

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.048

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,
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 (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)

В статье рассмотрены современное состояние основных систем комплекса систем жизнеобеспечения (КСЖО) космических станций. Анализируется состояние входящих в КСЖО средств обеспечения газового состава (СОГС) и средств водообеспечения (СВО) и связанных с ними систем из средств санитарно-гигиенического оборудования (ССГО), эксплуатирующихся на российском и американском сегментах Международной космической станции (МКС), и проводится их сравнение. На МКС российские системы обеспечения газового состава и водообеспечения, отработанные на станции «Мир», имеют, в основном, меньшие массу и энергопотребление и больший ресурс и надежность, чем системы американские.

Ключевые слова: комплекс систем жизнеобеспечения (КСЖО), средства обеспечения газового состава (СОГС), средства водообеспечения (СВО), средства санитарно-гигиенического оборудования (ССГО), сравнение СОГС и СВО на российском и американском сегментах МКС

Atmospheric Revitalization and Water Supply Equipment of the Life Support Complexes on the International Space Station RS and USOS

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

The paper reviews the current condition of key systems of Life Support Complex for space stations; it analyzes the condition of atmospheric revitalization

equipment and water supply equipment and related sanitary and hygiene facilities used aboard the ISS RS and USOS and compares them. The onboard Russian atmospheric revitalization and water supply equipment tested aboard the MIR Station characterized primarily by lower mass and power consumption, longer operating life and higher reliability, as compared to the US systems.

Keywords: complex of life support systems, atmospheric revitalization equipment, water supply equipment, sanitary and hygiene facilities, comparison of atmospheric revitalization and water supply equipment on the ISS RS and USOS

Одними из основных составляющих для космических экспедиций являются системы жизнеобеспечения (СЖО), задача которых – поддержание искусственной среды обитания для сохранения здоровья и обеспечения безопасности жизни экипажа в многомодульных герметичных космических объектах с минимальными затратами переменной массы продуктов и оборудования для обеспечения ресурса систем. Это одни из немногих систем, работающих на космических станциях непрерывно [1–3].

Основными в этом комплексе являются тесно связанные СОГС, СВО, а также ряд систем из ССГО.

Созданные для орбитальных станций «Мир» и МКС комплексы СЖО с частичной регенерацией воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности экипажа позволяют осуществлять полет человека в околоземном космическом пространстве при регулярной доставке с Земли воды и запасов газов. Опыт эксплуатации КСЖО орбитальных космических станций «Мир» и МКС целесообразно рассмотреть при создании замкнутых КСЖО с регенерационными системами для осуществления лунной и марсианской экспедиций [1, 3, 4]. На данном этапе развития технологии систем КСЖО следует принять концепцию построения КСЖО из отдельных взаимосвязанных систем с заменяемыми агрегатами (системами) с возможностью перестроения КСЖО в полете по мере отработки систем (рис. 1) [5–12].

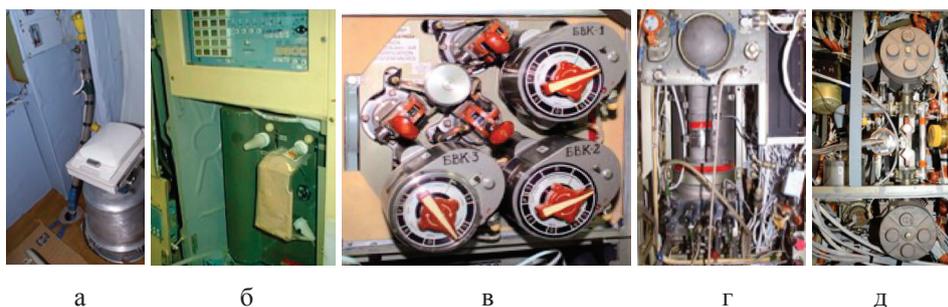


Рис. 1. Основные регенерационные системы жизнеобеспечения РС МКС:

а – ассенизационно-санитарное устройство (АСУ) – туалет; *б* – система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К2М); *в* – система очистки от углекислого газа «Воздух»; *г* – система генерации кислорода «Электрон-ВМ»; *д* – система удаления вредных примесей СБМП.

В статье рассмотрено современное состояние основных средств и систем КСЖО. Анализируется состояние входящих в КСЖО СОГС, СВО и связанных с ними систем из ССГО и из ряда других средств, эксплуатирующихся на российском сегменте (РС) и американском сегменте (АС) МКС, и проводится их сравнение.

Средства обеспечения газового состава

Системы очистки от углекислого газа

Российская система очистки от углекислого газа «Воздух» снабжена:

- микронагнетателем;
- двумя фильтрами осушки, регенерируемыми с подогревом в атмосферу кабины при температуре 90 °С, содержащими силикагель (6 кг в каждом);
- тремя поглотительными фильтрами, содержащими специальный сорбент (7 кг, после модификации 2019 г. – 8 кг в каждом), регенерируемый в вакуум без подогрева;
- газожидкостным теплообменником для снижения и стабилизации температуры газовой среды перед поглотительными фильтрами CO₂ и газо-газовым рекуперативным теплообменником;
- вакуум-насосом предварительной откачки воздуха, блоками клапанов, аварийными клапанами на вакуумных магистралях.

Система рассчитана на поддержание в атмосфере 6 мм рт. ст. для шести членов экипажа (для среднесуточного выделения CO₂ – 20 л/ч). Фильтры поочередно сорбируют и регенерируются с циклами сорбции-регенерации 10, 20, 30 мин в зависимости от количества членов экипажа с подключением для регулирования третьего поглотительного фильтра. Возможна автоматическая работа с плавающими циклами и расходом газовой среды.

Отличительные преимущества системы – вакуумная регенерация поглотителей CO₂ без подогрева, специальные вибропрочные осушители и поглотители CO₂, легкосменные блоки клапанов, микронагнетатель и вакуумный насос, регулирование циклов сорбции-регенерации, регулирование расхода воздуха. Однако система не предусматривает получение концентрированного CO₂, пригодного для дальнейшей переработки.

Система эксплуатировалась на станции «Мир» 11,5 лет (для трех чел.), на МКС – 21 год, модернизированная для 3–6 человек. Проводились замены блоков вакуумных клапанов, микронагнетателя и вакуум-насоса по отказам при работе за назначенным ресурсом. Замена сорбционных поглотительных фильтров проводилась на МКС два раза: через 11 лет (анализ показал ресурс без практического снижения емкости сорбентов ≈ 7–8 лет при назначенном ресурсе 5 лет) и затем через 8 лет. При этом сопротивление фильтров практически не изменилось. За время эксплуатации на МКС отмечается зависимость периодичности отказов электроагрегатов, работающих циклично, от времени цикла системы. Периодичность отказов вакуумных клапанов

и вакуумных насосов пропорционально уменьшается с увеличением времени цикла системы [4–7].

Система «Воздух» является высокоэффективной, наиболее отработанной и надежной системой, перспективной для дальнейшего применения на обитаемых космических станциях и планетных базах, а также при полетах в дальний космос. Ее целесообразно применять как систему, отвечающую за поддержание парциального давления CO_2 при работе систем концентрирования и переработки CO_2 , а при замене сорбента и необходимых доработках она будет дублирующей системой концентрирования.

Американская система очистки атмосферы от углекислого газа CDRA также содержит все указанные агрегаты, за исключением блоков вакуумных клапанов и третьего поглотительного фильтра. Однако осушительные фильтры, (кроме силикагеля – 5,7 кг в каждом), содержат цеолит 13X (4,5 кг в каждом), поглотительные фильтры содержат цеолит 5A (12,2 кг в каждом). Регенерация всех фильтров термическая при температуре $\approx 205^\circ\text{C}$, циклы сорбции-регенерации $\approx 2,5$ ч. Регулирование производительности системы – за счет изменения расхода воздуха путем изменения оборотов вентилятора. Система рассчитана на поддержание в атмосфере 5,3 мм рт. ст. при шести членах экипажа (для среднесуточного выделения одним человеком ≈ 20 л/ч CO_2).

Основное преимущество CDRA – возможность концентрирования CO_2 (использовалась при испытаниях реактора Сабатье), постоянная эксплуатация на АС с 2009 г. Недостатки системы:

- неудовлетворительная виброустойчивость сорбентов;
- проскок влаги и CO_2 из-за прямоугольного сечения фильтров (стандартное сечение сорбционных фильтров – круг);
- термическая регенерация поглотителя при высокой температуре.

