25] Harmansa N.-E. Development of a satellite propulsion system based on water electrolysis. *Int. J. Energetic Mater. Chem. Propuls.*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 185–199, doi: <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2019028538>

References

- [1] Lemeshevskiy S.A., Grafodatskiy O.S., Shirshakov A.E. et al. Space transport systems for industrial and scientific development of small celestial bodies. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2018, no. 2, pp. 47–55. (In Russ.).
- [2] Grogan P., Armar N., Siddiqi A. et al. A flexible architecture and object-oriented model for space logistics simulation. *AIAA Space Conf. Exposition*, 2009, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2009-6548>
- [3] Merrill R.G. An integrated hybrid transportation architecture for human Mars expeditions. *AIAA SPACE Conf. Exposition*, 2015, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4442>
- [4] Jones C.A., Merrill R.G., McVay E. Cis-lunar reusable in-space transportation architecture for the evolvable mars campaign. *AIAA SPACE*, 2016, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2016-5493>
- [5] Litvak M.L., Sanin A.B. Water in the solar system. *Phys.-Usp.*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 779–792, doi: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038277>
- [6] Shalashov M., Fedorov V., Vaulin S. Concept of application of water electrolysis propulsion system as a component of a universal space platform for asteroid exploration mission. *AS*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00110-0>
- [7] Rosenberg S.D., Judd D.C., Garrison P.W. Integratable propulsion systems for the Space Station. *J. Propuls. Power*, 1985, vol. 1, no. 1, pp. 65–69, doi: <https://doi.org/10.2514/3.22760>
- [8] Sovey J., Tacina R., Morren J.W. et al. Space station propulsion. *JANNAF Propulsion Conf.*, 1987. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880002364>
- [9] De Groot W., Arrington L., McElroy J. et al. Electrolysis propulsion for spacecraft applications. *33rd Joint Propulsion Conf. Exhibit*, 1997, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1997-2948>
- [10] Podobedov G.G., Smolentsev A.A., Smolyarov V.A. et al. Solar water propulsion and power generating system. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2013, no. 1, pp. 57–67. (In Russ.).
- [11] Terent'yev I.P., Tumanin E.N., Shcherbakov A.N. *Elektrolizer vody i sposob ego ekspluatatsii* [Water electrolyser and operation method thereof]. Patent RU 2647841. Appl. 11.08.2016, publ. 21.03.2018. (In Russ.).
- [12] Korolev S.P., Kuleshov V.N., Kuleshov N.V. et al. High pressure water elektrolyzer for ungravity space. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2019, no. 2, pp. 68–77, doi: <https://doi.org/10.1134/S0002331019020092> (in Russ.).
- [13] Ivanchev S.S. Polymer membranes for fuel cells: manufacture, structure, modification, properties. *Uspekhi khimii*, 2010, vol. 79, no. 2, pp. 117–134. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Chem. Rev.*, 2010, vol. 79, no. 2, pp. 101–117, doi: <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n02ABEH004070>)
- [14] Doyle K., Peck M.A., Jones L.L. Spinning CubeSats with liquid propellant. *AIAA Guidance, Navigation, Control Conf.*, 2016, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1369>

- [15] Glukhikh I.N., Lopota V.A., Sokolov B.A. et al. Plants with electrolyzers of high pressure water. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology], 2007, no. 11, pp. 73–79. (In Russ.).
- [16] Glukhikh I.N. *Bortovaya elektroliznaya ustanovka kosmicheskogo apparata* [Spacecraft onboard electrolysis unit]. Patent RU 2525350. Appl. 11.12.2012, publ. 10.08.2014. (In Russ.).
- [17] Glukhikh I.N., Chelyaev V.F., Shcherbakov A.N. High pressure hydrogen accumulator with PEM water electrolyzer. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2012, no. 2, pp. 111–119. (In Russ.).
- [18] Glukhikh I.N., Starostin A.N., Shcherbakov A.N. Development of a high pressure hydrogen accumulator with pem electrolyzer for renewable energy sources. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2013, no. 4, pp. 124–132. (In Russ.).
- [19] Glukhikh I.N., Fedorova Yu.M. *Elektroliznaya ustanovka kosmicheskogo naznacheniya i sposob ee ekspluatatsii* [Electrolyzer for space application and method of its exploitation]. Patent RU 2543048. Appl. 21.06.2013, publ. 27.02.2015. (In Russ.).
- [20] Lenoida A. Hydrogen/oxygen SPE electrochemical devices for zero-g applications. *European Space Power Conf.*, 1989, vol. 294, no. 1, p. 227.
- [21] Guo Q. Gas/water and heat management of PEM-based fuel cell and electrolyzer systems for space applications. *Microgravity Sci. Technol.*, 2017, vol. 29, no. 1–2, pp. 49–63, doi: <https://doi.org/10.1007/s12217-016-9525-6>
- [22] Matsushima H. Water electrolysis under microgravity (Part II). *Electrochim. Acta*, 2003, vol. 48, no. 28 (48), pp. 4119–4125, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00579-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00579-6)
- [23] Sakurai M., Sone Y., Nishida T. et al. Fundamental study of water electrolysis for life support system in space. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 100, pp. 3510–357, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.112>
- [24] Papale W., Roy R. A water-based propulsion system for advanced spacecraft. *Space Forum*, 2006, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2006-7240>
- [25] Harmansa N.-E. Development of a satellite propulsion system based on water electrolysis. *Int. J. Energetic Mater. Chem. Propuls.*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 185–199, doi: <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2019028538>

Статья поступила в редакцию 23.11.2021

Информация об авторах

ШАЛАШОВ Михаил Андреевич — инженер-конструктор лаборатории «Ракеты-носители, космические и беспилотные летательные аппараты». Политехнический институт Южно-Уральского горного университета (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: shalashovma@susu.ru).

ПЕШКОВ Руслан Александрович — кандидат технических наук, доцент, руководитель лаборатории «Ракеты-носители, космические и беспилотные летательные аппараты». Политехнический институт Южно-Уральского горного университета (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: peshkovra@susu.ru).

Information about the authors

SHALASHOV Mikhail Andreevich — Design Engineer, Laboratory of Launch Vehicles, Space and Unmanned Aerial Vehicles. Polytechnic Institute, South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenina Av., Bldg. 76, e-mail: shalashovma@susu.ru).

PESHKOV Ruslan Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Launch vehicles, space and unmanned aerial vehicles. Polytechnic Institute, South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenina Av., Bldg. 76, e-mail: peshkovra@susu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шалашов М.А., Пешков Р.А. Анализ основных методов получения ракетного топлива путем электролиза воды. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 3, с. 113–123, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-113-123

Please cite this article in English as:

Shalashov M.A., Peshkov R.A. Analysis of the Main Methods of Obtaining Propellant by Electrolysis of Water. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 3, pp. 113–123, doi: 10.18698/0536-1044-2022-3-113-123