

УДК 629.78.048

ОТРАБОТКА СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА И ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ РОССИЙСКОГО И АМЕРИКАНСКОГО СЕГМЕНТОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов, В.А. Бутрин, А.Л. Потемкин, П.О. Андрейчук, А.В. Юргин, А.М. Рябкин, Л.С. Бобе, Ю.П. Бутылкин, А.А. Кочетков, В.Ю. Прошкин

Канд. техн. наук А.С. Гузенберг; канд. техн. наук А.Г. Железняков; докт. техн. наук С.Ю. Романов; В.А. Бутрин; А.Л. Потемкин; П.О. Андрейчук; А.В. Юргин; канд. техн. наук А.М. Рябкин (ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва») Докт. техн. наук Л.С. Бобе; канд. техн. наук Ю.П. Бутылкин; А.А. Кочетков; канд. техн. наук В.Ю. Прошкин (АО «НИИХиммаш»)

Для реализации межпланетных экспедиций, включая лунные, необходимы эффективные комплексы системы жизнеобеспечения (КСЖО) с минимальными затратами переменной массы продуктов и оборудования за счет регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности экипажа. Для отработки таких КСЖО целесообразно использовать опыт эксплуатации систем жизнеобеспечения КСЖО орбитальной космической станции «Мир» и Международной космической станции (МКС). Рассматривается необходимость отработки средств обеспечения газового состава (СОГС) и средств водообеспечения (СВО) на МКС, а также на Российской орбитальной служебной станции (РОСС) для межпланетных экспедиций, и состояние этой отработки на российском и американском сегментах МКС.

Ключевые слова: межпланетные экспедиции, комплекс систем жизнеобеспечения (КСЖО), средства обеспечения газового состава (СОГС), средства водообеспечения (СВО), отработка СОГС и СВО

Debugging of Atmospheric Revitalization and Water Supply Equipment for the Life Support Systems Complex Based on the Life Support Systems of the ISS Russian and US Segments in the Interests of Interplanetary Expeditions. A.S. Guzenberg, A.G. Zheleznyakov, S.Yu. Romanov, V.A. Butrin, A.L. Potemkin, P.O. Andreichuk, A.V. Yurgin, A.M. Ryabkin, L.S. Bobe, Yu.P. Butylkin, A.A. Kochetkov, V.Yu. Proshkin

To implement interplanetary missions, including those to the Moon, the efficient life support systems complexes (CLSS) minimizing variable mass of products and equipment by means of water and oxygen recovery from crew waste are required. For debugging such LSSCs, it is reasonable to apply the experience

obtained in using such complexes on the MIR orbital station and ISS. The need for debugging the Atmospheric Revitalization and Water Supply Equipment on both the ISS and Russian Orbital Service Station (ROSS) in the interests of interplanetary missions as well as the status of the debugging procedure on the ISS RS and USOS is considered.

Keywords: interplanetary missions, life support systems complex, atmospheric revitalization equipment, water supply equipment, debugging of atmospheric revitalization and water supply equipment

Комплексы систем жизнеобеспечения для орбитальной станции «Мир» и МКС с частичной регенерацией воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности экипажа позволяют осуществлять полет человека в околоземном космическом пространстве при регулярной доставке с Земли воды, запасов газа и продуктов [1–5].

Опыт эксплуатации КСЖО орбитальных космических станций «Мир» и МКС целесообразно использовать для отработки замкнутых КСЖО с регенерационными системами для осуществления дальних полетов – лунной и марсианской экспедиций [3–13].

Для необходимой автономности средств обеспечения газового состава и водообеспечения для дальних полетов следует осуществить в первую очередь отработку на модулях российского сегмента (РС) МКС системы концентрирования и переработки углекислого газа с извлечением кислорода и систем извлечения воды за счет регенерации конденсата атмосферной влаги и урины, а также ряд других систем, включая средства санитарно-гигиенического обеспечения (ССГО) (умывальник, душ, сауну, стирку) и систему регенерации используемой воды.

СЖО – одни из немногих систем, работающих на МКС непрерывно, и в которых осуществляется разделение газожидкостных фаз в невесомости, что требует специальных решений как при проектировании аппаратуры, так и при ресурсной отработке в условиях микрогравитации.

Отработка регенерационных систем и всего первоначального регенерационного КСЖО, необходимого для экспедиций дальнего космоса, займет не менее 8–10 лет. Это обуславливает целесообразность и необходимость отработки действующих и перспективных российских регенерационных СЖО на МКС, а в дальнейшем на станции РОСС.

Рассматривается состояние отработки СЖО на российском и американском сегменте МКС и предложения по отработке конкретных систем СОГС, СВО и частично агрегатов санитарно-гигиенического обеспечения на МКС и РОСС для дальних полетов.

Отработка регенерационных СЖО и КСЖО дальнего космоса на МКС

Отработка российских регенерационных СЖО и КСЖО дальнего космоса.

В РФ проводятся научно-исследовательские работы, направленные на созда-

ние СЖО дальнего космоса. Однако ряд этих работ проводится на основе общего плана по заданию проектных, а не конструкторских предприятий, что не приводит к созданию конструкций систем.

