

УДК 629.78.048

ПОПАДАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, С.Ю. Романов, А.В. Юргин,
А.А. Телегин, А.А. Бурлакова, А.М. Рябкин

Канд. техн. наук А.С. Гузенберг; канд. техн. наук А.Г. Железняков;
докт. техн. наук С.Ю. Романов; А.В. Юргин; А.А. Телегин;
канд. биол. наук А.А. Бурлакова; канд. техн. наук А.М. Рябкин
(ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва)

В статье рассмотрены вопросы обеспечения безопасности экипажа при выбросе токсичных веществ в атмосферу космических пилотируемых объектов при нештатных ситуациях, связанных с возгоранием и утечками при разгерметизации штатных бортовых систем и научного оборудования, содержащих вредные вещества. Приведен ряд случаев, имевших место при подготовке и осуществлении космических полетов, в том числе имевший место пожар на космической станции «Мир» и выброс вредных примесей из системы «Метокс» на МКС. В статье рассмотрена особая опасность токсичных выбросов при работе с научным оборудованием и приведены рекомендации по безопасности.

Ключевые слова: пилотируемые космические объекты, нештатные ситуации, безопасность экипажа, разгерметизация систем и научного оборудования, выброс токсичных веществ

Ingress of Toxic Substances into the Atmosphere of Manned Space Vehicles in Off-Nominal Situations. A.S. Guzenberg, A.G. Zheleznyakov, S.Yu. Romanov, A.V. Yurgin, A.A. Telegin, A.A. Burlakova, A.M. Ryabkin

The paper discusses the issues of ensuring the safety of crews when toxic substances ingress into the atmosphere of manned space vehicles as a result of off-nominal situations such as a fire and depressurization of the onboard systems and scientific equipment containing hazardous substances. A number of events occurred during training and also in space, including the fire aboard the “Mir” space station and the emission of harmful impurities from the Metox system into the ISS’s atmosphere are given. The paper addresses the particular dangerous toxic releases when handling scientific payloads and provides some safety recommendations.

Keywords: manned space vehicles, off-nominal situations, crew safety, depressurization of systems and scientific payloads, release of toxic substances

Источниками выделения токсичных газовых примесей (далее вредные примеси) в атмосферу пилотируемых космических объектов в *штатном режиме полета* является сам человек, неметаллическое оборудование (включая

упаковочное), научное оборудование, содержащее токсичные газы и токсичные испаряющиеся жидкости, предметы личной гигиены, медицинские средства.

Поддержание качества атмосферы по содержанию вредных химических примесей в атмосфере этих объектов обеспечивается системами удаления вредных примесей, входящими в состав систем жизнеобеспечения. Измерение содержания вредных примесей в атмосфере обеспечивается специальной аналитической аппаратурой.

Вредные примеси по токсичному действию на человека делятся на 4 группы. Чем более токсична примесь, тем меньшая ее концентрация допускается в атмосфере. Распределение на группы по значению ПДК следующее:

- менее 0,1 мг/м³ – очень токсичные;
- от 0,1 до 1 мг/м³ – токсичные;
- от 1 до 10 мг/м³ – малотоксичные;
- более 10 мг/м³ – слаботоксичные [1].

Особую опасность для экипажа представляют вредные примеси, попадающие в атмосферу при нештатных ситуациях в связи с термодеструкцией неметаллического оборудования при возгорании, а также при утечках в результате разгерметизации штатных бортовых систем и научного оборудования, содержащего вредные вещества. Это связано, прежде всего, с большим количеством вредных примесей, выделяемых в короткое время, что приводит к высоким местным концентрациям этих примесей. При пожаре к этому эффекту добавляется повышенная токсичность выделяющихся веществ. Еще одним источником в нештатных ситуациях является попадание в атмосферу модулей космической станции остатков токсичного топлива двигателей, твердый осадок которого может попасть на поверхность скафандра при выходе человека в забортное пространство. Перечень веществ приведен в табл. 1. Данные по степени воздействия вредных примесей приведены в табл. 2.

