

УДК 629.7.06

ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОССИЙСКОГО И АМЕРИКАНСКОГО СЕГМЕНТОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Д.А. Петелин, А.Е. Белявский

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации, космонавт-испытатель отряда космонавтов ГК «Роскосмос» Д.А. Петелин (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина») Докт. техн. наук, доц. А.Е. Белявский (МАИ)

В данной статье проводится сравнение и оценка систем обеспечения жизнедеятельности (СОЖ) российского и американского сегментов Международной космической станции (РС и АС МКС). Представлено сравнение характеристик систем регенерации воды РС и АС МКС по габаритам, массе и энергопотреблению. Рассмотрены особенности эксплуатации СОЖ РС МКС. Сформулированы требования к подготовке космонавтов по СОЖ и наземному комплексу тренажерной составляющей СОЖ.

Ключевые слова: обеспечение жизнедеятельности, регенерация кислорода, регенерация воды, утилизация углекислого газа

Approaches to the Implementation of Life Support Systems in the ISS RS and USOS. D.A. Petelin, A.E. Belyavsky

The paper analyzes and evaluates the Life Support Systems in the Russian (COЖ) and American segments (ECLSS) of the International space station (ISS RS and USOS). It also compares the characteristics of water regeneration systems on board the ISS RS and USOS in terms of size, mass and power consumption. The features of operation of the ISS RS life support systems are considered. The requirements for cosmonaut training on life support systems and on-ground simulation complex have been formulated.

Keywords: life support, oxygen regeneration, water regeneration, carbon dioxide utilization

Актуальность темы исследования обусловлена планируемым развертыванием долговременной орбитальной станции РОС, разработке транспортного корабля «Орел» и лунной исследовательской программы в соответствии с целями и задачами, изложенными в Стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. Разработка и развертывание модулей новой орбитальной станции подразумевает ее наполнение системами жизнеобеспечения с улучшенными характеристиками.

СОЖ являются одними из важнейших систем пилотируемых космических аппаратов (ПКА). В задачу СОЖ входит восстановление свойств

и состава среды, обеспечение массообмена экипажа со средой. Поскольку от работы СОЖ зависит работоспособность и поддержание жизнедеятельности экипажа, к СОЖ предъявляются особые требования по обеспечению эффективности и надежности работы. Неотъемлемой частью конструктивного решения комплекса СОЖ является наземный блок тренажерного оборудования, целью которого является практическое обучение и отработка космонавтами навыков и умений эксплуатации и ремонта СОЖ ПКА.

В течение первых десяти лет пилотируемых полетов СОЖ представляла собой систему, использующую запас расходуемых компонентов среды обитания. На орбитальных станциях «Салют» первого поколения использовались регенеративные патроны для удаления диоксида углерода и обеспечения кислородом экипажа. На станциях «Салют-4, -6, -7» была установлена и прошла проверку эксплуатацией система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К).

В дальнейшем СОЖ проходила развитие и модернизацию в процессе строительства и эксплуатации станции «Мир». На базовом модуле была смонтирована СРВ-К2. На модуле «Квант» была установлена система очистки атмосферы от диоксида углерода «Воздух» и блок очистки от вредных микропримесей (БМП). На модуле «Квант-2» были реализованы системы регенерации воды из урины (СРВ-У) и санитарно-гигиенической воды (СРВ-СГ), были установлены системы получения кислорода «Электрон-В» и «Вика».

На РС МКС происходило дальнейшее развитие СОЖ. В ее структуру вошли модернизированные системы очистки атмосферы «Воздух» и БМП, прошли усовершенствование СРВ-К2М и СРВ-У-РС и СРВ-УМ, а также система электролиза воды «Электрон-ВМ» для генерации кислорода.

На АС МКС установлена система генерации кислорода путем электролиза воды с твердым полимерным электролитом. Для удаления углекислого газа используется система Carbon Dioxide Reduction Assembly (CDRA). Система является единственным на МКС средством, которое концентрирует углекислый газ до параметров, позволяющих проводить реакцию Сабатье. Регенерация воды из конденсата атмосферной влаги, дистиллята урины и воды из реактора Сабатье осуществляется в процессоре получения питьевой воды Water Processor Assembly (WPA). С ноября 2008 г. в составе АС МКС работает система регенерации воды из урины Urine Processor Assembly (UPA), основанная на технологии вакуумной дистилляции в одноступенчатом центробежном дистилляторе с встроенным парокompрессором.