Используемая температура не обеспечивает полной регенерации цеолита-поглотителя от CO_2 и остаточной воды, в результате потребовалось введение цеолита в осушитель. Вероятно, для обеспечения заданных характеристик в этих условиях, было проведено подключение на вход в систему охлажденного воздуха из системы терморегулирования ($4,5\text{--}10^\circ\text{C}$) для повышения емкости поглотителей. Наличие проскока капельной влаги из теплообменника конденсатора на вход системы CDRA привело к деградации гранул силикагеля в осушительном патроне, снижению степени осушки и увеличению проскока влаги в поглотительный патрон [13]. Данное обстоятельство потребовало разработки дополнительного устройства, исключаящего капельную влагу на входе в CDRA [14].

По-видимому, все это привело к переразмериванию фильтров по массе поглотителя (учитывая, что емкость цеолита в 2,5–3,0 раза больше емкости поглотителя системы «Воздух»). В этих условиях недостаточная виброустойчивость сорбентов привела к образованию большого количества пыли, увеличению сопротивления слоев сорбентов и падению расхода воздуха.

Система была переведена на максимальный расход, дальнейшее увеличение сопротивления привело к замене фильтров до истечения ресурса. Из-за пыли имелись отказы клапанов, что потребовало введения в систему нескольких дополнительных пылефильтров, что несколько улучшило эксплуатацию, но не решило проблемы с источником цеолитной пыли в системе, а насыщение этих пылефильтров требует их периодической замены. В результате была изменена конструкция фильтров CO_2 таким образом, чтобы можно было удалять пыль пылесосом из каждой половины поглотительного фильтра [14].

По совокупности отказов и анализа надежности НАСА сделало вывод, что система CDRA непригодна для обеспечения длительных экспедиций дальнего космоса и требуется разработка новой системы [14].

Нерегенерируемые средства очистки от CO_2

В качестве резервных систем по очистке атмосферы от CO_2 на РС и АС используются запасы нерегенерируемых средств.

Нерегенерируемые поглотительные фильтр-патроны в РС и АС МКС содержат гидроксид лития для поглощения CO_2 за счет прокачки через них очищаемой газовой среды с использованием вентиляторов. Имеются адаптеры-переходники для переподключения патронов к вентиляторам другого сегмента при необходимости.

Российский фильтр-патрон П-16 имеет массу 7,5 кг, способен поглотить не менее 1600 л CO_2 и обеспечивает ресурс 3,3 чел./сут при сроке хранения не менее 6 лет.

Американский фильтр-патрон LiOH canister имеет массу 3,1 кг, способен поглотить 815 л CO_2 и обеспечивает ресурс 1,63 чел./сут при сроке хранения 29 мес. За счет использования чехла из герметичной упаковочной алюминиевой фольги, ресурс хранения в последнее время увеличен до нескольких лет [1, 4].

Системы удаления вредных примесей

Российская сорбционно-каталитическая система удаления вредных примесей СБМП снабжена вентилятором, нерегенерируемым фильтром предварительной очистки, содержащим $\approx 2,5$ кг активированного угля для удаления тяжелых примесей и двумя регенерируемыми фильтрами (регенерация в заборный вакуум с нагревом до 200°C каждые 20 сут), содержащими в сумме 5,6 кг активированного угля. Система снабжена блоками клапанов, аварийными клапанами на вакуумных магистралях. Кроме того, система снабжена двумя фильтрами с катализаторами: фильтром с катализатором для удаления окиси углерода и водорода и фильтром с термочувствительным катализатором ($\approx 250^\circ\text{C}$) для окисления углеводородов. Расчетный срок эксплуатации системы составляет 5 лет, фактический – более 10 лет.

Система эксплуатировалась на станции «Мир» 11,5 лет (для троих человек), а на МКС – 21 год по настоящее время. За это время происходили отказы микровыключателей (не приведшие к замене клапанов) и отказы

управляющих регенерацией поверхностных датчиков температуры – термомпар (принято решение о замене их глубинными датчиками в слое). Произведена одна замена фильтров системы через 11 лет эксплуатации [4, 5, 7].

Однако в составе российской системы отсутствует щелочной фильтр для удаления окислов после термокатализатора, что связано с малым расходом воздуха, проходящего через него и, следовательно, с небольшим количеством образующихся окислов. При этом с учетом необходимости удаления термокатализатором не только углеводородов, но и других неадсорбируемых примесей, расход воздуха через него должен быть увеличен в несколько раз.

Для длительных экспедиций в дальнем космосе российская система удаления токсических примесей должна быть снабжена фотокаталитическим блоком, обеспечивающим не только удаление вредных примесей, но и дополнительно удаление микроорганизмов и аэрозолей (пыли) размером до десятых долей микрона [15].

Американская сорбционно-каталитическая система удаления вредных примесей TCCS снабжена нерегенерируемым фильтром, содержащим $\approx 22,5$ кг активированного угля для удаления примесей, фильтром, содержащим $\approx 1,5$ кг гидроокиси лития для удаления окислов, и фильтром с термокатализатором (≈ 450 °С) для окисления несорбируемых примесей. Расчетный срок эксплуатации системы составляет для удаления окислов ≈ 5 лет. Система эксплуатируется на АС с 2009 г.

Основной недостаток – система TCCS не рассчитана на удаление примесей в нештатных ситуациях при разгерметизации штатного или научного оборудования с выбросом токсических примесей. Кроме того, недостаточная виброустойчивость примененного активированного угля привела к образованию пыли, увеличению сопротивления, падению расхода воздуха через систему и замены поглотительного фильтра до истечения ресурса.

Сравнение российской и американской систем показывает основное преимущество российской системы – она является регенерационной. При эксплуатации МКС в нештатных ситуациях, связанных с выбросом токсических примесей, американская система отключалась для сохранения ее ресурса при штатной работе. Тогда как российская система позволила сократить цикл поглощения до регенерации с двадцати до нескольких суток для быстрого удаления токсического выброса с восстановлением поглотительной способности фильтра после каждой регенерации. Масса нерегенерируемого угольного фильтра американской системы почти в 10 раз больше массы российских регенерационных угольных фильтров. В настоящее время НАСА разрабатывает систему удаления токсических примесей с регенерируемыми поглотителями [16].

Резервные средства удаления вредных примесей

Российский фильтр вредных примесей (ФВП) до присоединения к станции «Мир» модуля «Квант» являлся основной системой, после присоединения –

резервной (также, как и ФВП на МКС (установленный в ФГБ) до присоединения служебного модуля). В состав ФВП входили каталитический фильтр с палладиевым катализатором для удаления окиси углерода, сменная кассета с активированным углем и поглотителем аммиака. Расход воздуха через фильтр обеспечивается вентилятором, соединенным с фильтром трубопроводом. Ресурс ФВП составлял 2000 чел./сут. После выработки ресурса ФВП на СМ МКС не используется [4].

Американские угольные фильтры используются совместно с частью гепофильтров (см. Средства удаления аэрозолей).

Средства удаления аэрозолей (пыли) и микроорганизмов

Атмосферная пыль представляет смесь органических и неорганических соединений, размер ее частиц колеблется от 100 до 0,01 мкм. Пыль, покрытая пленкой воды, способна поглощать и переносить как химические вещества, так и микроорганизмы, в том числе и патогенные. В земных условиях аэрозоли величиной менее 0,1 мкм ведут себя подобно газам. В условиях невесомости в космическом полете недостаточно ионизированная даже крупная пыль (более 10 мкм) не оседает. При этом пыль с частицами менее 5 мкм в альвеолах легких человека нарушает процесс насыщения крови кислородом. Количество микрочастиц в единице объема не регламентируется (в ГОСТ Р 50804 регламентируется только масса пыли в ед. объема) [17].

Российские средства удаления пыли из атмосферы РС МКС – сменные фильтры в двух вентиляторах системы терморегулирования, общий расход воздуха через которые составляет 960 м³/ч. При таком расходе воздуха, учитывая объем станции ≈ 1000 м³, понадобилось бы ≈ 3 ч, чтобы удалить (без проскока) 93 % аэрозолей. Однако эти фильтры удаляют аэрозоль размером не менее 20 мкм. Средства удаления пыли из атмосферы РС МКС эксплуатируются на МКС с ноября 2000 г. по настоящее время, при этом каждый месяц производится замена фильтров. Более мелкая пыль частично удаляется сорбентами систем СБМП и очистки атмосферы от углекислого газа «Воздух», расходы воздуха этих систем для удаления пыли недостаточны.

