

УДК 629.78

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДЫ ИЗ УРИНЫ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В РАМКАХ ЭКСПЕРИМЕНТА «СЕПАРАЦИЯ»

Л.С. Бобе, Д.К. Дедков, А.А. Тощева

Докт. техн. наук, проф. Л.С. Бобе (АО «НИИхиммаш»)

Канд. техн. наук, с.н.с. Д.К. Дедков; А.А. Тощева

(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлен обзор результатов испытаний системы регенерации воды из урины, проводимых в рамках научно-технического эксперимента «Сепарация» на российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС). Проведен анализ работы системы, рассмотрены нештатные ситуации (НшС), которые влияли на ее работоспособность в период эксплуатации с 2018 по 2023 год, и способы их устранения. Представлены показатели получаемой регенерированной воды и приведены рекомендации по ее использованию на РС МКС.

Ключевые слова: Международная космическая станция, регенерация воды, урина, вакуумный дистиллятор, эксперимент «Сепарация», эксплуатация системы

Review of Results of Testing the Water Regeneration System from Urine within the Framework of the “Separation” Space Experiment on the International Space Station. L.S. Bobe, D.K. Dedkov, A.A. Toscheva

The paper overviews results of testing the Water Regeneration System from Urine within the framework of the “Separation” scientific-technical experiment that is being carried out on the ISS Russian Segment and analyzes the system operation. Off-nominal situations that affected the system operation from 2018 through 2023 and methods of their neutralization are considered. Parameters of regenerated water and recommendation for using it on the ISS RS are given.

Keywords: International Space Station, water regeneration, urine, vacuum distiller, “Separation” experiment, system operation

В условиях длительного орбитального полета одним из определяющих факторов для жизнедеятельности экипажа является наличие воды. По результатам эксплуатации орбитальных станций «Салют», «Мир» и МКС установлено, что одному члену экипажа в сутки необходимо 4,2 л воды. На МКС вода используется для питья, восстановления сублимированных продуктов питания, санитарно-гигиенических процедур, в качестве смывной воды в ассенизационно-санитарном устройстве (АСУ) и получения кислорода методом электролиза в системах «Электрон-ВМ» в служебном

модуле (СМ) и многоцелевом лабораторном модуле (МЛМ) [1]. Доставка воды с Земли на орбиту обходится весьма дорого (по данным на 2022 г. стоимость составила порядка 1,6 млн руб./кг [4]), что потребовало разработки систем регенерации воды на борту орбитальной станции (ОС). Одна из таких систем – система регенерации воды из урины (СРВ-У).

Впервые в условиях космического полета принцип регенерации воды из урины был применен на ОС «Мир». СРВ-У была установлена на модуле «Квант-2» [2]. Для получения воды использовался метод атмосферной мембранной дистилляции. Урина подогревалась в системе, образовавшиеся пары воды пропускались через полупроницаемые мембраны и конденсировались в конденсаторе. При таком методе из урины извлекалось до 95 % воды. За 9,5 лет эксплуатации системы было получено 6000 л регенерированной воды [13]. Основными недостатками такого метода являлись относительно высокие затраты энергии и ограниченный ресурс мембранного испарителя, определяемый забивкой мембран.

Для МКС была разработана система, основанная на принципе вакуумной дистилляции в центробежном многоступенчатом вакуумном дистилляторе (рис. 1). При низком давлении (менее 500 мм вод. ст.) испарение воды из урины происходит уже при температуре 35–40 °С. Тепло на выпаривание воды поступает от термобатареи термоэлектрического теплового насоса. Сброс излишков тепла из системы происходит через жидкостно-жидкостный теплообменник, охлаждаемый бортовым хладагентом. Образовавшиеся пары воды конденсируются и собираются в отдельную емкость. При таком методе удельные затраты энергии в 10 раз меньше, а производительность в 10 раз выше, чем в системе, работавшей на станции «Мир» [1].