Таблица 1

Вещества для оценки качества атмосферы при нештатных ситуациях

| Вещество | Химическая формула | МДК _{рд} , мг/м ³ | | |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|------|------|
| | | 1 ч | 6 ч | 24 ч |
| Моноксид углерода | СО | 1500 | 600 | 230 |
| Формальдегид | СН ₂ О | 1,0 | 0,7 | 0,3 |
| Аммиак | NH ₃ | 210 | 105 | 21,0 |
| Оксиды азота | NO, NO ₂ | 30,0 | 20,0 | 10,0 |
| Хлористый водород | HCl | 10,0 | 7,0 | 3,0 |
| Фтористый водород | HF | 5,0 | 2,0 | 1,0 |
| Цианистый водород | HCN | 4,0 | 1,0 | 0,5 |

Примечание: МДК_{рд} – это максимально допустимая концентрация разового действия вредной примеси в атмосфере однократного воздействия, гарантирующая сохранение здоровья человека) [1].

Таблица 2

Виды и степени воздействия вредных примесей на организм

| Вид | Степень | Органы / Системы организма |
|--------------|---|---|
| Раздражающее | малая концентрация вещества длительность воздействия | 1) глаза 2) дыхательные пути 3) кожа 4) центральная нервная система (головная боль) 5) желудочно-кишечный тракт (тошнота, рвота) 6) внутренние органы (сердце, печень, почки, легкие) |
| Поражающее | большая концентрация вещества длительность воздействия | 1) зрение 2) дыхание 3) центральная нервная система (галлюцинации, потеря сознания) 4) желудочно-кишечный тракт 5) внутренние органы (сердце, печень, почки, легкие) 6) расстройство половой функции 7) изменение состава крови |

Токсичное вещество – вредная примесь – обычно воздействует сразу на несколько функций или органов человека, что, соответственно, вызывает комплекс различных симптомов отравления данным веществом. Таким образом альдегиды, обладая сильным раздражающим воздействием, являются также канцерогенами, метанол вызывает головную боль и зрительные расстройства, ароматические углеводороды (бензол, ксилол, толуол) вызывают раздражение и действуют на центральную нервную систему и т.д. Особо опасные вещества, характерные для пожара:

- CO (воздействует на центральную нервную систему и сердце);
- HCN (вызывает тканевую гипоксию – кислородное голодание, в результате нарушаются функции головного мозга и дыхательного центра);
- HF (воздействие на сердечно-сосудистую, дыхательную и выделительные системы);
- HCl (воздействие на слизистые оболочки);
- окислы азота (воздействие на дыхательную систему и зрение) [2–4].

Выбросы вредных примесей на первоначальном этапе космических полетов

При подготовке и проведении первых космических полетов имели место случаи интоксикации экипажа.

В 1963 году имело место отравление экипажа во время наземной отработки НАСА объединенной системы регенерации атмосферы. В состав этой системы входили фильтры с силикагелем и углем для удаления органических вредных примесей, с гидроокисью лития для поглощения CO₂, термокаталитический фильтр с гопкалитом для удаления окиси углерода и водорода и фильтр с надперекисью натрия (Na₂O₂) для выделения кислорода

при поглощении воды и CO_2 . В связи с тем, что корпус фильтра, в котором находилась надперекись натрия, был изготовлен из алюминиевого сплава, Na_2O_2 при продувке через нее атмосферы гермокабины начала реагировать с водой и алюминием, образуя водород. Для удаления водорода был увеличен расход воздуха через катализатор, что привело к снижению температуры катализатора и неполному разложению на нем органических примесей. На вторые сутки после этого экипаж стал жаловаться на резкий раздражающий запах, через трое суток начались головные боли, тошнота и рвота, что привело к прекращению эксперимента. При анализах атмосферы было обнаружено высокое содержание в атмосфере гермомодуля трихлорэтилена, который использовался в качестве моющего средства, и токсичных продуктов его неполного окисления – дихлорацетона и монохлорацетилена. Токсичное воздействие этих продуктов соответствовало тому, которое испытал экипаж в эксперименте. Этот случай очень показателен наличием трех ошибок – конструкторской (использование алюминиевого сплава), проектной (использование моющего средства, несовместимого с катализатором в нештатной ситуации) и испытательной (нештатное снижение температуры катализатора).