В определенной степени вопрос удаления мелкой аэрозоли решает система «Поток», предназначенная для стерилизации воздуха РС МКС. Она позволяет добиться повышенной степени разрушения структур микроорганизмов и вирусов. Поток воздуха в системе проходит через электроды с чередующейся полярностью, многократная перезарядка поверхности структур приводит к нарушению жизнеспособности микроорганизмов и вирусов. Расход воздуха через систему составляет 150 м³/ч. Такой расход позволяет проводить частичное удаление мелкой аэрозоли (0,1–0,3 мкм) за счет электростатического осаждения. Энергопотребление системы составляет 40 Вт. Система, установленная на СМ МКС, показала высокую эффективность и была заказана НАСА и установлена в ФГБ. Кроме этого, система «Поток» установлена в последнем доставленном модуле МЛМ [18].

Значительную помощь в удалении мелкой пыли окажет внедрение фотокатализаторного блока [15].

Американские средства удаления пыли из атмосферы снабжены сменными фильтрами сверхтонкой очистки HEPA для различной размерности частиц до 0,01 мкм. В АС МКС установлено значительное количество фильтров HEPA (~ 20), общий расход воздуха через которых достигает ~ 1000 м³. Именно они обеспечивают очистку атмосферы МКС от мелкой пыли и микроорганизмов благодаря общей вентиляции АС и РС. Отдельной системы удаления микроорганизмов в АС МКС нет.

По данным измерений НАСА количество пыли размерности 0,01–3,00 мкм днем в модуле NODE3 достигало 500–3000 частиц/см³, значительно уменьшаясь ночью. Полученные данные послужили исходными для разработки технологии мониторинга твердых частиц, заключающегося в оценке общего количества аэрозолей в атмосфере космической станции в виде размера и концентрации частиц. На МКС с ноября 2020 г. был развернут непрерывный мониторинг в семи различных местах, показывающий суточные колебания концентрации частиц от 5 нм до 3 мкм, а также размер частиц при распределении от 3 до 20 мкм. Это первая информация об аэрозольной среде в реальном времени в космосе [19].

Для удаления ~ 93 % пыли HEPA-фильтрами объем воздуха, прокачанный через них в течение ~ 3 ч, должен быть равен объему гермомодуля. Это же положение относится к удалению колоний микроорганизмов (при их постоянном возрастании).

НАСА также использует ряд HEPA-фильтров в сочетании с угольными фильтрами. Поскольку 80 % токсических примесей выделяется неметаллическим оборудованием, такая установка фильтров способствует удалению примесей в местах их выделения, препятствуя их распространению в атмосфере модулей МКС. Однако имеются и недостатки такого комбинированного сочетания удаления пыли в HEPA-фильтре и микропримесей в его угольном фильтре. Уголь насыщается влагой в контакте с пылью, и влага является источником роста грибков и бактерий. Это требует замены таких комбинированных фильтров по строгому регламенту (~ 1 раз в два года) и увеличивает грузопоток [19].

Что касается мониторинга твердых частиц, наиболее значительный пробел заключается в том, что ни на станции «Мир», ни на РС МКС не проводились измерения дисперсного состава аэрозолей. Однако полеты за пределами околоземной орбиты требуют мониторинга твердых частиц, особенно для полетов на Луну и планеты, где возникает проблема планетарной пыли.

Следует рекомендовать в гермомодулях будущих российских обитаемых станций для удаления мелкой пыли и дополнительного удаления примесей установку HEPA-фильтров класса фильтрации HEPA-13 сверхтонкой очистки (99,95 %) с угольными фильтрами [20]. Для дальнего космоса угольная часть должна быть съёмной и регенерируемой для снижения грузопотока.

Газоаналитическая аппаратура

Российские средства газового анализа снабжены газоанализатором основных газов (кислород, углекислый газ, водяной пар), газоанализатором окиси углерода CO (однако эти приборы устарели и снимаются с производства), пробозаборниками бортового анализа вредных примесей на основе индикаторных трубок на ограниченное число примесей и сорбентными пробозаборниками для наземного анализа на все вредные примеси [21]. Ранее использовавшийся автоматический прибор анализа выделяющихся при пожаре газов вышел из строя после окончания ресурса и не возобновлен (снят с производства из-за устаревшей технологии) [22]. Все приведенное выше свидетельствует о недостаточности газового анализа, к этому можно также отнести отсутствие измерений азота. По контролю азота, как газа не участвующего в метаболизме человека, возможно более точное отслеживание изменений трендов общей утечки из гермообъемов станции. Начата разработка и изготовление новых типов российских автоматических газоанализаторов для анализа основных газов и вредных примесей.

Американские средства газового анализа снабжены масс-спектрометром МСА на основные газы (включая азот, но водяной пар не измеряется, а вычисляется по остальным измеренным компонентам), переносным автоматическим прибором CSA-CP для анализа трех аварийных вредных примесей и объемными пробозаборниками для анализа вредных примесей на земле – Grab-канистрами (mini GSC 350 мл, ранее GSC 500 мл). Все приборы используются с начала пилотируемой эксплуатации МКС (2000 г.). Масс-спектрометр превосходит по точности российские газоанализаторы и имеет прямое измерение азота, но не имеет прямого измерения содержания водяного пара [21, 22].

Полеты в дальнем космосе невозможны без автоматического анализа вредных примесей на борту. НАСА отработывает на АС МКС несколько типов экспериментальных автоматических газоанализаторов: масс-спектрометр AQM на ~ 20 примесей, хромато-масс-спектрометр SAM на основные газы и большое количество микропримесей, Фурье-спектрометр ЕКА-ANITA (с 2021 г. ANITA-2) на большое количество микропримесей и другие.

Средства пожаробезопасности

Российские средства для тушения пожара снабжены водяным огнетушителем с пенообразующей добавкой (ОСП-4 и ОКР-1) и изолирующим противогазом ИПК. Огнетушители были использованы при успешном тушении пожара на станции «Мир» и показали свою эффективность, особенно ОКР-1, которым можно управлять одной рукой. ИПК снабжает человека кислородом из собственного источника и изолирует человека от окружающей атмосферы, являясь универсальным аппаратом, предохраняющим человека при любой загрязненности атмосферы при средней физической нагрузке ≈ 40 мин. (в зависимости от интенсивности работы от 20 до 140 мин.) [1, 5, 6]. ИПК использовался на РС МКС несколько раз, показав свою эффективность.

Американские средства для тушения пожара снабжены огнетушителем с углекислым газом, кислородной маской РВА и маской с сорбционным фильтром для тушения пожара. Все приборы используются с начала пилотируемой эксплуатации МКС [5, 6].

Огнетушитель с CO_2 эффективен на АС МКС только при тушении пожаров систем и агрегатов в запанельном пространстве. После срабатывания огнетушителя требуется очистка атмосферы от повышенного содержания CO_2 . Для тушения открытых источников пламени, например литиевых батарей, НАСА разработало и использует на АС МКС огнетушители с распылением мелкодисперсной воды.

Использование кислородной маски при тушении пожара огнетушителем небезопасно, так как 80 % кислорода, подаваемого в маску, попадает в атмосферу.

Маска с разработанным НАСА сорбционным фильтром для пожарного случая небезопасна при тушении пожара, так как сорбенты при температуре воздуха выше 30 °С резко теряют поглотительную емкость и не смогут предохранить человека. Также в этой маске человек не обеспечивается кислородом и фильтры не поглощают углекислый газ, тогда как в зоне пожара концентрация CO_2 обычно повышена, концентрация O_2 снижена. Газовая среда содержит окись углерода и продукты термодеструкции неметаллов, удаление которых фильтры такой маски не обеспечивают.

Российские фильтры с полумасками используются только после ликвидации пожара и после очистки атмосферы модуля переносным агрегатом АФОТ.

Системы генерации кислорода

Российская система генерации кислорода «Электрон-ВМ» снабжена блоком жидкостным (БЖ), в котором реализуются все технологические процессы (по ТУ масса БЖ ≈ 160 кг, гарантированный ресурс не менее одного года, количество вкл./откл. – не менее 200, фактический ресурс – несколько лет), и блоком согласования сигналов и команд. БЖ системы «Электрон-ВМ» вырабатывает кислород в процессе электролиза воды со щелочным электролитом (25 % по массе раствор КОН) в проточном электролизере с последующим разделением газожидкостной смеси в статических разделителях.