СОЖ РС МКС

С увеличением длительности и автономности космических полетов бортовое обслуживание СОЖ с продлением ресурса работы приобретает решающее значение. При этом возникают новые задачи при подготовке космонавтов

на наземном комплексе тренажеров СОЖ – тренажерном оборудовании, учитывающие особенности разработанных и перспективных СОЖ [1].

На данный момент на РС МКС, как и на всей станции в целом, реализован принцип «на запасах» с элементами регенерации некоторых ресурсов на основе методов физической химии. В СОЖ МКС входят следующие средства: средства обеспечения газового состава (СОГС), средства водообеспечения (СВО), средства санитарно-гигиенического обеспечения (ССГО), средства обеспечения питанием (СОП), средства индивидуальной защиты (СИЗ).

Система кислородообеспечения представлена модернизированной системой «Электрон-ВМ». В результате модернизации производительность системы возросла вдвое, а управление и контроль частично возложены на бортовую вычислительную систему [2]. Модернизация системы «Электрон-ВМ» за 21-летний период работы экипажей на борту МКС шла по двум направлениям: с одной стороны, совершенствование алгоритма работы, предварительная подготовка воды для получения кислорода, ввод дополнительных датчиков для контроля работоспособности системы и обеспечения безопасности ее функционирования, а с другой стороны, деградация системы, повышающая надежность ее безотказной работы [2]. Так упростили схему подпитки системы водой, отказались от использования автоматического режима работы системы и автоматической продувки при ее консервировании, ввели обязательную предварительную сепарацию воды от воздуха и т. д. Эти изменения привели к увеличению количества операций, выполняемых космонавтами, что непосредственно сказалось и на подготовке космонавтов. Добавились ручные операции, отработка процедуры сепарации воды от воздуха, визуальный контроль аэрозольных фильтров.

Не менее важной задачей при формировании атмосферы МКС является удаление углекислого газа, выделяемого при дыхании членами экипажа. Принцип действия системы очистки атмосферы «Воздух» – адсорбция углекислого газа с последующей вакуумной регенерацией поглотителя. В настоящее время на РС МКС углекислый газ выбрасывается за борт. В НИИхиммаш в течение последних десятилетий разрабатывается система переработки углекислого газа и водорода на основе реактора Сабатье, на выходе из которого получают воду и метан. Вода идет на получение кислорода, а метан может использоваться в качестве топлива для двигателей коррекции. В настоящее время система не доведена до состояния готовности. На АС МКС нашими партнерами проводились испытания реактора Сабатье (около трех лет), выявившие ряд его недоработок.

На РС МКС в настоящее время эксплуатируется система очистки атмосферы от вредных газообразных микропримесей – БМП [3–5]. Принцип действия системы БМП основан на адсорбции микропримесей с последующей термовакуумной регенерацией поглотителя.

Следующей задачей СОЖ является обеспечение экипажа водой. По результатам эксплуатации ОС «Мир» и МКС общие потребности экипажа

в воде с учетом получения кислорода путем электролиза воды и необходимости использования смывной воды при приеме урины в физико-химическом регенерационном комплексе жизнеобеспечения составляют 4,2 л/чел. сут.

Вода необходима для подготовки рациона питания, потребления в чистом виде и различных напитках, для санитарно-гигиенических процедур, в качестве смывной воды при пользовании ассенизационно-санитарного устройства (АСУ), для получения кислорода. На орбитальной станции имеются три источника воды: на запасах (доставляемая с Земли) и вода, регенерируемая из конденсата атмосферной влаги и урины [6].

Полученный конденсат атмосферной влаги в условиях орбитальной космической станции обеспечивает экипаж водой на 35 % (1,5 л/чел. сут) [7]. Выделяемая человеком урина является вторым по содержанию воды видом регенерируемых отходов жизнедеятельности, регенерация которой обеспечивает 30 % потребностей в воде (1,3 л/чел. сут). В данное время на РС МКС установлены системы: СРВ-К2М, СРВ-У-РС и СРВ-УМ [8, 9].