В 1967 году во время пожара при наземных испытаниях корабля «Аполлон» произошла гибель экипажа. В крови экипажа был обнаружен высокий уровень карбоксигемоглобина, указывающий что одной из причин смерти явилось отравление окисью углерода. Дополнительным фактором, повлекшим смерть экипажа, была признана возможность выделения при термодеструкции полимерных материалов цианистого водорода. Эти оба фактора, а также дым и повышенная температура повлекли за собой смерть экипажа. Причиной образования окиси углерода, цианистого водорода и других продуктов термодеструкции была признана пожароопасность материалов в условиях атмосферы гермомодуля «Аполлона» с 100 % содержанием кислорода, хотя эти материалы были пожароустойчивы в земной атмосфере.

В 1975 году после успешного полета «Союз–Аполлон» экипаж «Аполлона» забыл включить автоматическую систему приземления. В результате выпуск парашюта и поворот тепловых экранов производился экипажем вручную, что привело к значительному крену корабля и включению двигателей ориентации по крену. В это время был автоматически открыт клапан выравнивания давления с окружающей атмосферой (расположенный в 0,6 м от двигателей). В результате в кабину в течение 7 с попали непрореагировавший монометилгидразин и тетраокись азота (N_2O_4), а затем в течение 23 с – только N_2O_4 . Через 30 с экипаж включил систему приземления с основными парашютами, которые стабилизировали движение корабля, что привело к выключению двигателей. Этим 30 с было достаточно, чтобы члены экипажа почувствовали сильное раздражение слизистых оболочек глаз и дыхательных путей, а один член экипажа потерял сознание (он пришел в себя после того, как на него надели кислородную маску). Этот случай показателен чрезвычайно быстрым действием на экипаж токсичных веществ сильного воздействия.

В течение первых шести полетов «Шаттлов» экипажи сообщали об аэрозоле, попадающем в атмосферу из фильтров с LiOH (служащих для поглощения CO₂) при их замене, происходившей с интервалом 6–12 часов в зависимости от количества членов экипажа. Экипаж сообщал о незначительном раздражении глаз и кашле при выбросе этой пыли. В 1989–1990 гг. были проведены мероприятия по снаряжению фильтров LiOH с использованием вибростендов и вакуумного отсоса, после чего выброс аэрозоля LiOH из фильтров прекратился.

При самостоятельных полетах «Шаттла» несколько раз имели место утечки вредных примесей из научного оборудования. В одном из случаев аэрозоль попал непосредственно в глаз члену экипажа, вызвав сильную боль в течение нескольких часов, в другом случае наблюдалось непродолжительное раздражение глаз. После этих случаев были введены требования о двух и трех контурах герметичности при использовании в научном оборудовании токсичных веществ [3, 4].

При подготовке и полетах российских космических объектов также отмечались случаи попадания в атмосферу гермомодулей вредных примесей, однако они имели более легкие последствия, чем на американских объектах.

На станции «Салют» в 1972–1973 гг. космонавты отмечали запах в воздухе распространявшийся из фильтра удаления вредных примесей. Анализ показал, что запах исходил от резиновых прокладок, поглотивших вредные примеси при наземной подготовке. Для устранения запаха резина была заменена. Запахи также фиксировались при задымлении отдельных приборов на станциях «Салют» и «Мир».

На станциях «Салют» и «Мир» отмечался также запах аммиака при несвоевременной замене фильтра АСУ.

При наземной отработке СЖО станции «Мир» в нештатной ситуации с системой электролиза «Вика» имело место попадание раствора щелочи на руки и одежду членов экипажа, которое обошлось без последствий [3].

Выбросы вредных примесей в атмосферу станции «Мир»

Во время совместных программ «Мир–Шаттл» и «Мир–НАСА» на борту станции «Мир» отмечался ряд случаев утечек веществ, в том числе токсичных, из американского научного оборудования.

Один из наиболее серьезных – в конце 1995 года, когда несколько раз обнаруживалась утечка формалина из пакетов для фиксации биологических продуктов из экспериментов «Оранжевая» и «Инкубатор». Утечки были связаны с недостатками в конструкции фиксирующих пакетов и нарушением инструкции – проведением экспериментов вне перчаточной камеры.

В 1997 году при проведении эксперимента «Интерферометрическое исследование процессов роста кристаллов белка» по программе НАСА из двух систем циркуляции произошла утечка низкотоксичной жидкости, которая

попала в перчаточный бокс, являвшийся вторым контуром герметизации при работе с научным оборудованием, и была собрана в пределах этого бокса. Жидкость содержала NaCl, а также небольшое количество уксусной кислоты и щелочи натрия.