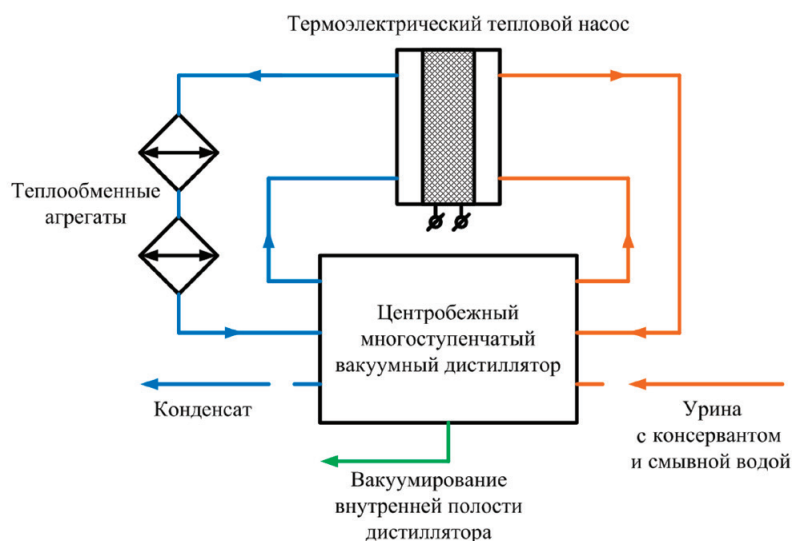


Рис. 1. Схема регенерации урины методом вакуумной дистилляции

Для РС МКС были разработаны две СРВ-У: СРВ-УМ для МЛМ и СРВ-У-РС для малого исследовательского модуля (МИМ1). Сначала была разработана СРВ-УМ, но из-за задержки запуска МЛМ было принято решение о модернизации СРВ-УМ (уменьшение объема и веса в два раза) для установки на МИМ1.

В 2018 году в МИМ1 МКС начался эксперимент «Сепарация» с научной аппаратурой СРВ-У-РС. По требованиям заказчика система должна производить до 3,5 л конденсата в час с объемным коэффициентом извлечения воды из урины 85–87 %. Структурная схема системы СРВ-У-РС приведена на рис. 2.

Ключевым блоком системы является ЦМВД. Встроенные черпаковые насосы и вращающиеся диски (теплообменные поверхности) дистиллятора обеспечивают циркуляцию урины и дистиллята через ТТН и многоступенчатую вакуумную дистилляцию с рекуперацией теплоты конденсации для испарения воды из урины. Теплота конденсации пара, образующегося в 1-й ступени дистиллятора, используется для испарения воды из урины во 2-й ступени, теплота конденсации пара из 2-й ступени – для испарения в 3-й и так далее.