Наземный комплекс тренажерного оборудования СОЖ предназначен для формирования знаний, навыков и умений по техническому обслуживанию систем жизнеобеспечения. На борту на эти процедуры каждые сутки экипажу выделяется до 40 минут рабочего времени. К ним относится перекачка воды из запасов в расходные емкости, замена емкостей с уриной, смывной водой, консервантом, контейнеров с твердыми отходами. Подготовка космонавтов включает теоретические занятия с обязательным продолжением практических занятий с использованием реального оборудования и бортового инструмента и завершается серией тренировок на комплексном тренажере РС МКС в составе экипажа.

СОЖ АС МКС

Технические решения и физические принципы формирования среды обитания обуславливают структуру и средства СОЖ АС МКС. Имея сходную задачу с российской СОЖ – формирование требуемой среды обитания с учетом взаимосвязи с экипажем, окружающей средой, другими системами станции в условиях комплексного воздействия экстремальных факторов, СОЖ АС имеет ряд отличий в организации процессов и техническом исполнении системы [10–12].

На данный момент технические решения и физические принципы формирования среды обитания обуславливают структуру и средства СОЖ АС МКС, который успешно функционирует на протяжении более 25 лет, обеспечивая наилучшие данные для апробации систем СОЖ в условиях микрогравитации в интересах длительных полетов за пределы земной орбиты [13].

На АС МКС эксплуатируется система генерации кислорода на основе электролизера с твердым полимерным электролитом. Данные электролизеры относятся к электролизерам с кислотным электролитом [14]. В качестве электролита применяется пленка полисульфонной протонообменной мембраны

(Nafion, МФ-4СК и др.), замоченная деионизированной водой. В системе идет циркуляция воды только через катодную проточную камеру электролизных ячеек электролизера с последующим разделением газожидкостной смеси (водород–вода) в центробежном разделителе – аккумуляторе. Несмотря на внедрение более современной технологии генерации кислорода на твердом электролите, американская система имеет ряд недостатков в сравнении с российской системой «Электрон» – это высокие требования к химической чистоте воды, а также невозможность полного снятия питания с электролизера даже в отключенном состоянии.

Для удаления диоксида углерода на АС МКС используется система CDRA. Система работает следующим образом. Исходный воздух из кабины поступает в осушитель за счет разрежения, создаваемого воздуходувкой. В осушителе содержащаяся в воздухе влага адсорбируется на силикагеле и цеолите. После воздуходувки воздух, подогретый за счет теплоты адсорбции влаги и сжатия в воздуходувке, проходит через предварительный охладитель, в котором воздух охлаждается и поступает в адсорбер поглощения диоксида углерода. Выходящий из адсорбера воздух, дополнительно осушенный поглотителем адсорбера, направляется в осушитель. Российская система «Воздух» имеет более гибкие регулировки циклов, а также преимущество в количестве патронов (3 против 2 на АС МКС).

В качестве системы очистки атмосферы от микропримесей на АС МКС используется модуль Trace Contaminant Control System (ТССС). Здесь применяется комбинация кассет активированного угля с блоком термokatалитического окисления. Продукты окисления в дальнейшем абсорбируются гидроксидом лития. Система имеет более высокие характеристики в сравнении с российским аналогом, но требует более частой замены патронов.

Регенерация воды из конденсата атмосферной влаги, дистиллята урины и воды из реактора Сабатье на АС МКС осуществляется в WPA. Процессор работает следующим образом. В бак загрязненной воды системы поступают потоки жидкости, отделенной от газа в смежных системах: конденсат атмосферной влаги – из системы сбора конденсата лабораторного модуля US Lab; дистиллят урины – из уринового процессора UPA; вода после разложения диоксида углерода – из реактора Сабатье. Процесс регенерации урины в UPA основан на технологии вакуумной дистилляции в одноступенчатом центробежном дистилляторе со встроенным парокompрессором, обеспечивающим рекуперацию теплоты конденсации для испарения. Урина поступает в систему, отделяется от транспортирующего воздуха, консервируется в системе Waste and Hygiene Compartment (WHC) и подается в UPA. Образующийся дистиллят подается на доочистку в систему WPA [15–17].