В этом же году на станции «Мир» имела место утечка теплоносителя (содержащего 0,2 %-й водный раствор хлората калия) из водяной системы термостатирования российской научной аппаратуры «Алиса», а также наиболее серьезная ситуация – пожар [3, 5, 6, 7].

Загрязнение атмосферы станции «Мир» при разгерметизации служебных систем

Наиболее серьезными являются утечки на станции «Мир» рабочих тел средств обеспечения теплового режима (СОТР). В связи с увеличением продолжительности полета на станции «Мир», рассчитанной первоначально на трехлетний полет, пришлось заниматься ремонтом этой системы.

В качестве рабочих тел в СОТР использовались малотоксичные компоненты (фреон-218 и теплоноситель «Темп-Т», представляющий водный раствор 37,5 %-го этиленгликоля). ПДК этиленгликоля для продолжительности эксплуатации 360 суток составляет 10 мг/м³, ПДК фреона-218 – 150 мг/м³. При этом фреон-218 является типичным легколетучим токсичным веществом, а этиленгликоль – малолетучим. Утечки фреона из блока кондиционирования воздуха БКВ-3 и утечки этиленгликоля из охлаждающих гидроконтуров СОТР наблюдались при нештатных ситуациях и ремонтных работах в течение нескольких лет.

Практически в течение всей 6-месячной экспедиции ЭО-8 максимальная концентрация фреона-218 в атмосфере достигала 2940 мг/м³, во время ЭО-9 – 1465 мг/м³, с ЭО-16 по ЭО-23 максимальная концентрация фреона-218 достигала величин значительно ниже ПДК, однако во время ЭО-24 эта концентрация достигала 1700 мг/м³. Для максимально быстрого удаления малосорбируемым углем фреона-218 был разработан форсированный режим работы средств БМП с регенерацией одновременно обоих регенерируемых фильтров после цикла очистки продолжительностью не более одних суток (при штатном цикле очистки 20 суток). Перевод системы очистки воздуха на форсированный режим работы способствовал увеличению коэффициента скорости выведения фреона-218 из атмосферы на порядок. Предпринятые меры позволили сократить (до 5 суток) время снижения концентрации фреона-218 до ПДК [3, 8] во время ЭО-24, в период работы ЭО-9 во время аналогичного выброса фреона-218 при работе системы в штатном режиме (20 суток) это время составило 2 месяца. При этой нештатной ситуации удалось за короткое время восстановить требуемые условия жизнедеятельности экипажа.

С октября 1995 года из-за негерметичности контуров СОТР (отслуживших несколько гарантийных сроков) начались утечки теплоносителя –

этиленгликоля, продолжавшиеся периодически в разных модулях до конца 1998 г. (период экспедиций ЭО-23–ЭО-26). Во время одного из самых больших проливов – 05.06.1997 в модуле «Квант» вылилось до 6 л этиленгликоля. Из-за высокой вязкости этиленгликоля максимальное содержание его в атмосфере модуля «Квант» достигало только 75 мг/м³ (ПДК – 10 мг/м³), а в базовом блоке – 15 мг/м³. Измерения в основном проводились ИПД (на основе индикаторных трубок). Большая часть пролившегося этиленгликоля была удалена экипажем в жидком виде. Так как этиленгликоль пропитал обшивку, его содержание в атмосфере модуля «Квант» снизилось примерно до уровня ПДК только к концу июля 1997 г., несмотря на включение форсированного режима БМП (цикл очистки – одни сутки).

Для обеспечения жизнедеятельности экипажа при утечках рабочих тел СОТР на станции «Мир» был организован контроль этих примесей при нештатных ситуациях и были разработаны специальные мероприятия по защите экипажа и удалению этих примесей из гермомодулей станции, которые обеспечили продолжение многолетней работы экипажей на борту космических станций [3, 5, 6, 7].

Выбросы вредных примесей при пожаре на станции «Мир»

Одна из наиболее серьезных нештатных ситуаций, возникла на станции «Мир» во время ЭО-22 (23.02.1997) из-за возгорания кассеты твердотопливного источника кислорода (ТИК) в твердотопливном генераторе кислорода (ТГК), расположенного в модуле «Квант». ТГК состоит из заменяемой кассеты с воспламеняющим устройством, фильтров и вентилятора, размещенных в одном корпусе. Он предназначен для осуществления послойного термического разложения кислородосодержащего вещества, впрыснутого в цилиндрический корпус кассеты. Выходящий из генератора кислород охлаждается воздушным потоком. Количество кислорода, выделяемого одной кассетой, составляет ≈ 600 л, время разложения продукта кассеты составляет 5–20 мин, при температуре реакции 450–500 °С. Схема агрегата представлена на рис. 1.