Из российских систем на РС МКС проводится отработка системы регенерации воды из урины (СРВ-У) в качестве научного эксперимента (что вызывает торможение отработки), а с 2022 года – отработка и эксплуатация штатной системы СРВ-УМ на модуле «Наука» совместно с ассенизационно-санитарным устройством (АСУ) и подсистемой приема и консервации урины (СПК-УМ) в АСУ-СПК-УМ. Основные данные по СВО, прежде всего по работе несущей основную нагрузку СРВ-К2М, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные результаты работы средств водообеспечения РС МКС

Параметры работы системы	Значение
	с 02.11.2000 по 30.11.2021
Продолжительность работы СРВ-К2М по приему конденсата атмосферной влаги, сут чел.сут	7768 19 502
Количество конденсата атмосферной влаги, регенерированное в СРВ-К2М, л, в том числе подано через БПК:	24 228
конденсат	3820
дистиллят урины из системы СРВ-У-РС	152,2
дейодированная вода из американских емкостей CWC	290,8
вода из запасов	1458
Среднее потребление питьевой регенерированной воды из СРВ-К2М для пищевых целей, л/сут	3,12
Количество воды, повторно регенерированной в СРВ-К2М, л	110
Количество использованной в СРВ-К2М питьевой воды, л, в том числе:	14 083
из емкостей CWC	1673
из системы «Родник»	11 703
из американского бака ATV	707
Всего из СРВ-К2М получено воды, л	38 311
Количество питьевой воды, использованной из ЕДВ-ЗВ, л	4560
Количество воды, очищенное для системы «Электрон-ВМ» из системы «Родник», л	13 381
Количество смывной воды в СПК-УМ из системы «Родник», л	6347
Общее потребление доставляемой воды запасов, л	39 816
Количество перерабатываемого в СРВ-К2М американского конденсата, л, поступившего:	
в сборник US Lab	4706
в сборник WPA	21 816
суммарно	26 522
Общее количество конденсата, л (л/чел.сут)	50 671 (1,49)
Количество принятой урины, л (л/чел.сут):	
в АСУ СМ	27 278 (1,41)
в АСУ АС	23 794 (1,63)
суммарно	51 072 (1,50)

Отработка американских регенерационных СЖО и КСЖО дальнего космоса. Отработка регенерационных СЖО и КСЖО дальнего космоса, включая программу «Артемиды», является основной задачей НАСА на МКС.

В США активно проводились и проводятся научно-исследовательские работы, направленные на создание систем нового поколения, которые обладали бы лучшими эксплуатационными характеристиками. Это как адсорбционные технологии, так и работы в области мембранной технологии концентрирования диоксида углерода. Основными преимуществами мембранных методов разделения является непрерывность процессов, низкие удельные энергозатраты, длительный ресурс работы мембран, осуществление процесса разделения при комнатной температуре. Мембраны – полые пористые волокна, через которые протекают жидкости, поглощающие CO_2 и регенерируемые при низких температурах. В качестве таких жидкостей рассматриваются ионные жидкости или амины. Они могут стать реальной альтернативой адсорбентам, используемым в космических системах концентрирования CO_2 [14]. Высокие значения коэффициентов разделения CO_2/N_2 и CO_2/O_2 позволяют создать концентраторы CO_2 непрерывного действия небольших размеров [15].

Параллельно разрабатываются различные электрохимические методы концентрирования и переработки CO_2 [6]. Широко исследуются также методы переработки CO_2 для регенерации кислорода различными методами, в том числе плазменный и лазерный пиролиз, электрохимическая регенерация кислорода из CO_2 , реакция Боша и другие. Исследуются также новые технологии СВО и ССГО.

В настоящее время целый ряд технологий НАСА в виде систем вышли на уровень отработки на борту МКС.

В части СОГС в настоящее время в НАСА проводится отработка нескольких систем удаления и концентрирования углекислого газа и несколько газоанализаторов вредных примесей разного типа. Дальнейшая программа предусматривает отработку модернизированных и новых СОГС с объединением их в единый КСЖО дальнего космоса.

Отрабатываются и продолжают отрабатываться следующие системы и агрегаты СОГС:

- конденсатор-теплообменник и разделитель газожидкостной смеси, регулирующие влажность и температуру атмосферы станции и сбор конденсата для последующей обработки;
- система удаления микропримесей (TCCS);
- система удаления углекислого газа, в том числе регенерационный фильтр очистки атмосферы скафандра от CO_2 и вредных примесей;
- система переработки CO_2 , в которой извлекается кислород из CO_2 посредством реакции с водородом с образованием воды и побочных соединений;
- система генерации кислорода на основе электролиза воды;

- автоматические газоанализаторы вредных примесей;
- средства пожаротушения.

Конденсатор-теплообменник будет модернизирован за счет гидрофильного покрытия с улучшенными характеристиками, включая антимикробные свойства и стойкость к силоксану, а также установкой на его вход фильтра для удаления силоксана и тяжелых органических соединений, отрицательно влияющих на агрегаты очистки воды.

Будут проведены замены HEPA-фильтров (HEPA – High Efficiency Particulate Arrestance), срок службы которых заканчивается.

В систему удаления вредных примесей TCCS будут введены регенерируемые угольные фильтры и проведена замена сорбентов на виброустойчивые.

По системе удаления CO₂ разрабатываются три возможных технологии. Две из них уже проходят испытания на АС МКС: система с термической регенерацией твердых аминов и система с четырьмя фильтрами, а третья – система с минифильтрами – проходит наземные испытания. После всей отработки для комплекса СЖО будет выбрана технология удаления CO₂. Переработка CO₂ включает реакцию Сабатье, реакцию Боша и пиролиз метана.