Предлагаемые НАСА полеты за пределы низкой околоземной орбиты создадут новые вызовы в области обслуживания и ремонтпригодности систем СОЖ, которые необходимо будет учитывать при разработке СОЖ нового поколения [18].

Направление развития российской СОЖ

Сложность обеспечения жизнедеятельности экипажа в долговременном космическом полете усугубляется ограниченным объемом герметически замкнутого пространства обитаемых отсеков, необходимостью обеспечения интенсивности процессов регенерации воды и кислорода во много раз более высокой, чем это имеет место на земле, и их реализацией в условиях невесомости [19, 20].

При проектировании российских СОЖ необходимо учитывать возможности российских модулей и средств доставки. К СОЖ предъявляются требования по минимизации габаритов, массы и энергопотребления. Для систем АС МКС эти требования гораздо менее актуальны. Это отличие сохраняется и усугубляется в перспективных разработках. В табл. приведено для примера сравнение характеристик систем регенерации воды РС и АС.

Сравнительные характеристики систем регенерации воды на РС и АС МКС

Параметры \ Система	СРВ-К2М	WPA	UPA	СРВ-У-РС (летная отработка)	СРВ-УМ (МЛМ) (отработка)
Масса первоначально установленной системы, кг	115	625	350	128	195
Удельные затраты массы, кг/кг H ₂ O	0,08	–	–	0,07	0,1
Среднесуточное энергопотребление для 3 чел.:					
– прием и регенерация, Вт	0,4	168	88	40	30
– прием, регенерация, нагрев, Вт	30	454	–	–	–
Удельное энергопотребление для приема и регенерации, Вт·ч/л H ₂ O	2	490	620	140	170
Производительность (максимальная), л/ч	1,2	2	1,4	3,3	2,6

Как видно, российские системы имеют меньшие габариты, массу и энергопотребление. Отсюда вытекают особенности их эксплуатации.

Особенностями эксплуатации российских СЖО являются:

- большее количество ручных операций;
- более частая (по сравнению с АС МКС) замена блоков и агрегатов;
- ремонтпригодность аппаратуры и систем.

В качестве примеров приведем эксплуатационные работы по российским СОЖ МКС в период экспедиции МКС-68/69.

1. Ручные операции:

- замена емкостей для воды (ЕДВ) для АСУ, СРВ-К2М, «Электрон-ВМ»;
- замена блоков колонок очистки (БКО), блоков продувки азотом в системе «Электрон-ВМ»;
- периодическое отключение системы «Воздух» и включение ее в заданный режим;

- перевод БМП в режим регенерации и обратно в режим очистки атмосферы;

- сепарация воды для системы «Электрон-ВМ» при помощи насоса-сепаратора конденсата и воды (НС-КВ).

2. Замена блоков и агрегатов:

- АСУ – замена емкости с консервантом (ЕК), замена электронного блока управления ДКиВ (ввиду неисправности), замена шланга-мочеприемника (МП), замена емкости с уриной (ЕДВ-У) и контейнера твердых отходов (КТО);

- «Воздух» – замена блока вакуумных клапанов (БВК);

- СРВ-К2М – замена БКО, частая замена емкости для воды (ЕДВ-РП).

3. Реализация ремонтпригодности аппаратуры:

- «Воздух» – поиск неисправности проводки (КЗ) с прозвонкой разъемов кабелей и заменой поврежденного кабеля;

- АСУ – проблема с подачей консерванта (поиск причины: некачественный консервант либо неисправный ДКиВ), выход из строя малогабаритного насоса-разделителя МНР-9 (замена блока целиком);

- СРВ-К2М – имеется возможность оперативного переключения между агрегатами – встроено два насоса подачи воды в БРП-М.

Из особенностей эксплуатации вытекают требования к подготовке космонавтов по СОЖ и тренажерной составляющей системы:

- получение физических навыков по работе с блоками и аппаратурой систем;

- навыки по ремонту аппаратуры;

- создание тренажеров систем, действующих на физических принципах, по типу стендов сопровождения летной эксплуатации у разработчиков.