Возгорание произошло при включении в ТГК очередного ТИК. После включения обычно происходит послойная медленная реакция вещества:



В данном случае произошла реакция во всем объеме, что было вызвано случайным попаданием органики при производстве данной кассеты (в соответствии с заключением по анализу причин несоответствия). Больше такая нештатная ситуация при использовании сотен кассет на станции «Мир» и МКС не повторялась. Возгорание сопровождалось ярким свечением активного вещества ТИК после прогара выходного торца его конструкции, термодеструкцией корпуса шашки, оплавлением металлических деталей конструкций и пластмассовых изделий.

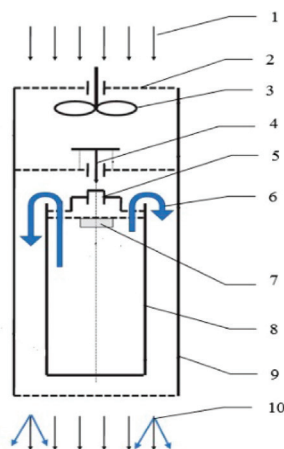


Рис. 1. Схема твердотопливного генератора кислорода:

- 1 – воздух из кабины; 2 – решетка; 3 – вентилятор; 4 – боек ударного механизма;
 5 – капсюль; 6 – кислород; 7 – воспламенительный состав; 8 – кассета с ТИК;
 9 – генератор; 10 – воздух с кислородом, поступающий в гермомодуль

Рассмотрим подробнее:

Звуковая сигнализация сработала практически немедленно. Произошло автоматическое отключение всех бортовых вентиляторов. В момент возгорания один из членов экипажа работал с ТГК. Возгорание было ликвидировано им двумя огнетушителями в течение нескольких минут. Из-за усиливающегося задымления весь экипаж надел противогазы, дым стал быстро распространяться, заполнив сначала весь объем базового блока, а затем и всей станции. Интенсивность задымления достигла пика примерно через пять минут после его начала. Видимость составила около 1 м по направлению в модуль «Квант» и порядка 1,5 м по направлению в базовый блок. Другие модули также были заполнены дымом с видимостью в пределах 2–3 м [3, 5, 8, 9].

Дым, смешанный с паром из огнетушителя, оставался густым в течение не менее 20 мин. Дым стал рассеиваться после включения вентиляторов СОТР и систем очистки (фильтра удаления вредных примесей ФВП в базовом блоке и системы удаления вредных примесей БМП в модуле «Квант»). Через несколько часов, когда дым и туман полностью рассеялись, экипажу было дано указание в течение 36 часов использовать маски-респираторы. Через 24 часа после пожара состояние атмосферы станции нормализовалось. Реакции экипажа на воздействие дыма не отмечалось [3, 5, 8, 9].

Учитывая, что в зоне высокотемпературного воздействия были материалы на основе полиметилметакрилата, полихлорвинила, политетрафторэтилена (температура термоокислительной деструкции которых от 150 до 600 °С), в составе газовой выделений следовало ожидать окись углерода, бензол, альдегиды и другие кислородосодержащие органические соединения, а также ожидать специфические продукты горения:

- метилметакрилат,
- стирол,
- цианистые и хлорорганические соединения,
- фтористый и хлористый водород.

Для анализа уровня загрязненности воздушной среды были отобраны две серии проб воздуха. Первая – в вакуумные канистры в базовом блоке и модулях спустя 3 ч после возгорания (данные предоставлены НАСА), вторая серия отбиралась в российские сорбентные пробозаборники АК-1 спустя 18 ч, 45 ч и 7 суток после возгорания с последующим анализом на Земле методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии. Отбор проб воздуха проводился при работающих системах очистки. Удалению веществ, обладающих высокой растворимостью в воде (формальдегид, хлористый и фтористый водород), способствовало их поглощение конденсатом атмосферной влаги, а также проведение влажной уборки поверхностей интерьера станции «Мир».