Циркуляция электролита в контуре БЖ обеспечивается одним из двух насосов. После отделения от жидкости электролизные кислород и водород очищаются от аэрозоля электролита в фильтрах. Кислород дополнительно проходит каталитическую очистку от водорода. Производительность системы «Электрон-ВМ» от 25 до 160 л кислорода в час. Водород в настоящее время сбрасывается за борт. В дальнейшем при доставке системы переработки углекислого газа (СПДУ) на борт станции водород будет использоваться при гидрировании диоксида углерода по реакции Сабатье.

Электропитание электролизера происходит от источника питания постоянного тока (масса не более 20,5 кг). Ток электролизера может изменяться от 10 до 64 А в зависимости от потребности в кислороде. Техническое обслуживание «Электрона-ВМ» требуется только в период останова системы на срок более шести месяцев.

Однако использование щелочи в системе создает необходимость дополнительных мер по безопасности. Проскок щелочи в газовые магистрали произошел один раз в 2004 г. в связи с ошибкой в обновленной версии программной реализации алгоритма управления системой «Электрон-ВМ» на бортовом компьютере. Принятые меры по безопасности практически исключили щелочную нештатную ситуацию. Для обеспечения безопасности щелочные агрегаты БЖ заключены в герметичную капсулу, надутую азотом до избыточного давления 1,1 ати с помощью блока продувки азотом массой (с азотом) ≈ 15 кг.

Газоанализаторы контролируют содержание водорода в кислороде, кислорода в водороде и водорода в воздухе из негерметичной части БЖ, при содержании любого из контролируемых газов (2 % об.) система автоматически отключается. Контроль проскока электролита через разделитель с электролизными газами в БЖ осуществляют датчики проскока жидкости. В БЖ, находящихся в ЗИП, предусмотрена вторая ступень контроля проскока жидкости на других физических принципах. Для повышения безопасности эксплуатации системы «Электрон-ВМ» на выходе кислорода и водорода из БЖ (до газоанализаторов) установлены дополнительные внешние аэрозольные фильтры с полупрозрачными стенками, которые являются дополнительной ступенью контроля проскока электролита. «Электрон-ВМ» работает на борту МКС с ноября 2000 г. по настоящее время [23].

По состоянию на 1 декабря 2021 г. использовано восемь блоков БЖ (№ 003–009, 011) и 10 блоков продувки азотом. По итогам анализа отказов и нештатных ситуаций в СГК «Электрон-ВМ» и дефектации спущенных на Землю БЖ № 005, 006, 008 модернизирована конструкция БЖ и его аппаратов. Начиная с системы № 008 изготовление передано на новое производство, после чего наработка БЖ значительно превысила назначенный ресурс (один год). БЖ № 009 наработал до отказа 1265 сут (три с половиной года), для обеспечения его работы доставка агрегатов составила 10,3 кг. БЖ № 011, работающий с 2011 г. по настоящее время, наработал 2087 сут (более 5,7 лет) без отказа.

Система «Электрон-ВМ» является высокоэффективной системой, перспективной для дальнейшего применения на обитаемых космических станциях, в том числе при полете в дальний космос, включая создание планетных баз.

Основными направлениями развития конструкции системы «Электрон-ВМ» является увеличение ресурса и надежности узлов и аппаратов системы и повышение устойчивости к нештатным ситуациям при эксплуатации, а также создание автономного блока управления для системы

(чтобы исключить отключения системы при централизованном управлении). Ближайшим направлением и итогом дальнейшего развития системы «Электрон-ВМ» должно стать достижение наработки ее БЖ до семи лет [23].

Американская система генерации кислорода с твердым полимерным электролитом (OGS) состоит из блока управления и семи отдельных заменяемых технологических блоков системы:

- блока воды;
- блока деионизатора;
- блока водорода (основной блок – герметичная капсула с электролизером и центробежным разделителем-аккумулятором);
- блока кислорода;
- блока азота;
- блока насоса;
- блока датчиков водорода.

Заявленный ресурс для отдельных технологических блоков от полугода до 10 лет при массе ежегодно доставляемого оборудования для обеспечения работы системы 127 кг в год, а общая масса (семь технологических блоков и блок управления) 377 кг. Подача воды идет только в катодную камеру электролизера с последующим разделением водородно-водной смеси в центробежном разделителе-аккумуляторе. Электролизный кислород проходит через абсорбер воды, который очищает газ от капель воды и аэрозолей.

Датчик газа контролирует наличие газа в питающей воде, и при его обнаружении вода в циркуляционный контур не подается. Для обеспечения безопасности блок водорода (электролизер, центробежный разделитель-аккумулятор и сопутствующие им узлы) помещены в герметичную капсулу, находящуюся под вакуумом. При отключении системы проводится продувка азотом трубопроводов технологического контура системы. Для OGS предусмотрен также режим «Ожидание», когда через электролизер пропускается ток ≈ 1 А и работает разделитель-аккумулятор, чтобы в электролизере избежать отравления ионообменной мембраны (твердого полимерного электролита) выделяющимися из материалов циркуляционного контура микропримесями, подавить развитие бактериальной микрофлоры в технологическом контуре и минимизировать проблемы при пуске системы.

Система на борту МКС эксплуатируется с середины 2007 г. В OGS заменялись на новые:

- блок воды;
- блок водорода (два раза, из-за деградации ионообменных мембран в электролизере);
- блок насосов (многократная замена);
- блок датчиков водорода (многократная замена);
- фильтры (многократная замена).

Анализ возвращенных на Землю блоков водорода показал, что мембраны электролизера стали разрушаться, производя кислоту, что привело к низкому

pH и вызвало коррозию, в результате которой были заблокированы фильтры и загрязнены сами мембраны, что увеличило их сопротивление, повысив напряжение до предела отключения. Эта проблема была решена добавлением деионизатора для удаления примесей из циркулирующей воды, заменой блока водорода, блока воды, заменой фильтров на фильтры новой конструкции.

OGS требует перепроектирования для удовлетворительной работы на МКС. Проблемы в значительной степени связаны с недостаточной наземной обработкой. Необходимо изменить материал электролизной мембраны, заменить датчик водорода, удалить продувку азотом и провести ряд других изменений. Должен быть осуществлен доступ для ремонта внутренних агрегатов. Фильтры должны быть расположены таким образом, чтобы их можно было легко проверить, заменить или очистить.

OGS для дальних полетов должен иметь меньшую массу, лучшую надежность и ремонтпригодность, большую безопасность, радиационную стойкость. Предусмотренное техническое обслуживание с такими большими и сложными заменяемыми блоками, как те, которые сейчас предусмотрены для МКС, не подходит для дальнего космоса (межпланетных и лунных) [24]. Данные табл. показывают преимущества российской системы по энергопотреблению и массе [23, 24].

Параметры российской и американской систем генерации кислорода

Параметр	«Электрон-ВМ»	OGS
Максимальная производительность O ₂ : кг/сут л/ч	5,5 160	9,3 270
Максимальное энергопотребление, Вт	1340	2971/3955 (начало/конец ресурса)
Напряжение на электролизной ячейке, В	1,6–1,9	до 3,0
Удельные энергозатраты на выработку 1 л/ч O ₂ , Вт	7,6–8,9	11,0–16,5/14,6–20,1 (начало/конец ресурса)
Масса, кг (без блоков продувки азотом и энергопитания)	164	377
Циркулирующая среда	25 % раствор КОН	вода
Влияние на электролизер: – режима ожидания – выработки ресурса	положительное * не обнаружено	отрицательное ** деградация мембраны ионообменной – рост напряжения
Особые требования к питающей воде	ограничения: • по содержанию CO ₂ , • по пузырькам воздуха	требуется дополнительная специальная очистка

* – снижение поляризации электродов

** – отравление ионообменной мембраны

Резервные средства обеспечения кислородом

На РС МКС имеются резервные средства обеспечения кислородом – твердо-топливные генераторы кислорода (ТГК), основанные на использовании доставляемых с Земли кассет с твердым источником кислорода (ТИК). Основа ТИК – перхлораты лития или натрия, после инициации реакции происходит разложение твердого вещества в кассете с выделением газообразного кислорода. Реакция происходит при температуре 300–500 °С и после охлаждения кислород с воздушным потоком подается в атмосферу РС МКС. ТГК использовались только на РС МКС в начале эксплуатации и при отказах основной системы генерации кислорода «Электрон-ВМ».

Аналогичные средства ТГК разработки США и Великобритании не прошли сертификацию безопасности НАСА для использования на АС МКС (имелись случаи аварий на субмаринах ВМФ США и Великобритании, связанные с использованием ТГК, их возгоранием, детонацией и взрывом).