Требования к разработчикам:

- снижение ручных операций за счет объединения технологических процессов транспортирования, хранения, переработки и выдачи на потребление в одно замкнутое кольцо (в частности, для систем водообеспечения);

- повышение степени автоматизации;

- увеличение эффективности аппаратуры за счет совершенствования процессов регенерации и снижения массы расходуемых веществ (сорбенты, консервант и др.);

- увеличение ресурса аппаратуры за счет повышения надежности и ресурса работы ее составных элементов.

Выводы

В статье представлено описание СОЖ РС и АС МКС, позволившее сформулировать нижеследующие выводы. При проектировании перспективных российских СОЖ необходимо учитывать возможности российских модулей и средств доставки, предъявляющие требования по минимизации габаритов, массы и энергопотребления.

Исходя из особенностей эксплуатации российских СОЖ, сформулированы требования к подготовке космонавтов по СОЖ и тренажной составляющей системы:

- получение реальных навыков работы с блоками и аппаратурой систем;
- развитие навыков по ремонту и техническому обслуживанию аппаратуры;
- создание тренажерных стендов на основе летных образцов (типа стендов сопровождения летной эксплуатации). Например сейчас, ввиду отсутствия тренажерной базы в ЦПК, подготовка по системам СРВ-У ведется на предприятиях-производителях, что сокращает количество часов подготовки и в конечном итоге сказывается на ее качестве.

Требования к разработчикам:

- повышение степени автоматизации с уменьшением количества ручных операций;
- повышение эффективности работы систем за счет совершенствования процессов регенерации и снижения массы расходуемых веществ (сорбенты, консервант и др.);
- увеличение ресурса аппаратуры за счет повышения надежности и ресурса составных элементов системы.

Новизна полученных в данной работе результатов обусловлена сравнением подходов, применяемых при проектировании существующих системах жизнеобеспечения регенеративного типа РС и АС МКС.

Представленные требования являются актуальными для совершенствования систем регенерации газовой среды обитаемых отсеков и систем регенерации водных сред для СЖО космонавтов на основе оптимального выбора технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Проектирование стенда-тренажера для подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений / Н.В. Васильева, Е.В. Дедкова, И.В. Кутник, В.Е. Фокин [и др.] // Вестник МАИ. – 2021. – № 1, Т. 28. – С. 115–125.
- [2] Прошкин, В.Ю. Анализ отключений системы генерации кислорода «Электрон-ВМ» на Международной космической станции // Пилотируемые полеты в космос. Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, 2021. – С. 72.
- [3] Creating an Atmosphere Within Spacecraft / L.B. Strogonova, A.E. Sorokin, Yu.A. Vasin, A.E. Belyavsky // Russian Engineering Research, 2019. – Vol. 39, Is. 9. – P. 813–815.
- [4] Шустров, Т.Л. Имитационное моделирование как обоснование выбора системы очистки от вредных примесей // Вестник МАИ. – 2019. – № 1, Т. 26. – С. 51–63.
- [5] Общая схема автоматизированного медицинского контроля в СППР жизнеобеспечения длительных космических полетов / А.И. Бродский, Д.Б. Новиков, С.Н. Падалко, Л.Б. Строгонова // Вестник МАИ. – 2010. – № 2, Т. 17. – С. 7.