Все эти СОГС будут установлены в лабораторном модуле и после начальной отработки на борту МКС соединятся трубопроводами и шлангами и будут обрабатываться как единый комплекс.

Обрабатываются и продолжают обрабатываться следующие системы и агрегаты СВО:

- система сбора твердых и жидких продуктов жизнедеятельности человека (включая смывную воду) – ассенизационное устройство, туалет (UWMS);

- система регенерации воды из урины (UPA), которая восстанавливает пригодную для использования воду;

- система регенерации воды из конденсата (WPA), а также из обработанной урины и воды из процесса Сабатье до качества необходимого для потребления экипажа;

- система регенерации воды из концентрата урины, образующегося при обработке урины (BPA);

- система подачи и распределения питьевой воды (PWD).

Универсальная система управления отходами UWMS будет присоединена к существующему туалетному комплексу USOS, чтобы стать основным туалетом для его отработки с разной численностью экипажа.

В системе регенерации воды из урины UPA, находящейся на МКС, будет заменен вакуум-насос на более производительный и надежный нового типа, установлен также новый дистилляционный узел большей производительности, а также сделан ряд изменений для предотвращения имевших место отказов.

Система регенерации воды из конденсата WPA, которая в настоящее время находится на АС МКС, будет модернизироваться на основе опыта эксплуатации (снижение возможных утечек воды и неисправности датчиков, а также изменения для препятствия росту биопленки в сточных водах). Несколько доработок WPA были выполнены на АС МКС. Количество фильтров мультифильтрации было уменьшено с двух до одного, при этом использованы сорбенты с большей емкостью, чтобы улучшить удаление силоксанов в поступающем конденсате и продлить срок эксплуатации. Кроме того, был заменен катализатор и улучшены уплотнения в каталитическом реакторе.

В системе регенерации воды из концентрата урины ВРА в ходе наземных испытаний была проверена новая технология, которая позволяет восстановить большую часть воды. Выделяющаяся вода проходит через полупроницаемую мембрану для удержания переносимых с уриной летучих органических примесей, а водяной пар попадает в воздух кабины. Система была установлена на АС МКС и будет подвергнута длительным испытаниям.

В модернизированной системе подачи и распределения питьевой воды PWD будет использоваться опыт эксплуатации существующей PWD на АС МКС. Прежде всего это исследование роста микробов в период покоя и эффективности технологии проточной ультрафиолетовой дезинфекции, которая должна сократить использование расходных материалов системы. Кроме того, рассматривается вопрос о замене йода на ионное серебро.

В планируемом графике строительства «водопровода» – установка большей части оборудования на АС МКС. Это строительство будет включать обновления ВРА, WPA и UPA, которые уже установлены, а также добавление нового туалета. Дополнительные обновления UPA и WPA, а также доставка исследовательского PWD произойдут в 2022 году и позже.

В дальнейшем средства обеспечения газового состава и средства водообеспечения объединятся по материальным и информационным потокам и управлению, будут обрабатываться как единый КСЖО [16].

Интеграция американских регенерационных систем жизнеобеспечения на АС МКС в КСЖО

НАСА считает, что работа по интеграции новых и модернизированных регенерационных систем жизнеобеспечения на АС МКС является высокоприоритетной и что АС МКС была создана не только для выполнения научных задач, но и для развития технологий жизнеобеспечения, которые понадобятся для будущего исследования космоса. Поэтому приоритетность выполнения этой работы очень высока среди общего времени, выделенного экипажу.

Большинство модернизируемых систем на борту АС МКС рассматриваются как демонстрационные (экспериментальные) и не будут сертифицированы до тех пор, пока не будет доказана их работоспособность. Одна из основных целей отработки обновленных СЖО НАСА на АС МКС –

управление всеми системами в интегрированном виде, то есть отработка регенерационного КСЖО.

НАСА считает, что АС МКС в качестве испытательного стенда для усовершенствований СЖО будет использован в полной мере. Модернизированные СЖО разработаны или находятся в разработке, включая улучшения существующего оборудования. КСЖО будет испытываться на АС МКС в течение продолжительного времени для получения характеристик производительности и надежности систем. При этом НАСА разрабатывает широкий спектр технологий с определением массы запасных частей для достижения надежности, что требует длительного времени на отработку систем. Это достигается за счет сочетания испытаний СЖО и КСЖО на МКС и наземных испытаний в более широком рабочем диапазоне.

Преимущество российских систем СЖО и регенерационного КСЖО состоит в том, что они были отработаны на станции «Мир» и были модернизированы для МКС, тогда как американские системы впервые эксплуатировались на МКС. Вероятно, это одна из причин, по которой подобной явно выраженной позиции по отработке СЖО и КСЖО для дальнего космоса, проводимой НАСА, нет на РС МКС. Идет отработка только отдельных систем, прежде всего одной из основных систем водообеспечения – системы регенерации воды из урины и обслуживающих ее систем.

Однако для дальних полетов, включая лунные экспедиции, необходимы как доработка существующих систем, так и создание и отработка ряда новых систем, включая регенерационный КСЖО для дальних полетов [16–18].