Сумма концентраций вредных веществ СИ загрязненности атмосферы модулей станции «Мир» через 3 ч после возгорания приведены в табл. 3.

Таблица 3

Повышение суммарной загрязненности атмосферы модулей станции «Мир», вызванное локальным возгоранием ТГК источника (СИ, мг/м³)

| Модуль | ЭО-22 | ЭО-23 (нештатная ситуация) |
|--|-------|----------------------------|
| Базовый блок «Природа» | 4,8 | 29,8 |
| | 4,5 | 22,9 |
| | 3,9 | 21,4 |
| «Кристалл» «Квант» «Спектр» «Квант-2» | 4,0 | 24,2 |
| | 4,3 | 21,6 |
| | – | 26,3 |
| | – | 24,6 |
| Среднее | 4,3 | 24,4 |

Прирост суммарной загрязненности, обусловленный возгоранием, оценивается в 20 мг/м³, что в пересчете на весь объем станции соответствует выбросу вредных веществ массой 8 г. Такого количества оказалось достаточно для создания серьезной нештатной ситуации, обусловленной токсичностью газообразных продуктов при термоокислительной деструкции материалов. Через 3 ч после локального возгорания и выброса токсичных продуктов их концентрация была практически равномерно распределена по атмосфере модулей станции «Мир». В данном случае межмодульная вентиляция дала положительный эффект, осуществив разбавление токсических продуктов термоокислительной деструкции материалов.

Данные анализов показали существенное превышение фоновых концентраций по характерным продуктам термоокислительной деструкции. Так, концентрация оксида углерода увеличилась с 6 мг/м³ (до возгорания) до 23 мг/м³. Параллельно повышался уровень продуктов деструкции полимеров:

бензола – от следов до 0,6 мг/м³; стирола – от следов до 0,3 мг/м³. Из токсикологически значимых продуктов деструкции следует обратить внимание на нитрилы карбоновых кислот – акрилонитрил и его аналоги. В нештатной ситуации концентрация акрилонитрила, до этого обнаруживавшегося лишь в следовых количествах, увеличилась до 0,07 мг/м³ (ПДК – не более 0,1 мг/м³). Суммарное содержание нитрилов достигало 0,2 мг/м³ (табл. 3).

На этапе разбавления вредных примесей в атмосфере между модулями члены экипажа были надежно защищены изолирующими противогазами. На последующем этапе, пока осуществлялась очистка воздуха системой удаления вредных примесей до предельно допустимого уровня, экипажем применялись респираторы с фильтрами, защищающими органы дыхания от кислых газов, и аэрозольными предфильтрами. По наиболее значимым токсичным продуктам деструкции материалов – окиси углерода, бензолу, стиrolу, нитрилам – время воздействия на экипаж их повышенных концентраций зависело от эффективности работы бортовой системы удаления вредных примесей. Очистка атмосферы станции параллельно осуществлялась за счет удаления растворимых веществ конденсатом атмосферной влаги (при тушении пожара в атмосферу из огнетушителей было внесено 3 л воды).

В табл. 4 приведены данные, полученные после возгорания и в последующие 2 месяца.

Таблица 4

Понижение загрязненности воздушной среды станции «Мир»
после ликвидации локального возгорания (мг/м³)

| Вещество | Дата, интервал времени после возгорания | | | | |
|---------------------------|---|-------------|-------------|--------------|---------------|
| | 24.02, 3 ч | 24.02, 18 ч | 25.02, 45 ч | 03.03, 7 сут | 16.04, 51 сут |
| Оксид углерода | 23,0 | 5,0 | – | 5,0 | 5,0 |
| Бензол | 0,59 | 0,20 | 0,14 | 0,20 | 0,05 |
| Стирол | 0,31 | 0,44 | 0,13 | 0,10 | 0,005 |
| Нитрилы карбоновых кислот | 0,20 | – | – | – | 0,03 |

Для бензола и нитрилов расчетное время очистки воздуха до предельно допустимого уровня составило меньше суток, для окиси углерода достигало 2 суток. Из табл. 4 следует, что время снижения концентраций веществ до допустимых уровней не превышало 2 суток. Таким образом, вызванные возгоранием повышенные концентрации токсичных веществ воздействовали на членов экипажа не более 2 суток, что составляет около 1 % от продолжительности экспедиции [3, 8].