Аварийный случай возгорания российской кассеты с ТИК имел место и при полете «Мир» (без детонации и взрыва). Для МКС российское оборудование ТГК и ТИК было доработано в части обеспечения повышенного уровня пожаробезопасности и взрывобезопасности [25]. В РС МКС используются также баллоны с воздухом и кислородом прежде всего для восполнения потерь при «выходах» в космос, в АС МКС – баллоны с азотом и кислородом.

Средства водообеспечения и элементы средств санитарно-гигиенического обеспечения

Системы регенерации воды из конденсата

Российская сорбционно-каталитическая система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги СРВ-К2М снабжена фильтром газожидкостной смеси, реактором (катализатором), разделителем, насосом, блоком колонок очистки, блоками клапанов и датчиков, контейнерами питьевой и технической воды, нагревателем воды.

В системе используется каталитическое окисление при температуре и давлении атмосферы станции. Многоступенчатая сорбционно-каталитическая очистка производится с использованием катализатора, ионообменных смол и сорбентов в воздухожидкостном и жидком потоках. Далее полученная вода в соответствующих агрегатах подвергалась соленасыщению, консервации и пастеризации, а также нагреву.

СРВ-К2М эксплуатировалась на станциях «Салют» и на станции «Мир» в течение всех пилотируемых экспедиций станции с начала 1986 г. до середины 1999 г., и на МКС с ноября 2000 г. по настоящее время.

Основной задачей усовершенствования российской системы являлось увеличение ресурса ее основных заменяемых агрегатов: сепаратора и блока колонок. Для этого в состав СРВ-К2 еще при эксплуатации на станции

«Мир» был введен катализатор [8, 27, 28]. При эксплуатации МКС решена задача ресурса по сепарации.

Американская сорбционно-каталитическая система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги WPA по составу близка к российской. В системе используется многоступенчатая сорбционно-каталитическая очистка в жидкой фазе, в том числе высокотемпературная каталитическая очистка с подачей кислорода-окислителя при давлении 2 атм и температуре 130 °С с последующей сепарацией избытка кислорода.

WPA эксплуатируется на МКС с 2009 г. При эксплуатации системы наблюдался рост биопленки, препятствующий очистке, а также имели место негерметичности в системе. В связи с появлением в атмосфере силоксанов, емкость сорбентов оказалась недостаточной. Поэтому на МКС были произведены доработки системы: улучшены уплотнения в каталитическом реакторе, количество фильтров мультифльтрации было уменьшено с двух до одного, при этом использованы сорбенты с большей емкостью, чтобы улучшить удаление силоксанов в поступающем конденсате и продлить срок эксплуатации, был заменен катализатор.

Преимуществом российской технологии являются значительно меньшие массо-энергетические затраты при регенерации воды из конденсата, высокая надежность и удобство использования. В то же время ресурс по очистке конденсата от недиссоциирующих органических примесей может быть увеличен. Введение блока подачи воздуха в блок колонок очистки и применение режима подачи газожидкостной смеси позволит значительно увеличить (в 3–5 раз) ресурс системы по окислению недиссоциирующей органики за счет кислорода [8, 26–28].

Системы регенерации воды из урины

Российская система регенерации воды из урины (СРВ-У). Это наиболее сложная система водообеспечения, созданная впервые в мире, эксплуатировалась на станции «Мир» в течение пилотируемых экспедиций станции с начала 1990 г. до середины 1999 г. [9]. Эта система состояла из подсистемы приема и консервации урины (СПК-У), подсистемы дистилляции и подсистемы очистки и хранения воды.

На станции «Мир» был принят процесс низкотемпературной дистилляции с сорбционно-каталитической доочисткой конденсата. Полученная вода использовалась в системе «Электрон» для получения кислорода.

В системе регенерации воды из урины станции «Мир» испаряемая жидкость и пар разделялись гидрофобной мембраной (пленкой), которая пропускала пар, но не пропускала жидкость. Ресурс работы такой системы ограничен забиванием пор мембраны и постепенной потерей гидрофобности. Кроме того, испарение воды осуществлялось в паровоздушную среду при атмосферном давлении, что требовало затрат энергии в два раза больше, чем термодинамические затраты на испарение. На МКС используются системы,

основанные на методе вакуумной дистилляции в центробежном многоступенчатом дистилляторе с рекуперацией тепловой энергии конденсации пара для испарения и отводом концентрата урины в сменную емкость по незамкнутому контуру. Примененный метод обеспечивает в сумме десятикратную экономию потребляемой энергии и не менее чем двенадцатикратное увеличение ресурса дистиллятора по сравнению с системой станции «Мир».

В настоящее время на МКС находятся четыре системы приема и консервации урины СПК-У (из них две системы расположены в РС и две – в АС) и три системы СРВ-У (из них две системы расположены в РС и одна – в АС). Одна из систем СПК-У–СПК-УМ – расположена в модуле «Звезда» и эксплуатируется с начала пилотируемого полета МКС – с ноября 2000 г. При этом система приема и консервации урины реализована совместно с ассенизационно-санитарным устройством (АСУ) в составе системы АСУ-СПК-УМ. В модуле МИМ1 РС МКС с февраля 2018 г. установлена и обрабатывается научная аппаратура – экспериментальная система регенерации воды из урины СРВ-У-РС. Урина для этой системы переносится вручную из модуля «Звезда». В составе многофункционального лабораторного модуля «Наука» в конце июля 2021 г. на МКС прибыла штатная система СРВ-УМ и с октября 2021 г. проводится наладка ее работы. С этим же модулем прибыла гидравлически соединенная с СРВ-УМ система СПК-УМ с АСУ в составе системы АСУ-СПК-УМ, которая может функционировать как совместно с СРВ-УМ – с подачей консервированной урины на переработку в автоматическом режиме, так и автономно – с подачей урины в сменную емкость ЕДВ (работает с октября 2021 г. в автономном режиме, до наладки СРВ-УМ). Для консервации урины в АСУ-СПК-УМ используется жидкий консервант на основе водного раствора серной кислоты с окисью хрома. [8, 27, 28].

Обе системы СРВ-У-РС и СРВ-УМ основаны на центробежной вакуумной многоступенчатой дистилляции с дополнительной рекуперацией энергии в термоэлектрическом теплообменнике (тепловом насосе) и отводом концентрата урины в сменную емкость по незамкнутому контуру.

Конструктивные отличия между двумя системами определяются их основным назначением:

1. СРВ-У-РС – научная аппаратура (НА) для исследований и летной отработки технологических процессов дистилляции:

а) работает в полуавтоматическом режиме с подключением вручную сменных ЕДВ с уриной, переносимых из АСУ-СПК-УМ;

б) обеспечивает запись всех параметров и показаний датчиков системы в лог-файл, передаваемый на Землю для подробного анализа работы системы;

в) предусматривает возможность гибкого изменения в полете алгоритма управления, изменения схемы вакуумирования с подключением к бортовому вакууму или с использованием собственных вакуум-насосов.

2. СРВ-УМ – штатная система регенерации в составе КСЖО:

а) работает в автоматическом режиме совместно с туалетом в составе АСУ-СПК-УМ;

б) не обеспечивает записи в лог-файл и подробного анализа работы, но имеет значительно большее количество параметров ТМИ, передаваемых в ЦУП;

в) не предусматривает возможность изменения в полете алгоритма управления и схемы вакуумирования (работает только с использованием собственных вакуум-насосов).

Кроме того, конструктивные особенности систем определяют разные способы регулирования коэффициента извлечения воды из урины:

– в СРВ-У-РС – изменением количества урины, используемой для промывки контура урины с удалением упаренного остатка (непрямое регулирование коэффициента);

– в СРВ-УМ – изменением количества конденсата, получаемого из фиксированной порции урины, с фиксированным количеством урины на промывку контура (прямое регулирование коэффициента) (рис. 2) [8, 27, 28].