Предложения по разработке и отработке перспективных российских систем жизнеобеспечения на МКС и РОСС

Для обеспечения готовности регенерационных КСЖО для дальних космических миссий (околорунные станции, долговременные лунные и марсианские обитаемые базы) в ближайшие 8–10 лет следует провести на МКС и РОСС отработку отдельных СЖО и отработку их в комплексе, объединенном по материальным и информационным потокам. Основные перспективные российские СЖО для отработки представлены на рис. 1.

Предлагается отработка и разработка следующих СЖО.

1. *В части средств обеспечения газового состава* целесообразна отработка на РС МКС следующих систем и агрегатов:

- система концентрирования и переработки углекислого газа (СПДУ), основная система (в стадии наземных ресурсных испытаний) [19];
- фотокаталитический блок удаления вредных примесей (в стадии согласования ТЗ) [20];
- газоаналитическая аппаратура вредных примесей в атмосфере (в стадии изготовления);



Рис. 1. Перспективные российские регенерационные системы жизнеобеспечения дальнего космоса

- НЕРА-фильтры тонкой очистки атмосферы от пыли (в стадии проработки) [21];
- газоаналитическая аппаратура основных газов (в стадии изготовления);
- система генерации кислорода «Электрон-ВМ» (в стадии отработки на борту);
- средства пожаробезопасности, которые должны быть одного типа для всех пилотируемых объектов (в стадии проработки).

Целесообразны наземные испытания и отработка на РС МКС или на РОСС следующих систем и агрегатов (в стадии проработки):

- система очистки от углекислого газа «Воздух»;
- система удаления вредных примесей (СБМП);
- система пиролиза метана;
- система переработки метана в пищевой белок.

2. В части средств водообеспечения целесообразна отработка на РС МКС следующих систем и агрегатов:

- система регенерации воды из урины (в стадии отработки на борту);
- система регенерации воды из концентрата урины (в стадии наземной отработки);
- ассенизационное устройство – прием и консервация урины (в стадии отработки на борту).

Целесообразны наземные испытания и отработка на РС МКС или на РОСС следующих систем и агрегатов (в стадии проработки):

- система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги с увеличенным в несколько раз ресурсом оборудования очистки воды;

- средства принятия водных процедур (СПВП) (умывание, душ, сауна);
- средства стирки;
- система регенерации санитарно-гигиенической воды (СРВ-СГ);
- средства водообеспечения на запасах воды;
- газоаналитическая аппаратура качества воды.

Большое значение будет иметь отработка на РС МКС впервые созданной промышленной витаминной цилиндрической оранжереи «Витацикл», находящейся в настоящее время в стадии наземной отработки (ранее на РС МКС работали только исследовательские установки). НАСА эксплуатирует на АС МКС только экспериментально-исследовательские оранжереи [17]. Российские оранжереи представлены на рис. 2.



Рис. 2. Российские промышленная цилиндрическая и исследовательские оранжереи

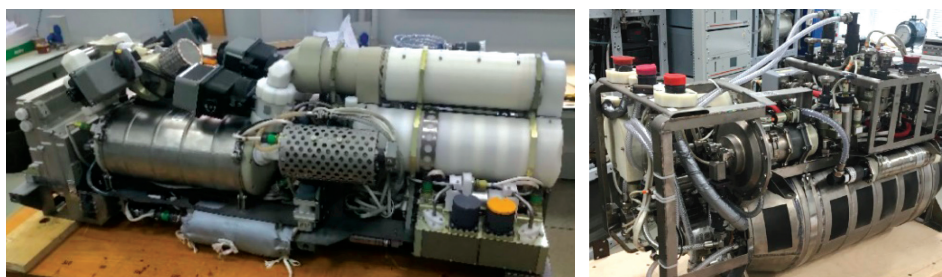
СПДУ включает в свой состав сорбционный блок концентрирования углекислого газа с регенерацией сорбентов паром и блок гидрирования сконцентрированного углекислого газа на основе реакции Сабатье с получением метана и воды, поступающей на электролиз для получения кислорода (либо на очистку для использования экипажем). Технология концентрирования построена на основе адсорбции углекислого газа на неорганическом поглотителе. Десорбция CO_2 осуществляется перегретым паром. Гидрирование CO_2 водородом по реакции Сабатье происходит на катализаторе в автотермическом режиме без потребления электроэнергии. Приведенная масса блока концентрирования приблизительно в 1,5 раза меньше, чем у американской CDRA,

также меньше ее энергопотребление. Эта система позволит значительно повысить замкнутость КСЖО, так как позволяет получить кислород из 60 % выдыхаемого человеком углекислого газа. Система проходит важную стадию – наземные ресурсные испытания. Нарботка системы на декабрь 2021 г. составила примерно 3500 ч. Внешний вид блоков СПДУ приведен на рис. 3 и основные параметры – в табл. 2 [19].

Таблица 2

Основные параметры СПДУ

Наименование	Значение
Производительность СПДУ по воде, г H ₂ O/ч	до 61
Производительность блока концентрирования CO ₂ , л/ч	до 53
Концентрация CO ₂ в концентрате, % об.	не менее 99
Расход водорода, нл/ч	160
Расход CO ₂ на гидрирование, л/ч	40
Среднесуточная потребляемая мощность системы на концентрирование CO ₂ , Вт	не более 690
Удельный расход пара на десорбцию CO ₂ , г/л	11
Масса, кг	209



а

б

Рис. 3. Система концентрирования и переработки углекислого газа:

а – блок концентрирования; б – блок гидрирования

Полностью получить весь кислород из углекислого газа позволит пиролиз метана с возвращением водорода в реакцию гидрирования. Такая возможность прорабатывается. Метан используется также для получения пищевого белка, этот способ можно применять в дальнем космосе, но особенно целесообразно его применение на лунной базе (наличие воды) и на марсианской (наличие углекислого газа и воды) [18].