Результаты наземных лабораторных испытаний образцов полимерных материалов, соответствующих обгоревшим на станции «Мир», подтвердили, что основными, наиболее токсичными вредными примесями обгоревших неметаллических материалов, являлись: стирол, бензол, формальдегид, окись углерода, фтор- и хлорорганические и цианистые соединения, а также метилметакрилат. Концентрации отдельных веществ из вышеперечисленных вблизи очага возгорания могли превышать уровни ПДК. Однако совокупность таких факторов, как кратковременность горения (не более 1,5 мин), своевременное использование изолирующих противогазов и респираторов, работа систем удаления вредных примесей обусловили защиту экипажа от воздействия этих вредных примесей [3, 8].

Впервые в естественных условиях были предотвращены опасные для экипажа последствия возгорания на станции. В данном случае оптимально сочетались: быстрая ликвидация возгорания, применение средств индивидуальной защиты, перемешивание воздуха между модулями, очистка воздуха штатными средствами.

Другим случаем, связанным с задымлением СБМП и появлением соответствующего запаха, является нештатная ситуация с СБМП (26.02.1998), когда экипаж несанкционированно включил режим очистки воздуха без охлаждения после регенерации в вакуум угольного фильтра ЗПЛ-1 (Ф2). Экипаж почувствовал запах гари и увидел выходящий из системы дым через несколько минут после включения Ф2 в режим очистки и подачи на него воздуха, после чего выключил СБМП и отключил подачу электропитания. Вся ситуация продолжалась менее 10 мин. В данном случае последствий для экипажа не было.

Быстрое поступление большого количества вредных примесей в атмосферу станции происходит не только в случае пожара. Это возможно также при разгерметизации служебных систем, особенно постоянно действующих. Прежде всего это относится к СОТР. Пример с утечкой этиленгликоля и фреона-218 из составных частей СОТР подробно изложен выше по тексту [3, 8, 9].

Выбросы вредных примесей на МКС

На МКС фиксировались отдельные незначительные утечки токсичных жидкостей из научного оборудования в американском сегменте. Что касается российского сегмента в начале пилотируемого полета МКС (в IV квартале 2000 г.) экипаж отмечал запах в воздухе из СБМП после переключения фильтров ЗПЛ-1М (Ф1 и Ф2) в режим очистки после регенерации и охлаждения. Анализ ситуации показал, что этот запах связан с нарушением технологического режима подготовки нагревателей – они не были подвергнуты обжигу при высокой температуре. После нескольких регенераций запах в воздухе из фильтров СБМП не ощущался.

Загрязнение атмосферы МКС при разгерметизации служебных систем

Наиболее серьезными на МКС являются утечки рабочих тел средств обеспечения теплового режима (СОТР), в основном при ремонтных работах. На МКС, также как и на станции «Мир», был организован контроль этих примесей в нестандартных ситуациях.

В качестве рабочих тел в СОТР на МКС использовались малотоксичные компоненты (фреон-218 и триол, представляющий собой 30 %-й водный раствор глицерина). ПДК триола для продолжительности эксплуатации 360 суток составляет 10 мг/м³, ПДК фреона-218 – 150 мг/м³. При этом фреон-218 является типичным легколетучим токсичным веществом, а триол – малолетучим. Утечки фреона из блока кондиционирования воздуха БКВ-3 и более редкие утечки триола из охлаждающих гидроконтуров СОТР наблюдались в течение нескольких лет при нестандартных ситуациях и ремонтных работах.

На МКС из-за негерметичности контура СОТР в августе 2001 г. в период ЭО-3 в атмосфере была обнаружена повышенная концентрация фреона 218–265 мг/м³ (ПДК 150 мг/м³). Проведенный анализ нестандартной ситуации показал, что утечка осуществлялась с конца июня до середины августа со скоростью 4 г/сутки, а затем до конца августа – со скоростью 20 г/сутки. Суммарно вытекло 400 г, после чего в контуре осталось 350 г фреона уже в газообразном виде, который продолжал вытекать со скоростью 6 г/сутки. При ремонте в конце августа вытекло еще 130 г фреона. Расчетная максимальная концентрация утечки в начале сентября могла составить 530 мг/м³. Американская система удаления вредных примесей ТССС была отключена из-за опасения разложения фреона-218 на горячем катализаторе. Для полной очистки от фреона были проведены четыре 2-суточных цикла очистки СБМП (2 суток очистки – 2 суток поочередной регенерации фильтров). Однако, поскольку замеры в ноябре и декабре свидетельствовали о продолжающейся утечке фреона, СБМП была переведена на 10-суточный цикл очистки. В таком режиме система работала до конца апреля 2002 г. по просьбе американской стороны, чтобы при включении ТССС достичь содержания фреона менее 10 мг/м³ (фактически было достигнуто 2 мг/м³).