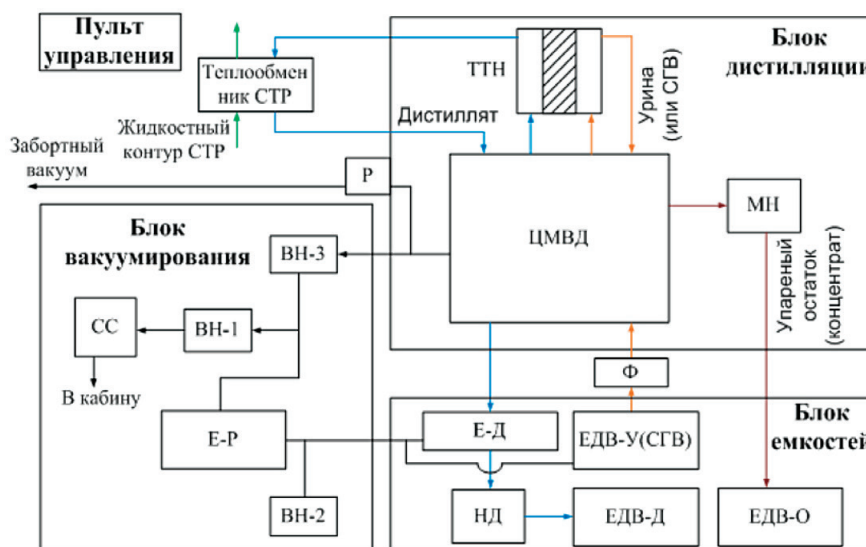


Рис. 2. Структурная схема СРВ-У-РС

- | | |
|---|---|
| ЦМВД – центробежный многоступенчатый вакуумный дистиллятор; | Е-Д – емкость заданного объема (5,1 л) для приема дистиллята; |
| ТТН – термоэлектрический тепловой насос; | НД – насос откачки дистиллята; |
| МН – мембранный насос; | ЕДВ-У – емкость ЕДВ с уриной; |
| ВН-1, ВН-2, ВН-3 – вакуум-насосы; | ЕДВ-Д – емкость ЕДВ для дистиллята; |
| СС – статический сепаратор; | ЕДВ-О – емкость для остатка (концентрата); |
| Ф – фильтр; | СТР – система терморегулирования; |
| Е-Р – емкость-ресивер; | Р – редуктор |

В 1-й ступени испарение происходит за счет тепла, получаемого циркулирующей уриной из внешнего источника – ТТН. Вакуум-насос ВН-1 осуществляет первичное вакуумирование дистиллятора и ресивера; ВН-2 вакуумирует корпуса емкости дистиллята (Е-Д объемом 5,1 л), емкости ЕДВ с уриной (ЕДВ-У) и емкости-ресивера (Е-Р); ВН-3 дополнительно вакуумирует дистиллятор при работе в режиме дистилляции. Предусмотрен вариант работы системы с вакуумированием за счет космического вакуума через редуктор.

Система работает циклически по следующему алгоритму: вакуумирование дистиллятора и емкостей; дистилляция воды из урины (подаваемой из ЕДВ-У) до заполнения емкости Е-Д; вытеснение МН упаренного раствора из контура дистилляции в емкость ЕДВ-О исходной уриной из ЕДВ-У; перекачка дистиллята из емкости Е-Д в емкость ЕДВ-Д для последующей доочистки и потребления. Далее цикл повторяется.

С начала космического эксперимента в системе было получено более 250 л воды, которые были использованы экипажем на питье и приготовление пищи в системе регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К2М). Доставленные на Землю пробы дистиллята соответствуют требованиям технических условий на систему и практически не содержат солей, уносимых с капельной жидкостью (табл. 1). Анализы подтвердили, что регенерированная вода может использоваться для смыва в АСУ-СПК-УМ, для получения кислорода в системе «Электрон-ВМ» и для потребления экипажем в качестве питьевой воды после доочистки в СРВ-К2М.

Таблица 1

Показатели регенерированной воды из СРВ-У-РС после ее доочистки в СРВ-К2М [5]

Наименование показателей	Единица измерения	Норматив (не более) ГОСТ Р 50804-95	МКС-59	МКС-60	МКС-60
			Проба 11.06.2019	Проба 14.08.2019	Проба 20.09.2019
Водородный показатель	ед. рН	5,5–9,0	7,94	7,21	7,63
Запах при 20 °С	балл	2	0	0	0
Содержание хлоридов	мг/л	250	13,13	10,0	10,0
Общая жесткость	мг-экв/л	7	3,4	0,8	1,5
Содержание Са ⁺⁺	мг/л	30–100	42,08	4,01	26,05
Содержание азота аммиака	мг/л	2,0	0,24	<0,05	0,06
Метанол	мг/л	9	н/о	н/о	н/о
Этанол	мг/л	10	н/о	3,8	н/о
Этиленгликоль+ Пропиленгликоль	мг/л	11,0 –	н/о	н/о	н/о
Содержание органического углерода, ТОС	мг/л	25	2,58	1,32	1,75
Бихроматная окисляемость, ХПКб	мгО ₂ /л	50	4,9	7,6	8,0
Общее количество микробов	КОЕ/см ³	100	0	0	0

Примечание: н/о – не обнаружено.