Следует считать необходимым создание и отработку фотокаталитического блока. Эксплуатация фотокаталитического блока на космических объектах позволит преодолеть недостатки существующих способов очистки и обеззараживания воздуха. Блок позволит производить очистку воздуха

от токсичных примесей, от пыли до наноразмерных частиц и стерилизовать воздух, что особенно важно, от вирусов и микроорганизмов. Это изменит атмосферу космической станции, значительно увеличив ее биологическую полноценность, и позволит изменить состав сорбционно-каталитической системы удаления вредных примесей, исключив из ее состава ряд фильтров [20].

Для удаления мелкой пыли, а также дополнительно удаление примесей, следует считать необходимым установку нескольких НЕРА-фильтров с угольными фильтрами в гермомодулях будущих российских обитаемых станций (класс фильтрации по ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010 рекомендуется НЕРА-13 для фильтра сверхтонкой очистки – 99,95 %) [21]. Это позволит улучшить атмосферу, удаляя пыль и токсичные примеси непосредственно в зонах их образования. Для регенерации таких угольных фильтров может быть разработана камера с выбросом в вакуум – подобная камере на станции «Мир».

Начато изготовление новых типов российских автоматических газоанализаторов для анализа основных газов и вредных примесей, включая примеси нештатных ситуаций. Это необходимая для полетов в дальнем космосе аппаратура.

Основными направлениями развития конструкции «Электрон-ВМ» является увеличение ресурса и надежности узлов и аппаратов системы, повышение устойчивости к нештатным ситуациям при эксплуатации, а также создание автономного блока управления. Главным направлением отработки «Электрон-ВМ» на РС МКС должно стать обеспечение гарантированного ресурса технологического блока жидкостного (БЖ) до семи лет.

В этом отношении достигнуты значительные успехи. Если наработка отдельных из шести первых систем достигала максимум приблизительно за 450 сут, то предпоследняя система с БЖ № 9 наработала 1265 сут, а последняя с БЖ № 11 на 31.12.2021 г. наработала более 2100 сут и продолжает работать (табл. 3). С июля 2011 г. работает одна российская система, а НАСА сменила три системы OGS (табл. 3).

Таблица 3

Наработка российской системы «Электрон-ВМ» и американской OGS до 31.12.2021 г.

Показатели	РС «Электрон-ВМ»	АС OGS	«Электрон-ВМ» Работа с БЖ № 11
Начало работы, дата	09.11.2000	11.07.2007	08.07.2011
Получено кислорода, кг	11 587	10 736	5102
Наработка, сут	4819	4019	2104
Производительность, л	80	270	9
Количество работавших последовательно систем на борту МКС, ед.	8	4	–

Систему «Воздух», модернизированную для транспортного корабля за счет изменения конструкции блока очистки атмосферы, введения четвертого фильтра очистки и снятия блока осушки, целесообразно доработать введением блока осушки и микронагнетателя с переменным расходом. В такой модификации будет увеличена производительность системы и добавится дополнительная возможность ее эффективного регулирования за счет подключения и отключения фильтров очистки. Далее система в результате модернизации за счет замены сорбента может приобрести функции концентратора CO₂ и стать дублирующим блоком системы концентрирования.

Из табл. 4 видна разница в количестве отказов при эксплуатации на МКС российской системы «Воздух» (14 отказов) и американской CDRA (65 отказов).

Таблица 4

Отказы систем удаления CO₂ на борту МКС

Отказавший агрегат	РС СОА «Воздух» 2000–2021 гг.		АС CDRA 2002–2018 гг.	
	Всего отказов	Причина	Всего отказов	Причина
Клапан	6	5 – сбой в работе датчиков положения привода БВК * 1 – периодическое заклинивание привода БВК	35	9 – сбой в работе 1 – неисправность из-за теплового расширения 25 – неизвестна
Нагреватель	0	–	4	3 – короткое замыкание или обрыв цепи 1 – неисправность блока управления
Микро-нагнетатель	3	1 – неисправность байпасного клапана 2 – неисправность электропривода	12	1 – неисправность из-за невесомости 1 – неисправность из-за ошибки оператора 1 – неисправность в блоке управления 9 – неизвестна
Вакуум-насос	4	3 – неисправность электропривода вакуум-насоса 1 – неисправность блока управления		
Датчики	0	–	8	неизвестна
Пневмо магистрали системы	1	высыпание гранул сорбента в одном из 3 поглотительных фильтров	6	1 – сорбентная пыль 2 – забивка канала 3 – неизвестна

* БВК – блок вакуумных клапанов

Модернизацию СБМП для дальнего космоса целесообразно провести с учетом необходимости удаления термокатализатором не только углеводородов, но и других неадсорбируемых примесей, расход воздуха через него должен быть увеличен в несколько раз, температура увеличена приблизительно

до 300 °С, а также должен быть введен фильтр для удаления образующихся токсичных окислов. Кроме того, целесообразно перейти на автоматическое управление клапанами. Введение микроагнетателя с переменным расходом позволит быстро удалять вредные примеси при токсичных выбросах. Целесообразно ее дополнение фотокаталитическим блоком.