- [6] Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций / Н.М. Самсонов, Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, А.А. Кочетков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 1. – С. 61–68.
- [7] Сальников, Н.А. Применение низконапорного обратного осмоса для организации оборотного водоснабжения / Н.А. Сальников, Н.Е. Николайкина, Л.С. Бобе // Экология и промышленность России. – 2021. – № 4, Т. 25. – С. 14–20.
- [8] Прием и консервация урины на МКС: статус и перспективы / Н.А. Сальников, Л.С. Бобе, Н.В. Рыхлов, С.Н. Рукавицин [и др.] // Авиация и космонавтика. Тезисы 21-й Международной конференции. – Москва: МАИ, 2022. – С. 349–350.
- [9] Тепломассоперенос, сепарация и рекуперация тепловой энергии в системе регенерации воды из урины на МКС / Л.С. Бобе, Д.В. Аракчеев, А.А. Кочетков, П.О. Андрейчук // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-й Международной конференции. – Москва, 2020. – С. 373–374.
- [10] Оработка средств обеспечения газового состава и водообеспечения комплексов систем жизнеобеспечения межпланетных экспедиций на основе систем жизнеобеспечения российского и американского сегментов МКС / А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов, В.А. Бутрин [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 4(45). – С. 36–53.
- [11] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview / J. Lee Broyan, L. Shaw, M. McKinley, C. Meyer [et al.] // 50th International Conference on Environmental Systems, 12–15 July 2021. – Lisbon, Portugal. – 12 p.
- [12] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2021 to 2022 Overview / James L. Broyan, Melissa McKinley, I. Stambaugh, Gary A. Ruff [et al.] // 51th International Conference on Environmental Systems, 10–14 July 2022. – St. Paul, Minnesota, USA. – 15 p.
- [13] Beyond LEO: Life Support Requirements and Technology Development Strategy / G. Gentry, P. Guirgis, M. Duggan, M. Heldmann [et al.] // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 14 p.
- [14] Jones, H.W. Life Support for Deep Space and Mars / H.W. Jones, E.W. Hodgson, M.H. Kliss // 44th International Conference on Environmental Systems, 3–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 15 p.
- [15] Efficient Evaluation Method of System Concepts for Preliminary ECLSS Design Studies / T. Binder, E. Nathanson, S. Belz, S. Fasoulas // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 9 p.
- [16] Henninger, D.L. Ground Testing for Development of Environmental Control and Life Support Systems for Long Duration Human Space Exploration Missions // 48th International Conference on Environmental Systems, 8–12 July 2018. – Albuquerque, New Mexico, USA. – 17 p.
- [17] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development and Maturation for Exploration: 2015 to 2016 Overview / W.F. Schneider, R.L. Gatens, M.S. Anderson, J.L. Broyan [et al.] // 46th International Conference on Environmental Systems, 10–14 July 2016. – Vienna, Austria. – 19 p.
- [18] Sargusingh, M.J. Environmental Control and Life Support System Reliability for Long-Duration Missions Beyond Lower Earth Orbit / M.J. Sargusingh, J.R. Nelson // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 6 p.

- [19] Кудрявцева, Н.С. Предварительный многокритериальный анализ структуры физико-химической системы жизнеобеспечения космического аппарата для полета в дальний космос / Н.С. Кудрявцева, А.Е. Сорокин // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2022. – Т. 56. – С. 95–101.
- [20] Бобе, Л.С. Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых космических полетов: предварительный анализ / Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, Э.А. Курмазенко // *Вестник МАИ*. – 2018. – № 1, Т. 15. – С. 4.