Несмотря на высокие показатели и стабильность работы системы в земных условиях, летная отработка изделия выявила ряд недостатков экспериментального оборудования системы [5–7].

Уже на первом году проведения эксперимента в циркуляционном контуре урины заметно снизился напор. Причиной явилось закупоривание переходных каналов дистиллятора осадком, образующимся при упаривании дистиллируемой урины в условиях невесомости. Также происходит забивка переточного черпакового насоса 5-й ступени дистиллятора взвесями (по-видимому, грибковой флорой), содержащимися в урине. Кроме того, рост грибковой микрофлоры был обнаружен в дистилляте. При опорожнении емкости для воды (ЕВ), которая хранилась на станции около двух лет, взвеси попали в ЕДВ-Д и далее в дистиллятор при проведении повторной дистилляции полученного из урины дистиллята. Наличие взвесей было подтверждено визуально на борту и наземными анализами возвращенных проб воды, слитой из дистиллятора при промывках. Для выхода из данной ситуации специалистами АО «НИИхиммаш» была разработана и успешно использована методика промывки дистиллятора. Чтобы в дальнейшем ситуация не повторилась, на борт МКС был доставлен фильтр, который экипаж МКС установил в магистраль подачи урины.

В том же 2018 году произошло аварийное переполнение дистиллятора уриной из-за ошибки при эксплуатации. Специалистами по системе была разработана методика опорожнения дистиллятора и предложены меры по усилению контроля за работой системы. Но из-за попадания консервированной урины в привод ротора дистиллятора при переполнении дистиллятора произошла деградация изолирующего покрытия (лака УР-231) и разрушение пайки штырьков «проходника», обеспечивающего подключение электропитания двигателя ротора дистиллятора. Весь блок дистилляции был заменен. Пришедшее в негодность оборудование вернули на Землю в 2019 году для его дефектации.

В 2019 году произошла потеря работоспособности мембраны гидроавтомата (ГА1) из-за конструктивного дефекта, через который идет подпитка дистиллятора уриной из исходной емкости. Чтобы вернуть системе работоспособность, специалистами была разработана временная версия алгоритма работы системы, позволяющая подпитывать дистиллятор уриной через байпас ГА1. Для повышения напора жидкости на магистраль циркуляционного контура урины экипажем МКС была установлена трубочина. В дальнейшем конструкция ГА1 была доработана, чтобы предотвратить дальнейшие отказы гидроавтоматов в будущем.

В 2020 году экипаж доложил на Землю о механическом заклинивании ротора центробежного дистиллятора при запуске системы. В ходе анализа была выявлена причина отказа – разрушение подшипника оси вращения ротора из-за попадания консервированной серной кислоты урины в полость подшипника, вызванного производственным дефектом. Специалистами АО

«НИИХиммаш» была разработана и отработана на Земле методика механической прокрутки ротора через технологический штуцер, методика демонтажа статора дистиллятора с механической прокруткой ротора, а также замены разрушившегося подшипника на новый, доставленный с Земли. Несмотря на успешное выполнение всех работ и восстановление свободного вращения ротора, при проведении очередной тестовой дистилляции ротор повторно перестал вращаться (заклинил). Специалисты предположили, что это было связано с перекосом ротора во время его работы с полуразрушенным подшипником. Работоспособность системе вернуть не удалось и в 2021 году была произведена очередная замена блока дистилляции.

В 2022 году при проведении работ в ручном режиме в вакуумную магистраль системы из дистиллятора попала жидкость по причине ошибочной рекомендации экипажу, что привело к выбросу газожидкостной смеси из ВН-2 в атмосферу станции. Поскольку ВН-2 предназначен для вакуумирования газовых полостей емкостей ЕДВ-У, ЕВ и Е-Р, в схеме не была предусмотрена защита от выброса жидкости. Для восстановления работоспособности системы была разработана и использована методика просушки воздушных трактов, но ВН-2 пришлось заменить на новый. Чтобы избежать повторения подобной ситуации, на вход ВН-2 был подключен фильтр парогазовой смеси (ПГС) для улавливания капельной жидкости (ранее был доставлен на станцию для установки в магистраль внешнего вакуума).