Основной задачей усовершенствования российской системы регенерации воды из конденсата (СРВ-К) является увеличение ресурса ее основного заменяемого агрегата – блока колонок очистки. Для этого в состав СРВ-К2 еще при эксплуатации на станции «Мир» был введен катализатор. Поскольку ресурс по очистке конденсата от недиссоциирующих органических примесей является лимитирующим фактором, прорабатывается переход на электрохимический процесс очистки с подачей в качестве окислителя кислорода воздуха.

Для дальнейшего усовершенствования СРВ-У необходима на РС МКС отработка режимов работы и аппаратуры. При последующей модернизации СРВ-У предлагается дополнительное выпаривание воды из концентрата урины, собранного в замкнутом контуре, с конденсацией пара в водяной контур СРВ-У. Таким образом, регенерация воды из концентрата урины обеспечивается модернизацией СРВ-У без выпаривания в атмосферу.

Поломки туалетов связаны с эксплуатационными и конструктивными факторами. Необходима дальнейшая отработка режимов, препятствующих заливу и засорению туалета на РС МКС и доработка конструкции при необходимости. Одновременно целесообразна отработка других консервантов вместо H_2SO_4 . Требуется также отработка использования консерванта без смывной воды.

В настоящее время санитарно-гигиенические процедуры экипажей РС МКС по мытью рук, лица и тела проводятся при помощи увлажненных салфеток и полотенец. При ограниченном количестве или невозможности доставок грузов при полетах в дальнем космосе запасы салфеток, полотенец и одежды будут занимать значительный объем и массу. Целесообразно организовать отдельный замкнутый контур санитарно-гигиенического водообеспечения с проведением водных процедур экипажа, стирки одежды и регенерацией санитарно-гигиенической воды. Для этого целесообразно введение на станции умывальника, душевой кабины, стиральной машины. Регенерацию воды предполагается проводить в СРВ-СГ. Так как в составе модуля «Наука» находится дублирующая система, АСУ-СПК-УМ служебного модуля может быть преобразована для проведения испытаний санитарно-гигиенического водообеспечения экипажа [22].

Для российских средств водообеспечения на запасах воды необходима разработка бортового агрегата для консервации воды ионным серебром – установки электролиза серебра для регулируемой генерации ионов серебра.

Необходима также разработка и отработка газоанализаторов по качеству воды, без которых невозможны полеты в дальний космос.

Далее необходимо отработать совместно системы и оборудование средств обеспечения газового состава и отработать совместно системы и оборудование средств водообеспечения, затем объединить их по материальным и информационным потокам и управлению, отработать их как единый КСЖО дальнего космоса.

При этом, как показала эксплуатация систем на МКС (особенно эксплуатация системы «Электрон-ВМ» и его многочисленные отключения из-за ситуаций с централизованной системой управления), каждая сложная система должна иметь свой блок управления и информации, необходимая информация с которого поступает на аналогичный блок КСЖО для регулирования работы связанных между собой СЖО.

Выводы

1. На МКС эксплуатируются частично замкнутые комплексы СЖО. Для межпланетных и лунных экспедиций (дальнего космоса) необходимо модернизировать комплекс СЖО прежде всего за счет полной регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности экипажа с целью обеспечения минимальных затрат переменной массы продуктов и оборудования и максимальной автономности экспедиций.

2. Американские системы СЖО впервые прошли отработку на МКС, и часть из них требует коренной переработки (система генерации кислорода путем электролиза воды, система удаления вредных примесей, система очистки от углекислого газа, система гидрирования углекислого газа и другие).

НАСА считает, что интеграция новых и модернизированных регенерационных систем жизнеобеспечения на АС МКС является высокоприоритетной для развития технологий жизнеобеспечения для экспедиций дальнего космоса.

При этом большинство модернизируемых систем на борту АС МКС рассматриваются как экспериментальные и не будут сертифицированы пока не будет доказана их работоспособность при продолжительной (более одного года) летной эксплуатации.

Далее программа НАСА предусматривает отработку модернизированных и новых СОГС с объединением их в единый комплекс, а затем образование с отрабатываемыми СВО единого регенерационного комплекса СЖО дальнего космоса.

3. Российские СЖО прошли отработку на станции «Мир» и модернизированы для МКС, но для дальнего космоса необходима как дальнейшая модернизация существующих СЖО, в первую очередь системы регенерации воды из урины и связанных с ней систем, так и отработка целого ряда перспективных систем, таких как система концентрирования и переработки углекислого газа, фотокаталитический блок удаления вредных примесей, оранжерея, средства приема водных процедур и стирки, система регенера-

ции санитарно-гигиенической воды, а также газоаналитическая аппаратура качества воздуха и воды (токсических примесей) и др.

Однако в настоящее время на РС МКС ведется только отработка системы регенерации воды из урины, отработка СЖО и КСЖО дальнего космоса в качестве приоритетной задачи не ставится.

4. Для обеспечения готовности комплекса российских регенерационных систем жизнеобеспечения для дальних космических полетов (лунных с обитаемыми базами и марсианских) в предполагаемые сроки (2030-е годы) следует провести на МКС и РОСС отработку отдельных перспективных СЖО, затем объединить их по материальным и информационным потокам и управлению, обрабатывать их как единый КСЖО дальнего космоса.