REFERENCES

- [1] Designing of a Simulator Stand for Training Cosmonauts to Perform Visual and Instrumental Observations / N.V. Vasilyeva, E.V. Dedkova, I.V. Kutnik, V.E. Fokin [et al.] // *Bulletin of MAI*. – 2021. – No 1, Vol. 28. – P. 115–125.
- [2] Proshkin, V.Yu. Analysis of Shutdowns of the Electron-VM oxygen Generation System on the International Space Station // *Manned Spaceflight. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, 2021*. – P. 72.
- [3] Creating an Atmosphere Within Spacecraft / L.B. Strogonova, A.E. Sorokin, Y.A. Vasin, A.E. Belyavsky // *Russian Engineering Research, 2019*. – Vol. 39, Is. 9. – P. 813–815.
- [4] Shustrov, T.L. Simulation Modeling as a Justification for Choosing a Purification System From Harmful Impurities // *Bulletin of MAI*. – 2019. – No 1, Vol. 26. – P. 51–63.
- [5] General Scheme of Automated Medical Control in the Life Support System for Long-Term Space Flights / A.I. Brodsky, D.B. Novikov, S.N. Padalko, L.B. Strogonova // *Bulletin of MAI*. – 2010. – No 2, Vol. 17. – P. 7.
- [6] Regeneration Life Support Systems for Space Station Crews / N.M. Samsonov, L.S. Bobe, L.I. Gavrilov, A.A. Kochetkov [et al.] // *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*. – 2009. – No 1. – P. 61–68.
- [7] Salnikov, N.A. Application of Low-Pressure Reverse Osmosis for Organizing Recycled Water Supply / N.A. Salnikov, N.E. Nikolaikina, L.S. Bobe // *Ecology and Industry of Russia*. – 2021. – No 4, Vol. 25. – P. 14–20.
- [8] Reception and Conservation of Urine on the ISS: Status and Prospects / N.A. Salnikov, L.S. Bobe, N.V. Rykhlov, S.N. Rukavitsin [et al.] // *Aviation and Astronautics. Abstracts of the 21st International Conference*. – Moscow: MAI, 2022. – P. 349–350.
- [9] Heat and Mass Transfer, Separation and Recovery of Thermal Energy in the System for Regenerating Water from Urine on the ISS / L.S. Bobe, D.V. Arakcheev, A.A. Kochetkov, P.O. Andreychuk // *19th International Conference “Aviation and Cosmonautics”*. Abstracts of the 19th International Conference. – Moscow, 2020. – P. 373–374.
- [10] Debugging of Atmospheric Revitalization and Water Supply Equipment for the Life Support Systems Complex Based on the Life Support Systems of the ISS Russian and US Segments in the Interests of Interplanetary Expeditions / A.S. Guzenberg, A.G. Zheleznyakov, S.Yu. Romanov, V.A. Butrin [et al.] // *Manned Spaceflight*. – 2022. – No 4(45). – P. 36–53.
- [11] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview / J.L. Broyan, L. Shaw, M. McKinley, C. Meyer [et al.] // *50th International Conference on Environmental Systems, 12–15 July 2021*. – Lisbon, Portugal. – 12 p.

- [12] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2021 to 2022 Overview / J.L. Broyan, Jr.M. McKinley, I. Stambaugh, G.A. Ruff [et al.] // 51th International Conference on Environmental Systems, 10–14 July 2022. – St. Paul, Minnesota, USA. – 15 p.
- [13] Beyond LEO: Life Support Requirements and Technology Development Strategy / G. Gentry, P. Guirgis, M. Duggan, M. Heldmann [et al.] // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 14 p.
- [14] Jones, H.W. Life Support for Deep Space and Mars / H.W. Jones, E.W. Hodgson, M.H. Kliss. // 44th International Conference on Environmental Systems, 3–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 15 p.
- [15] Efficient Evaluation Method of System Concepts for Preliminary ECLSS Design Studies / T. Binder, E. Nathanson, S. Belz, S. Fasoulas // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 9 p.
- [16] Henninger, D.L. Ground Testing for Development of Environmental Control and Life Support Systems for Long Duration Human Space Exploration Missions // 48th International Conference on Environmental Systems, 8–12 July 2018. – Albuquerque, New Mexico, USA. – 17 p.
- [17] NASA Environmental Control and Life Support Technology Development and Maturation for Exploration: 2015 to 2016 Overview / W.F. Schneider, R.L. Gatens, M.S. Anderson, J.L. Broyan [et al.] // 46th International Conference on Environmental Systems, 10–14 July 2016. – Vienna, Austria. – 19 p.
- [18] Sargusingh, M. J. Environmental Control and Life Support System Reliability for Long-Duration Missions Beyond Lower Earth Orbit / M.J. Sargusingh, J.R. Nelson // 44th International Conference on Environmental Systems, 13–17 July 2014. – Tucson, Arizona, USA. – 6 p.
- [19] Kudryavtseva, N.S. Preliminary Multi-Criteria Analysis of the Structure of the Physical and Chemical Life Support System of a Space Vehicle for Flight Into Deep Space / N.S. Kudryavtseva, A.E. Sorokin // Aerospace and Environmental Medicine. – 2022. – Vol. 56. – P. 95–101.
- [20] Bobe, L.S. Prospects for the Development of Regenerative Life Support Systems for Long-Term Manned Space Flights: Preliminary Analysis / L.S. Bobe, L.I. Gavrilov, E.A. Kurmazenko // Bulletin of MAI. – 2018. – No 1, Vol. 15. – P. 4.