В этом же году экипаж столкнулся с НшС в работе системы, связанными с выходом из строя подшипника дистиллятора и дважды с выходом из строя ВН-1.

Отказы насосов мембранного типа ВН-1 и последующая их замена происходили на протяжении всего эксперимента (~1 раз в полгода). Выяснилось, что в вакуумную магистраль в процессе дистилляции попадают несконденсированные пары воды. В результате воздействия влаги клапаны насоса перестают обеспечивать герметичность, что в итоге ведет к снижению производительности насосов с последующим отказом системы.

В 2023 году с СРВ-У-РС регулярно выполнялись только профилактические работы.

Результаты работы СРВ-У-РС по основным периодам эксплуатации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты работы СРВ-У-РС

Период	Выполнявшиеся работы	Переработано урины, л	Получено воды из урины, л	Ср. коэффициент извлечения, %
17.04. – 25.04.2018	Монтаж, заправка, тестовые включения	0	0	–
26.04. – 04.05.2018	Регулярные дистилляции урины	24,3	18,5	76

Окончание табл. 2

Период	Выполнявшиеся работы	Переработано урины, л	Получено воды из урины, л	Ср. коэффициент извлечения, %
15.05. – 27.09.2018	Промывки контура циркуляции урины, восстановление работоспособности, тестовые дистилляции воды и урины	13,6	7,3	54
05.10. – 24.12.2018	Отказ ЦМВД, поиск неисправности	0	0	–
21.03. – 08.05.2019	Замена блока дистилляции, дооснащение системы, заправки, тестовые включения	0	0	–
06.06. – 15.10.2019	Регулярные дистилляции урины	139,8	96,8	69
18.10. – 24.12.2019	Прекращение подпитки уриной. Профилактические операции. Перемешивание для поддержания работоспособности системы	0	0	–
26.12.2019 – 24.01.2020	Восстановление работоспособности в части подпитки уриной	0	0	–
25.01. – 12.03.2020	Регулярные дистилляции урины	43	30,6	71
13.03. – 1.09.2020	Отказ ЦМВД (заклинивание ротора), работы по анализу причин неисправности, восстановление работоспособности	0	0	–
09.09. – 18.10.2020	Регулярные дистилляции урины	61,4	48,9	72–84 (средний 80)
21.10.2020 – 11.04.2021	Отказ ЦМВД (заклинивание ротора)	–	–	–
28.07.2021	Ремонт ЦМВД, замена подшипника. Замена БД и БЕ	<6	<5	–
29.07.2021 – 23.03.2022	Выход из строя ВН с последующей заменой	<6	<5	–
24.03.2022 – 12.04.2022	Низкая производительность по конденсату. Восстановительные работы	–	–	–
13.04.2022 – 17.06.2022	Выброс урины с консервантом при вакуумировании ЦМВД с помощью ВН-2. Сушка шлангов, насосов, ресивера	–	–	–
18.06.2022 – 28.07.2022	Отказ ВН-1 с последующей заменой	–	–	–
29.07.2022 – 27.09.2022	Отказ ЦМВД. Выход из строя подшипника ЦМВД	–	–	–
28.09.2022 – 25.10.2022	Замена подшипника ЦМВД	6	5	–
26.10.2022 – 15.11.2022	Отказ ВН-1	–	–	–
2023	Профилактические работы	–	–	–
ИТОГО (в том числе за периоды дистилляций)		288,1	207,1	72

На фотографии космонавт О. Артемьев, производит регламентные работы в рамках эксперимента «Сепарация».