Рис. 2. Регенерационная система водообеспечения:
а – СРВ-УМ в МЛМ; б – блок дистилляции НА СРВ-У-РС в МИМ1

Американская система регенерации воды из урины UPA по подсистемам аналогична российской. Но в подсистеме дистилляции используется центробежная вакуумная одноступенчатая дистилляция с рекуперацией тепла парокompрессионным методом и концентрированием упаренного остатка в фильтре-емкости по замкнутому контуру. Система эксплуатируется на МКС с конца 2008 г. и гидравлически подключена к туалету российской конструкции (АСУ СПК-УМ-ИБ/WHC) через интерфейсные блоки подачи консервированной урины и смывной воды. Для консервации урины в АСУ СПК-УМ-ИБ до 2015 г. использовался жидкий консервант на основе водного раствора серной кислоты с окисью хрома, а с 2015 г. осуществлен переход на консервант на основе водного раствора ортофосфорной кислоты с окисью хрома американской разработки. Обновленная подсистема дистилляции с увеличенной

производительностью и с увеличенным сроком эксплуатации была установлена в 2020 г., предполагается ее дальнейшее усовершенствование.

Преимуществом российской технологии является большая производительность при регенерации воды из урины (2–2,5 л/ч) и значительно меньшие массоэнергетические затраты. В то же время у нее сравнительно большая чувствительность дистиллятора урины к засорению образующимся осадком в урине, устраняемая введением дополнительных средств фильтрации и промывки.

В космосе из костей человека вымывается кальций, значительная часть которого выводится из организма с уриной, то есть у урины человека в космосе другой химический состав, чем у урины человека на Земле. Оказалось, что из-за повышенного содержания кальция урина вступала в реакцию с химикатами, которыми ее обрабатывали, образовывался сульфат кальция, отложения которого засоряли и выводили систему из строя, в первую очередь, ее насосы. И если в условиях наземной лаборатории коэффициент извлечения воды из урины американской системы составляет 85 %, то на борту АС МКС до замены консерванта удавалось извлекать менее 80 %. После замены консерванта на АС МКС коэффициент извлечения американской системы был увеличен на борту до 87 %.

В российской системе удалось достигнуть в наземных условиях коэффициента извлечения воды 87 %, на борту в системе СРВ-У-РС – 82 %.

Сравнительно большая чувствительность дистиллятора урины к засорению образующимся осадком в урине в СРВ-У устраняется введением дополнительных средств фильтрации и промывки. Для дальнейшего усовершенствования СРВ-У, в том числе для обеспечения регенерации воды из упаренного остатка (концентрата), необходим переход на замкнутый контур концентрирования упаренного остатка [8, 27, 28].

Системы регенерации воды из концентрата урины

Эта система находится в России в стадии разработки. Предлагается дополнительное выпаривание воды из концентрата урины, собранного в замкнутом контуре, с конденсацией пара в водяной контур системы регенерации воды из урины (при модернизации СРВ-У).

В начале 2020 г. НАСА запустило на МКС систему регенерации воды из концентрата урины ВРА для отработки технологии. В технологии используется двухмембранная емкость урины для удержания обезвоженных твердых частиц концентрата при пропускании водяного пара в атмосферу кабины. Образующаяся из пара вода собирается конденсатором-теплообменником и поступает в систему регенерации конденсата ВРА. При этом наблюдалось значительное загрязнение атмосферы станции.

Российская технология выпаривания воды из концентрата урины в замкнутом контуре вакуумной дистилляции должна проходить без загрязнения атмосферы станции, в отличие от американской технологии атмосферного

выпаривания через паропроницаемую мембрану, при летных испытаниях которой в атмосфере АС МКС выявлен сильный «туалетный» запах, создаваемый летучими растворимыми в воде примесями, поступающими с паром (по данным НАСА их концентрация не превышала предельно допустимую). Система ВРА нуждается в дополнительной доработке [8, 27, 28].

Средства водообеспечения на запасах воды

В российских средствах используется отработанный надежный способ хранения воды в емкостях с пассивной консервацией ионным серебром. В американских средствах используется хранение воды в емкостях с консервацией йодом, что требует дополнительной очистки воды перед ее употреблением. Для хранения и доставки запасов воды в российских средствах используются два типа баков:

- стационарные незаменяемые баки системы «Родник» (два бака на одну систему) объемом 210 л каждый;
- переносная емкость для воды ЕДВ объемом 22 л.

Конструкции баков для воды обоих типов, созданных для использования в условиях микрогравитации, не имеют существенных отличий: внутри металлического корпуса находится мягкий фторопластовый мешок, предназначенный для хранения воды. Перекачка воды может осуществляться с помощью водяного насоса (блок перекачки) или методом вытеснения за счет избыточного давления, создаваемого в полости между мягкой емкостью и жестким корпусом нагнетателем воздуха (электромеханическим компрессором или ручным насосом).

В американских системах для временного хранения воды используются сильфонные баки объемом 40 л в составе систем регенерации воды, для доставки воды используются одноразовые пластиковые баки с конструкцией, заимствованной из баков хранения воды и конденсата КК «Шаттл». В качестве переносных расходных емкостей в американских средствах в начальный период эксплуатации МКС использовались мягкие двухслойные «аварийные сумки» СWS объемом 44 л из состава КК «Шаттл», а в настоящее время используются российские ЕДВ объемом 22 л.

Применительно к существующим средствам хранения НАСА собирается проводить исследование роста микробов в период покоя и эффективности технологии проточной ультрафиолетовой дезинфекции, которая должна сократить использование расходных материалов системы.

Для будущих полетов НАСА рассматривает альтернативные дезинфицирующие средства, которые более совместимы с потреблением воды человеком, прежде всего использование ионного серебра, аналогично российским средствам. В 2021 г. НАСА продолжают наземные испытания активной установки электролиза серебра, предназначенной для генерации ионов серебра в питьевой воде в течение длительного времени. Исследуется также пассивное дозирование серебра.

Для российских средств также целесообразна разработка бортового средства для консервации воды ионным серебром – установки электролиза серебра для генерации ионов серебра [8, 27, 28].

Средства сепарации воды

В состав средств водообеспечения входят средства сепарации воды, обеспечивающие отделение из воды пузырей нерастворенного газа для обеспечения стабильной и безотказной работы систем-потребителей воды: системы «Электрон» и АСУ-СПК-УМ (при использовании смывной воды). На РС МКС используются три типа средств сепарации:

- на основе капиллярных сил – газожидкостный сепаратор (ГЖС);
- на основе статического мембранного разделителя с гидрофильной полимерной мембраной – устройство сепарации (УС);
- центробежный насос-сепаратор конденсата и воды (НС-КВ).

Недостатками ГЖС и УС является большое количество ручных операций и необходимость постоянного контроля экипажем, с повторными сепарациями воды для достижения наилучшего результата. НС-КВ разработан как полностью автоматически работающий насосный агрегат, однако в процессе его летной отработки выявилась необходимость дополнительных ручных операций и также иногда повторных сепараций воды. В настоящее время экипажи по желанию могут использовать ГЖС (с постоянным контролем процесса) или НС-КВ (с периодическим контролем), наиболее перспективным представляется усовершенствование НС-КВ для обеспечения полностью автоматической работы.

В АС МКС для отделения пузырей нерастворенного газа применяются центробежные насосы-сепараторы, работающие в автоматическом режиме в составе систем регенерации, которые не обеспечивают стопроцентной сепарации (пузыри нерастворенного воздуха накапливаются в сильфонных баках промежуточного хранения воды), что компенсируется устойчивостью американской системы кислородообеспечения к наличию в воде пузырей, либо дополнительными операциями на борту (технология заправки и использования смывной воды в АСУ-СПК-УМ-ИБ АС МКС).

Ассенизационно-санитарное устройство (туалет)

Туалеты на МКС предназначены для мужчин и для женщин. Комфортное отправление естественных надобностей обеспечивается за счет транспортного воздушного потока, создаваемого вентилятором. Поток воздуха транспортирует твердые и жидкие отходы к местам их сбора и хранения, а затем, после очистки в дезодорирующем фильтре, выбрасывается в атмосферу кабины. Фекалии собираются в сменные одноразовые контейнеры для последующего удаления, их переработка не предусмотрена ни в российских, ни в американских средствах. Жидкая урина может перерабатываться в системах регенерации с получением воды на нужды экипажа, для чего в состав туалета входят средства приема и консервации урины, обеспечивающие консервацию

урины для предотвращения ее химического и бактериологического разложения, а также отделение жидкой урины от транспортного воздуха и подачу ее в емкости для временного хранения (ЕДВ), либо на переработку в систему регенерации воды из урины,

По отношению к системам станции «Мир» СПК-УМ для МКС не претерпела принципиальных изменений. СПК-УМ снабжена емкостями приема урины, смывной воды, консерванта, сепараторами, вентилятором и датчиками. В этой подсистеме урина, подаваемая космонавтам в приемное устройство, захватывается отсасываемым потоком воздуха, создаваемым вентилятором. Жидкость выделяется из газожидкостного потока в центробежном сепараторе и подается через блок клапанов в емкости для последующей переработки в подсистеме дистилляции. Воздух через статический сепаратор и фильтр сбрасывается в кабину. При каждом подходе к приемному устройству в поток урины автоматически подается насосом-дозатором консервант со смывной водой. Используется жидкий консервант на основе водного раствора серной кислоты с окисью хрома, который хранится в емкости [8, 27, 28].