Для этого в программы эксплуатации МКС (также станции РОСС) необходимо ввести специальный раздел по отработке регенерационных систем жизнеобеспечения дальнего космоса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романов, С.Ю. Космические системы жизнеобеспечения: основные требования к разработке средств жизнеобеспечения экипажей длительных космических экспедиций / С.Ю. Романов, А.С. Гузенберг // Инженерная экология. – 2013. – № 2 (110). – С. 2–15.
- [2] “Long – Term Experiment in Partially Closed Ecological System” / A.I. Burnasian, B.A. Adamovich, N.M. Samsonov, I.V. Lavrov [et al.] // Aerospace medicine. – 1969. – 40 (No 10). – P. 1087–1093.
- [3] Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций / Н.М. Самсонов, Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, А.А. Кочетков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 1. – С. 61–68.
- [4] Системы жизнеобеспечения орбитальной станции «Мир» и МКС / И.П. Абрамов, Н.А. Брюханов, Ю.И. Григорьев [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 3. – С. 33–52.
- [5] Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей долговременных космических станций / А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов, А.А. Телегин [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2015. – № 1. – С. 67–80.
- [6] Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций / С.Ю. Романов, А.Г. Железняков, А.А. Телегин, А.С. Гузенберг [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2007. – № 3. – С. 57–74.
- [7] Эксплуатация системы удаления диоксида углерода из атмосферы Международной космической станции / А.В. Юргин, С.Ю. Романов, А.С. Гузенберг [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2008. – Т. 42. – № 6. – С. 92–93.
- [8] Перспективы развития регенерационного водообеспечения пилотируемых космических станций / Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, С.Ю. Романов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2014. – № 2(11). – С. 51–60.
- [9] Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций / Л.С. Бобе, Н.М. Самсонов, В.М. Новиков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 1. – С. 69–77.

- [10] Бобе, Л.С. Регенерация воды на космических станциях / Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Н.М. Самсонов // Инженерная экология. – 2013. – № 2. – С. 34–49.
- [11] Bobe L., Gavrilov L., Kochetkov A. [et al.]. The prospects for development of regenerative life support systems of space and planetary Stations // 38th International Conference of Environmental Systems / June 29 – July 2, 2008. San Francisco, CA USA. SAE Technical papers 2008-01-2188.
- [12] Романов, С.Ю. Построение и энергомассовые характеристики группы регенерационных систем водообеспечения космической станции / С.Ю. Романов, Л.С. Бобе // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 25–34.
- [13] Средства обеспечения газового состава и водообеспечения комплексов систем жизнеобеспечения российского и американского сегментов международной космической станции / А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов, В.А. Бутрин [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 3(44). – С. 43–68.
- [14] Stephen F. Yates, Rebecca J. Kamire, Phoebe Henson, Ted Bonk. Carbon Dioxide Removal by Ionic Liquid Sorbent (CDRILS) System Development. 48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-17, 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico.
- [15] David T. Wickham, James A. Nabity, Jordann McCarty, Robert Aaron. A “Supported Liquid Membrane System for Steady State CO₂ Control in a Spacecraft Cabin”, 49th International Conference on Environmental Systems ICES-2019-187, 7–11 July 2019, Boston, Massachusetts.
- [16] Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview / James Lee Broyan, Jr. Laura Shaw, Melissa McKinley, Catlin Meyer, Michael K. Ewert, Walter F Schneider, Marit Meyer, Gary A. Ruff, Andrew C. Owens, Robyn L. Gatens // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-384, 12–15 July 2021.
- [17] Перспективы применения космических оранжерей в комплексе систем жизнеобеспечения космонавтов в условиях лунной орбитальной станции, лунной базы и межпланетных транспортных кораблей / Ю.А. Беркович, С.О. Смолянина, А.Г. Железняков, А.С. Гузенберг // Космическая техника и технологии. – 2019. – № 2(25). – С. 37–54.
- [18] Использование метана в замкнутых комплексах жизнеобеспечения космических экспедиций / А.Г. Железняков, С.А. Глухих, А.С. Гузенберг [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 4(35) – С. 63–77.
- [19] Очистка атмосферы космических кораблей и станций от диоксида углерода и его концентрирование с целью гидрирования по реакции Сабатье / Ю.П. Бутылкин, Д.С. Ерофеев, А.Е. Коробков, А.А. Кочетков [и др.] // XVII Конференция по космической биологии и авиакосмической медицине, 10–12 декабря 2018 г.
- [20] Першин, А.Н. Возвращение фотокатализа; статьи. – URL: <https://airlife.ru> (дата обращения 24.01.2018).
- [21] Воздушные HEPA-фильтры для вентиляции. – URL: <https://masvent.ru>.
- [22] Применение центробежной вакуумной дистилляции для регенерации воды из урины и санитарно-гигиенической воды на космической станции / Д.В. Аракчеев, Л.С. Бобе, А.Г. Железняков, А.А. Кочетков [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 4(31). – С. 21–31.