Для поддержания работоспособности системы разработаны и при необходимости используются методики профилактической продувки трактов блока вакуумирования, ВН, Е-Р и методики их замены. Откорректировано программное обеспечение пульта управления системы. Разработаны и успешно используются методики проведения дополнительных ручных операций имитации показания датчиков, включения/отключения блокировок. Специалистами АО «НИИхиммаш» прорабатывается возможность замены мембранных насосов блока вакуумирования на более надежные насосы спирального типа, либо установка в системе осушительных патронов с силикагелем для защиты вакуумных насосов от воздействия влаги.

Конструкцией системы предусмотрена возможность использования забортного вакуума для создания и поддержания рабочего давления в дистилляторе. При такой схеме вакуумирования снизятся затраты электроэнергии, увеличится ресурс и надежность системы за счет уменьшения количества блоков. Режим дистилляции будет проводиться при пониженном постоянном остаточном давлении в дистилляторе, что повысит производительность системы. При подключении системы к забортному вакууму будут исключены из работы ВН, что должно способствовать повышению надежности системы в целом.

Также совершенно очевидно, что необходима доработка узлов подшипников дистиллятора для предотвращения попадания в них урины с консервантом, что приводит к их заклиниванию.

В то же время многие разработанные и примененные в научной аппаратуре СРВ-У-РС компоненты – пульт управления (ПУ) СРВ-У-РС, датчиковая аппаратура, клапаны – показали высокую надежность (ни одного отказа), эффективность и правильность схемных и аппаратных решений. ПУ системы

обеспечивает автоматическое и ручное управление системой, возможность замены алгоритма управления в полете, а также постоянную запись всех данных по функционированию системы и выдаваемым командам в лог-файл, передаваемый на Землю для анализа каждого сеанса работы (от момента включения ПУ до его отключения). Космонавты отмечают «дружелюбный» интерфейс ПУ системы, простоту и удобство использования форматов.

В 2021 году состоялся запуск МЛМ «Наука», на борту которого установлена СРВ-УМ.

Принцип работы СРВ-УМ, положенный также в основу СРВ-У-РС – вакуумная дистилляция в ЦМВД. Однако конструктивно системы отличаются кардинально. Урина в емкости подпитки системы СРВ-УМ подается напрямую из установленной в модуле системы АСУ-СПК-УМ, а из емкости с полученным в ходе дистилляции конденсатом можно подпитывать емкость для смывной воды той же АСУ-СПК-УМ, ЕВ системы получения кислорода путем электролиза «Электрон-ВМ» или подавать в кабину АСУ для проведения гигиенических процедур. Но поскольку концепция СРВ-УМ создавалась до введения на РС МКС обязательной сепарации воды от воздуха для систем АСУ-СПК-УМ и «Электрона-ВМ», в схеме СРВ-УМ не предполагается сепарация воды от пузырей воздуха. Поэтому, скорее всего, полуавтоматическая подача воды в АСУ и «Электрон-ВМ» конструктивно предусмотренная в системе СРВ-УМ, сведется к снятию заполненной емкости с дистиллятом с последующей сепарацией воды от пузырей воздуха и установкой емкостей с отсепарированным от воздуха конденсатом в АСУ и «Электрон-ВМ». Следует также отметить, что СРВ-У на МИМ1 обладает лучшими характеристиками по сравнению с СРВ-УМ по весу, объему и производительности (табл. 3). Также следует отметить, что поскольку СРВ-УМ является прототипом системы СРВ-У-РС, то с большой вероятностью можно ожидать возникновения отказов ВН и заклинивания подшипников ротора дистиллятора, полностью аналогичных, установленным в СРВ-У-РС.

Таблица 3

Расчетные показатели СРВ-У-РС и СРВ-УМ
при использовании блока вакуумирования и забортного вакуума

Параметры	СРВ-У-РС для МИМ1		СРВ-УМ для МЛМ
	С вакуумными насосами	С забортным вакуумом	С вакуумными насосами
Установленная масса (без емкостей и ПУ), кг	130	100	195
Производительность по конденсату средняя, л/час	3,3	3,6	2,6
Объемный коэффициент извлечения воды, %	85–87		85–87
Энергопотребление, Вт:			
– при работе	370	350	400
– среднесуточное	25	22	30
– удельное, Вт-ч/л	120	110	170

На данный момент (с сентября 2022 по 2024 г.) дистилляция в СРВ-УМ еще не выполнялась по причине выявления при тестовых проверках на орбите негерметичности системы. На данный момент проводится последовательный поиск негерметичности в блоках системы.