На МКС находится четыре АСУ с СПК-УМ, два туалета расположены в РС МКС: один расположен в модуле «Звезда» и эксплуатируется с начала пилотируемого полета МКС – с ноября 2000 г., второй – в модуле «Наука», был доставлен на станцию в июле 2021 г., начало эксплуатации – октябрь 2021 г. Два туалета установлены в АС МКС, один российского производства (аналогичный российскому в модуле «Звезда», но имеет дополнительное оборудование для связи с американской системой регенерации урины) был доставлен на станцию в конце 2008 г., второй американский туалет UWMS был доставлен в октябре 2020 г., его конструкция на 40 % легче российского, однако астронавтам пока не удалось наладить его непрерывную работу. Это экспериментальный экземпляр для корабля «Орион», требующий доработки. В настоящее время на АС используется туалет российского производства с учетом его преимуществ по основным показателям.

На основе опыта многолетней эксплуатации туалетов на РС и АС МКС и результатов анализа отказов, связанных как с эксплуатационными, так и с конструктивными факторами, в настоящее время проводится модернизация АСУ-СПК-УМ с введением в состав новых блоков СПК-УМ2, обеспечивающих значительное повышение надежности ресурса:

- центробежного насоса-разделителя новой конструкции;
- насоса-дозатора консерванта (без использования смывной воды);
- емкости с консервантом с бесшовной внутренней камерой;
- датчиков и средств управления на современной элементной базе.

По завершении в 2022 г. комплексной наземной отработки блоков СПК-УМ2 планируется их доставка на МКС и поэтапное подключение в работу в составе АСУ-СПК-УМ модуля «Звезда» для летной отработки, после чего они будут введены в эксплуатацию во всех трех российских туалетах РС и АС МКС.

Следует отметить, что по сравнению с американскими системами российские системы регенерационного водообеспечения имеют существенно меньшую массу, габариты и энергопотребление. Масса (и габариты) в 3–5 раз меньше, удельная масса сменного оборудования в 2–3 раза меньше, потребляемая энергия меньше для регенерации конденсата в 10 раз, урины в 1,5 раза. В то же время следует обратить внимание на повышение ресурса оборудования и снижение времени обслуживания российских систем [8, 27, 28].

Выводы

1. На МКС российские системы обеспечения газового состава и системы водообеспечения имеют, в основном, меньшую массу и энергопотребление и больший ресурс и надежность, чем американские системы. К таким системам относятся:

- система удаления углекислого газа «Воздух»;
- удаления вредных примесей СБМП;
- генерации кислорода «Электрон-ВМ»;
- регенерации воды из конденсата СРВК-2М;
- регенерации воды из урины СРВ-УМ;
- средства пожаротушения;
- водообеспечения на запасах воды.

Российская газоаналитическая аппаратура по основным газам (кислород, углекислый газ, водяной пар) уступает американской по точности. Бортовые автоматические газоанализаторы по вредным примесям отсутствуют у обеих сторон. Отсутствуют российские гепофилтры по удалению аэрозолей (пыли) меньше 20 мкм, вредных для человека.

2. Российские системы СЖО прошли отработку на станции «Мир» и модернизированы для МКС. 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).

3. На МКС эксплуатируются частично замкнутые комплексы СЖО. Для экспедиций дальнего космоса (межпланетных и лунных) необходимо модернизировать российский и американский комплексы 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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романов С.Ю., Гузенберг А.С. Космические системы жизнеобеспечения: основные требования к разработке средств жизнеобеспечения экипажей длительных космических экспедиций // Инженерная экология. – 2013. – № 2 (110). – С. 2–15.

- [2] Burnasian A.I., Adamovich B.A., Samsonov N.M., Lavrov I.V. [et.al]. “Long – term experiment in partially closed ecological system” // *Aerospace medicine*. 1969. 40 (№ 10). – pp. 1087–1093.
- [3] Самсонов Н.М., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Курмазенко Э.А., Романов С.Ю., Железняков А.Г., Баранов В.М., Синяк Ю.Е. Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций // *Известия РАН. Энергетика*. – 2009. – № 1. – С. 61–68.
- [4] Абрамов И.П., Брюханов Н.А., Григорьев Ю.И., Зеленщиков Н.И., Романов С.Ю., Самсонов Н.М., Соколов Б.А. Системы жизнеобеспечения орбитальной станции «Мир» и МКС // *Известия РАН. Энергетика*. – 2003. – № 3. – С. 33–52.
- [5] Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В. Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей долговременных космических станций // *Космическая техника и технологии*. – 2015. – № 1. – С. 67–80.
- [6] Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А., Гузенберг А.С., Андрейчук П.О., Протасов Н.Н., Беркович Ю.А. Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций // *Известия РАН. Энергетика*. – 2007. – № 3. – С. 57–74.
- [7] Юргин А.В., Романов С.Ю., Гузенберг А.С., Рябкин А.М., Телегин А.А. Эксплуатация системы удаления диоксида углерода из атмосферы международной космической станции // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2008. – Т. 42. – № 61. – С. 92–93.
- [8] Бобе Л.С., Кочетков А.А., Романов С.Ю., Андрейчук П.О., Железняков А.Г., Синяк Ю.Е. Перспективы развития регенерационного водообеспечения пилотируемых космических станций // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2014. – № 2 (11). – С. 51–60.
- [9] Бобе Л.С., Самсонов Н.М., Новиков В.М., Кочетков А.А., Солоухин В.А., Телегин А.А., Андрейчук П.О., Протасов Н.Н., Синяк Ю.Е. Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций // *Известия РАН. Энергетика*. – 2009. – № 1. – С. 69–77.
- [10] Бобе Л.С., Кочетков А.А., Самсонов Н.М. Регенерация воды на космических станциях // *Инженерная экология*. – 2013. – № 2. – С. 34–49.
- [11] Bobe L., Gavrilov L., Kochetkov A., Samsonov N., Tomashpolsky M. 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., Бобе Л.С. Построение и энергомассовые характеристики группы регенерационных систем водообеспечения космической станции // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2016. – № 2(19). – С. 25–34.
- [13] Gregory Smarik, James Knox and Timothy Huff. Analysis of Performance Degradation of Silica Gels after Extended Use Onboard the ISS // 48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-2, 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico.
- [14] Steven Balistreri, Gregory Mobley and Chang Son. The CDRA Snorkel: Developing a Flow Diversion Device to Protect the Carbon Dioxide Removal Assembly from Liquid Water Ingestion // 48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-37, 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico.
- [15] Першин А.Н. Возвращение фотокатализа. <https://airlife.ru>.