REFERENCES

- [1] Romanov, S.Yu. Life support systems in space: Main requirements for the development of life support systems for the crew members, designed for long-term space missions / S. Romanov, A. Guzenberg // Scientific Journal "Engineering Ecology". 2013. – No 2 (110). – P. 2–15.
- [2] "Long – Term Experiment in Partially Closed Ecological System" / A.I. Burnasian, B.A. Adamovich, N.M. Samsonov, I.V. Lavrov [et al.] // Aerospace medicine. – 1969. – 40 (No 10). – P. 1087–1093.
- [3] Regenerating life-support systems of space stations / N.M. Samsonov, L.S. Bobe, L.I. Gavrilo [et al.] // Proceedings of the RAS. Energetics. – 2009. – No 1. – P. 61–68.
- [4] Life support of the "Mir" orbital station and international space station / I.P. Abramov, N.A. Bryukhanov, Yu.I. Grigoriev [et al.] // Proceedings of the RAS. Energetics. – 2003. – No 3. – P. 33–52.
- [5] Selecting life support system for the crews of long duration space stations / A.S. Guzenberg, A.G. Zheleznyakov, S.Yu. Romanov [et al.] // Space Engineering and Technology magazine. 2015. – No 1. – P. 67–80.
- [6] Life support systems for crews on long-duration interplanetary missions / S.Yu. Romanov, A.G. Zheleznyakov, A.A. Telegin [et al.] // Proceedings of the RAS. Energetics. – 2007. – No 3. – P. 57–74.
- [7] Operation of the airborne carbon dioxide removal system on the ISS / A.V. Yurgin, S.Yu. Romanov, A.S. Guzenberg [et al.] // Journal of Aerospace and Environmental Medicine. – 2008. – Vol. 42. – No 6–1. – P. 92–93.
- [8] Prospects of the development of water regeneration system for piloted space stations / L.S. Bobe, A.A. Kochetkov, S.Yu. Romanov [et al.] // Scientific Journal "Manned Spaceflight". – 2014. – No 2(11). – P. 51–60.
- [9] Prospects of development of manned space water regeneration systems / L.S. Bobe, N.M. Samsonov, V.M. Novikov [et al.] // Proceedings of the RAS. Energetics. – 2009. – No 1. – P. 69–77.
- [10] Space station water reclamation / L.S. Bobe, A.A. Kochetkov, N.M. Samsonov // Scientific Journal "Engineering Ecology", 2013. – No 2. – P. 34–49.
- [11] Bobe L., Gavrilo L., Kochetkov A., Samsonov N. [et al.]. The prospects for development of regenerative life support systems of space and planetary Stations // 38th International Conference of Environmental Systems / June 29 – July 2, 2008. San Francisco, CA USA. SAE Technical papers 2008-01-2188.
- [12] Romanov S.Yu., Bobe L.S. Construction and energy-mass characteristics of the group of regeneration water supply systems of the space station // Scientific Journal "Manned Spaceflight". – 2016. – No 2(19). – P. 25–34.
- [13] Development of gas composition support system and water supply equipment within a suite of life support systems for interplanetary missions based on the ISS life support systems / A.S. Guzenberg, A.G. Zheleznyakov, S.Yu. Romanov [et al.] // Scientific Journal "Manned Spaceflight". – 2022. – No 3(44). – P. 43–68.
- [14] Stephen F. Yates, Rebecca J. Kamire, Phoebe Henson, Ted Bonk. Carbon Dioxide Removal by Ionic Liquid Sorbent (CDRILS) System Development. 48th International Conference on Environmental Systems» ICES-2018-17 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico.
- [15] David T. Wickham, James A. Nabity, Jordann McCarty, Robert Aaron. A "Supported Liquid Membrane System for Steady State CO₂ Control in a Spacecraft Cabin",

- 49th International Conference on Environmental Systems ICES-2019-187, 7–11 July 2019, Boston, Massachusetts.
- [16] Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview / James Lee Broyan, Jr. Laura Shaw, Melissa McKinley, Catlin Meyer, Michael K. Ewert, Walter F Schneider, Marit Meyer, Gary A. Ruff, Andrew C. Owens, Robyn L. Gatens // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-384, 12–15 July 2021.
- [17] Prospects for using space greenhouses as a part of a suite of crew life support systems of a lunar orbital station, a lunar base and interplanetary transfer vehicles / Yu.A. Berkovich, S.O. Smolyanina, A.G. Zheleznyakov [et al.] // Space Engineering and Technology magazine. – 2019 – No 2(25). – P. 37–54.
- [18] Use of methane in closed-loop life support systems for space missions / Zheleznyakov A.G., Glukhikh S.A., Guzenberg A.S. [et al.] // Space Engineering and Technology magazine. – 2021. – No 4(35). – P. 78–92.
- [19] Carbon dioxide removal from the atmosphere of spacecraft and stations and its concentration for hydrogenation by the Sabatier reaction / Yu.P. Butylkin, D.S. Erofeev, A.E. Korobkov [et al.] // XVII Conference on Space Biology and Aerospace Medicine. December 10–12, 2018.
- [20] Pershin A.N. Return of photocatalysis. – URL: <https://airlife.ru> (articles, 24.01.2018).
- [21] HEPA air filters for ventilation. – URL: <https://masvent.ru>.
- [22] Use of rotary vacuum distillation for water recovery from urine and hygiene water aboard the space station / D.V. Arakcheev, L.S. Bobe, A.G. Zheleznyakov [et al.] // Space Engineering and Technology magazine. – 2020. – No 4(31). – P. 21–31.