Обратимся к особенностям подготовки космонавтов по эксплуатации этих систем.

Первое, с чем пришлось столкнуться при подготовке космонавтов, это проблемы с созданием курса лекций по системам. В процессе испытаний СРВ-У-РС дорабатываются алгоритмы работы системы, форматы экранов ПУ, что влечет постоянную корректировку учебных материалов.

Вторым нюансом при подготовке космонавтов к работе с СРВ-У-РС и СРВ-УМ являются отличия в алгоритмах автоматического управления, логике управления и форматах, отображаемых на экране пультов управления этих систем. СРВ-У-РС является модернизацией СРВ-УМ и форматы СРВ-У-РС более просты и логичны в эксплуатации. При наличии на борту двух систем одинакового функционального назначения различия в логике их управления ведет к повышению вероятности возникновения ошибочных действий со стороны экипажа в процессе работы. Поэтому практика работы с двумя видами форматов является необходимым элементом подготовки.

К сожалению, в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» на комплексном тренажере РС МКС отсутствуют полунатурные модели СРВ-У-РС и СРВ-УМ, где можно было бы формировать навыки работы с системами. Практические занятия с космонавтами на сегодняшний день проводятся на комплексном стенде в РКК «Энергия» только по СРВ-УМ. При этом реальная работа с пультами во время проведения практического занятия на комплексном стенде не предусмотрена [2].

Выходом из ситуации по подготовке к работе с пультами может быть создание виртуальной модели ПУ СРВ-У-РС и СРВ-УМ. Отработку операций по замене емкостей, коммутации разъемов, подготовке систем к работе возможно реализовать оснащением МИМ1 и МЛМ на комплексном тренажере РС МКС габаритно-весовыми макетами СРВ-У-РС, СРВ-УМ.

Выводы

1. Регенерация воды из урины способна на 30 % удовлетворить общую суточную потребность членов экипажа в воде (питье, обводнение сублимированных продуктов питания, личная гигиена, смывная вода для туалета, вода на получение кислорода методом электролиза). Поэтому регенерация воды из урины – перспективное направление для получения воды в рамках долгосрочных полетов к другим планетам.

2. Одним из факторов, ставших причиной отказов в работе системы, является появление в составе урины кальция, вымываемого из костной массы космонавта под действием невесомости, и образование взвеси при

длительном хранении урины. При разработке системы данный фактор не был учтен в полной мере.

3. В процессе эксперимента «Сепарация» выявлено, что использующиеся в системах ВН для вакуумирования дистиллятора не предназначены для работы с парами воды, образующимися в процессе дистилляции в условиях невесомости. Для улучшения характеристик системы по объему, весу и производительности, а также исключения регулярной замены ВН оптимальным решением станет использование забортного вакуума вместо блока вакуумирования, либо планируемая установка блока осушки, что является полумерой.

4. В перспективной российской орбитальной станции целесообразнее учесть опыт эксплуатации СРВ-У-РС, т. к. СРВ-УМ уступает ей по своим характеристикам и удобству работы с форматами ПУ.

5. В процессе эксперимента выяснилось, что полученный конденсат имеет сильный запах урины, что для реализации идеи подачи получаемого конденсата в СРВ-УМ в кабину АСУ для гигиенических процедур совершенно неприемлемо.