- [16] Laura A. Shaw, John D. Garr II, Lynda L. Gavin, David M. Hornyak, Christopher M. Matty, Alesha Ridley, Michael J. Salopek, Katherine P. Toon. International Space Station as a Testbed for Exploration Environmental Control and Life Support Systems. 2021 Status // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-20. 12–15 July 2021.
- [17] ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования: нац. стандарт: дата введ. 08.08.95 N 424.
- [18] Капустина Е.А., Наголкин А.В., Новикова Н.Д., Поддубко С.В. Обеззараживание воздушной среды на борту космических летательных аппаратов// Авиакосмическая и экологическая медицина. Москва, 2004. – № 5. – Т. 38. – С. 46–52.
- [19] Kevin M. Braman, Susan M. Snyder. Design and Implementation of Combination Charcoal and HEPA Filters for the International Space Station Cabin Air Ventilation System // 49th International Conference on Environmental Systems ICES-2019-374 7–11 July 2019, Boston, Massachusetts.
- [20] Воздушные HEPA-фильтры для вентиляции. — URL: <https://masvent.ru/tovari/filtry-dlja-ventiljicii/visokoeffektivniefiltri/hepa-filtr.html>.
- [21] Романов С.Ю., Мухамедиева Л.Н., Гузенберг А.С., Микос К.Н. Вредные примеси в атмосфере обитаемых космических станций // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – № 1. – С. 31–49.
- [22] Романов С.Ю., Телегин А.А., Гузенберг А.С., Юргин А.В., Павлова А.Г. Космические системы обеспечения: особенности обеспечения токсической безопасности искусственной среды на многомодульных космических станциях // Инженерная экология. – 2013. – № 2 (110). – С. 50–62.
- [23] Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А. Система генерации кислорода «Электрон-ВМ» на борту Международной космической станции // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 3(8). – С. 84–99.
- [24] Harry W. Jones, Moffett Field. Using the International Space Station (ISS) Oxygen Generation Assembly (OGA) Is Not Feasible for Mars Transit // 46th International Conference on Environmental Systems ICES-2016-103. 10–14 July 2016, Vienna, Austria.
- [25] Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю., Юргин А.В., Телегин А.А., Бурлакова А.А., Рябкин А.М. Попадание токсичных веществ в атмосферу пилотируемых космических объектов в нештатных ситуациях // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 2(43). – С. 83–104.
- [26] Andreychuk P., Romanov S., Zeleznyakov A., Bobe L., Kochetkov A., Tsygankov A., Arakcheev D., Sinyak Y. The water management on the ISS and prospective space stations // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2020-236, 12–16 July 2020, Lisbon, Portugal.
- [27] Аракчеев Д.В., Бобе Л.С., Железняков А. Г., Кочетков А.А., Романов С.Ю., Сальников Н.А. Применение центробежной вакуумной дистилляции для регенерации воды из урины и санитарно-гигиенической воды на космической станции // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 4(31). – С. 21–31.
- [28] Бобе Л.С., Кочетков А.А., Павлов А.В. Увеличение ресурса СРВ-К2М РС МКС по очистке конденсата. Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию Ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия», Королёв, 2021. – С. 705–707.

REFERENCES

- [1] Romanov S.Yu., Guzenberg A.S. Life support systems in space: Main requirements for the development of life support systems for the crew members, designed for long-term space missions // *Engineering Ecology*, 2013. No 2 (110), pp. 2–15.
- [2] Burnasian A.I., Adamovich B.A., Samsonov N.M., Lavrov I.V. [et.al]. “Long – term experiment in partially closed ecological system” // *Aerospace medicine*, 1969. 40 (No 10), pp. 1087–1093.
- [3] Samsonov N.M., Bobe L.S., Gavrilov L.I., Kochetkov A.A., Kurmazenko E.A., Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Baranov V.M., Sinyak Yu.E. Life support systems for space station crews // *Proceedings of the RAS. Energetics*, 2009. No 1, pp. 61–68.
- [4] Abramov I.P., Bryukhanov N.A., Grigoriev Yu.I., Zelenshchikov N.I., Romanov S.Yu., Samsonov N.M., Sokolov B.A. Regenerating life-support systems of space stations // *Proceedings of the RAS. Energetics*, 2003. No 3, pp. 33–52.
- [5] Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Romanov S.Yu., Telegin A.A., Yurgin A.V. Selecting life support system for the crews of long duration space stations // *Space Engineering and Technology*, 2015. No 1, pp. 67–80.
- [6] Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A., Guzenberg A.S., Andreichuk P.O., Protasov N.N., Berkovich Yu.A. Life support systems for crews of long-term interplanetary expeditions // *Proceedings of the RAS. Energetics*, 2007. No 3, pp. 57–74.
- [7] Yurgin A.V., Romanov S.Yu., Guzenberg A.S., Ryabkin A.M., Telegin A.A. Operation of the airborne carbon dioxide removal system on the ISS // *Aerospace and Environmental Medicine*, 2008. V. 42, No 61, pp. 92–93.
- [8] Bobe L.S., Kochetkov A.A., Romanov S.Yu., Andreichuk P.O., Zheleznyakov A.G., Sinyak Yu.E. Prospects of the development of water regeneration system for piloted space stations // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*, 2014. No 2(11), pp. 51–60.
- [9] Bobe L.S., Samsonov N.M., Novikov V.M., Kochetkov A.A., Soloukhin V.A., Telegin A.A., Andreichuk P.O., Protasov N.N., Bruise Yu.E. Prospects for the development of water recovery systems for manned space stations. // *Proceedings of the RAS. Energetics*, 2009. No 1, pp. 69–77.
- [10] Bobe L.S., Kochetkov A.A., Samsonov N.M. Water recycling on space stations // *Engineering Ecology*, 2013. No 2, pp. 34–49.
- [11] Bobe L., Gavrilov L., Kochetkov A., Samsonov N., Tomashpolsky M. 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), pp. 25–34.
- [13] Cmarik G., Knox J. and Huff T. Analysis of Performance Degradation of Silica Gels after Extended Use Onboard the ISS // *48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-2, 8–12 July, 2018, Albuquerque, New Mexico.*
- [14] Balistreri S., Mobley G. and Son C. The CDRA Snorkel: Developing a Flow Diversion Device to Protect the Carbon Dioxide Removal Assembly from Liquid Water Ingestion // *48th International Conference on Environmental Systems ICES-2018-37, 8–12 July, 2018, Albuquerque, New Mexico.*
- [15] Pershin A.N. Return of photocatalysis. <https://airlife.ru>

- [16] Laura A. Shaw, John D. Garr II, Lynda L. Gavin, David M. Hornyak, Christopher M. Matty, Alesha Ridley, Michael J. Salopek, Katherine P. Toon. International Space Station as a testbed for exploration environmental control and life support systems. 2021 Status // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-20. 12–15 July 2021.
- [17] GOST R 50804-95. The habitat of an astronaut in a manned spacecraft. General medical and technical requirements: national standard: date entered. 08.08.95. No 424.
- [18] Kapustina E.A., Nagolkin A.V., Novikova N.D., Poddubko S.V. Air purification aboard space vehicles // *Aerospace and Environmental Medicine*. Moscow: 2004. No 5, V. 38, pp. 46–52
- [19] Kevin M. Braman, Susan M. Snyder. Design and Implementation of Combination Charcoal and HEPA Filters for the International Space Station Cabin Air Ventilation System // 49th International Conference on Environmental Systems ICES-2019-374 7–11 July, 2019, Boston, Massachusetts.
- [20] HEPA air filters for ventilation. <https://masvent.ru>.
- [21] Romanov S.Yu., Mukhamedieva L.N., Guzenberg A.S., Mikos K.N. Harmful impurities in the atmosphere of manned space stations // *Proceedings of the RAS. Energetics*, 2006. No 1, pp. 31–49.
- [22] Romanov S.Yu., Telegin A.A., Guzenberg A.S., Yurgin A.V., Pavlova A.G. Life support systems in space: Properties, which must have been ensured for the safety of an artificial poison-free environment on multi-module space stations // *Engineering Ecology*, 2013. No 2 (110), pp. 50–62.
- [23] Proshkin V.Yu., Kurmazenko E.A. Oxygen generation system “Electron-VM” aboard the International Space Station // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*, 2013. No 3(8), pp. 84–99.
- [24] Harry W. Jones, Moffett Field. Using the International Space Station (ISS) Oxygen Generation Assembly (OGA) Is Not Feasible for Mars Transit // 46th International Conference on Environmental Systems ICES-2016-103. 10–14 July, 2016, Vienna, Austria.
- [25] Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Romanov S.Yu., Yurgin A.V., Telegin A.A., Burlakova A.A., Ryabkin A.M. Ingress of toxic substances into the atmosphere of manned space vehicles in off-nominal situations // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*, 2022. No 2(43), pp. 83–104.
- [26] Andreychuk P., Romanov S., Zeleznyakov A., Bobe L., Kochetkov A., Tsygankov A., Arakcheev D., Sinyak Y. The water management on the ISS and prospective space stations // 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2020-236, 12–16 July 2020, Lisbon, Portugal.
- [27] Arakcheev D.V., Bobe L.S., Zheleznyakov A.G., Kochetkov A.A., Romanov S.Yu., Salnikov N.A. Use of rotary vacuum distillation for water recovery from urine and hygiene water aboard the space station // *Space Engineering and Technology*, 2020. No 4(31), pp. 21–31.
- [28] Bobe L.S., Kochetkov A.A., Pavlov A.V. Extension of SRV-K2M RS ISS lifetime on condensate purification. Abstracts of the reports of the XXII Scientific and Technical Conference of Scientists and Specialists, dedicated to the 60th anniversary of Yu.A. Gagarin’s space flight, the 75th anniversary of the rocket and space industry and the foundation of RSC Energia. Korolev, 2021. pp. 705–707.