6. В СРВ-УМ не предусмотрена автоматическая сепарация полученного конденсата от пузырей воздуха, что не позволяет реализовать заложенную в системе схему непосредственной подачи полученного конденсата в качестве смывной воды в АСУ-СПК-УМ и в «Электрон-ВМ», предусматривающих обязательную сепарацию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций / Л.С. Бобе, Н.М. Самсонов, В.М. Новиков, А.А. Кочетков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 1. – С. 69–78.
- [2] Дедков, Д.К. Особенности подготовки космонавтов к эксплуатации систем регенерации воды из урины / Д.К. Дедков, В.С. Леговина // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Звездный городок, 2021. – С. 80–84.
- [3] Перспективы разработки средств обеспечения пилотируемых космических станций восстановленной водой / Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, С.Ю. Романов, П.О. Андрейчук [и др.] // Пилотируемые космические полеты. – 2014. – № 2(11). – С. 51–60.
- [4] Пояснительная записка «Выбор и обоснование наклона и высоты рабочей орбиты ОК РОС с учетом решения суверенных задач РФ, выполнения перспективных научно-технических и прикладных программ». Часть первая. – Королёв: ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», 2022 г. – С. 408.
- [5] Тощева, А.А. Итоги эксплуатации системы регенерации воды из урины на Международной космической станции / А.А. Тощева, Д.К. Дедков // Материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 2. – Калуга: Эйдос, 2022. – С. 234–238.
- [6] Водообеспечение при длительных космических полетах на основе физико-химических процессов регенерации воды / П.О. Андрейчук, С.Ю. Романов,

- А.Г. Железняков, Л.С. Бобе [и др.] // 49-я Международная конференция по системам среды обитания ICES-2019-152, 7–11 июля 2019, Бостон, Массачусетс. – С. 1–12.
- [7] Применение центробежной вакуумной дистилляции для регенерации воды из урины и санитарно-гигиенической воды на космической станции / П.О. Андрейчук, Д.В. Аракчеев, Л.С. Бобе, А.Г. Железняков [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 4(31). – С. 21–31.

REFERENCES

- [1] Prospects for the Development of Water Regeneration Systems for Manned Space Stations / L.S. Bobe, N.M. Samsonov, V.M. Novikov, A.A. Kochetkov [et al.] // News of the RAS. Energy. – 2009. – No 1. – P. 69–78.
- [2] Dedkov, D.K. Features of Training Astronauts to Operate Water Regeneration Systems from Urine / D.K. Dedkov, V.S. Legovina // Manned Spaceflight. Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference. – Star City, 2021. – P. 80–84.
- [3] Prospects for Developing the Water Regeneration System for Piloted Space Stations / L.S. Bobe, A.A. Kochetkov, S.Yu. Romanov, P.O. Andreychuk [et al.] // Manned Spaceflight. – 2014. – No 2(11). – P. 51–60.
- [4] Explanatory Note: “Selection and Substantiation of the Inclination and Altitude of the Working Orbit of ROS Orbital Complex, Taking into Account the Solution of Sovereign Tasks of the Russian Federation, the Implementation of Promising Scientific, Technical and Applied Programs”. Part 1. – Korolev: PAO RSC “Energiya”, 2022. – P. 408.
- [5] Toscheva, A.A. Results of Operation of the Water Regeneration System from Urine of the International Space Station / A.A. Toscheva, D.K. Dedkov // Proceedings of the 57th Scientific Readings, Dedicated to the Development of the Scientific Heritage and Ideas of K.E. Tsiolkovsky. Part 2. – Kaluga: Eidos, 2022. – С. 234–238.
- [6] Water Supply for Long-Term Space Flights Based on Physical and Chemical Processes of Water Regeneration / P.O. Andreychuk, S.Yu. Romanov, A.G. Zheleznyakov, L.S. Bobe [et al.] // 49th International Conference on Habitat Systems ICES-2019-152, July 7–11, 2019, Boston, Massachusetts. – P. 1–12.
- [7] Application of Centrifugal Vacuum Distillation for the Regeneration of Water from Urine and Sanitary Water on the Space Station / P.O. Andreychuk, D.V. Arakcheev, L.S. Bobe, A.G. Zheleznyakov [et al.] // Space Technology and Technology. – 2020. – No 4(31). – P. 21–31.