Как видно из приведенных данных, разгерметизация служебных систем сопровождается пролонгированным загрязнением воздушной среды в концентрациях ниже ПДК.

Для обеспечения жизнедеятельности экипажа при утечках рабочих тел СОТР были разработаны специальные мероприятия по защите экипажа и удалению этих веществ из гермомодулей станции, которые обеспечили продолжение многолетней работы экипажа на борту МКС. Как было указано выше, для ускоренного удаления малосорбируемого углем фреона-218 был разработан форсированный режим работы СБМП.

Во время эксплуатации МКС также наблюдался ряд случаев, не оказавших влияния на качество атмосферы (незначительные задымления при отказах отдельных приборов и др.) [9, 10].

Возможное загрязнение атмосферы при разгерметизации СОТР АС МКС

Если внешний теплообменник СОТР АС (пластинчато-ребристый, из листов нержавеющей стали толщиной 0,25 мм) разгерметизируется, то возможен выброс очень большого количества аммиака (несколько десятков кг) в атмосферу обитаемых модулей АС МКС. В этом случае рабочее тело внешнего контура этой системы – аммиак при давлении ≈ 20 кг/см² (два контура аммиака по 272 кг в каждом), начнет проникать во внутренний контур, рабочее тело которого вода при давлении $\approx 1,9$ кг/см² (при максимально допустимом давлении 7 кг/см²) разорвет его и попадет в атмосферу станции. Концентрация вредной примеси в атмосфере станции начнет быстро расти, становясь опасной для экипажа.

В настоящее время для нештатных ситуаций на МКС согласованы три зоны концентраций аммиака: зеленая, желтая и красная.

Зеленой зоне соответствуют концентрации аммиака до 30 ppm. При этом диапазоне концентраций использования защитных средств не требуется. Желтой зоне соответствуют концентрации аммиака от 30 до 300 ppm. При таких концентрациях нет необходимости покидать станцию, однако членам экипажа необходимо использовать все имеющиеся средства индивидуальной защиты, за исключением резервных. Красной зоне соответствуют концентрации от 300 до 10 000 ppm. В этой зоне с помощью систем очистки должно проводиться снижение концентрации аммиака при защищенности у экипажа органов дыхания, зрения и кожи. В случае если средства не позволят понизить концентрацию до 300 ppm и менее, рассматривается вопрос о покидании экипажем станции.

Проведенный анализ гипотетической нештатной ситуации на МКС в случае выброса большого количества аммиака в атмосферу американского сегмента показал, что на многомодульной космической станции даже при больших токсических выбросах в случае разгерметизации служебных систем или научного оборудования существует реальная возможность спасения экипажа и модулей спасения (группы модулей космической станции, к которой пристыкованы транспортные корабли) [11–13].

В ходе эксплуатации МКС накоплен достаточный опыт, показавший возможность применения фреона-218 или аналогичного холодильного агента в части обеспечения безопасности экипажа при возникающих нештатных ситуациях. При этом также востребован опыт эксплуатации станции «Мир» с применением форсированного режима работы СБМП [3, 8].

Загрязнение атмосферы МКС при регенерации системы Metox

В процессе регенерации американской системы «Метокс» (Metox) на МКС экипаж сообщил (20.02.2002) о поступлении из нее сильного запаха. Общий вид системы Metox представлен на рис. 2.

Metox является регенируемой системой удаления CO_2 и вредных примесей, которая используется для очистки внутренней атмосферы выходных скафандров в процессе работы за бортом. Данная ситуация, произошедшая со служебной системой, по характеру выброса вредных примесей соответствует пожарной нештатной ситуации – быстрый выброс большого количества различных примесей, включая продукты термодеструкции. Система Metox состоит из двух блоков: регенератора и установки для регенерации (установлена в шлюзовом отсеке). Регенератор содержит окисел металла для удаления CO_2 и уголь для удаления вредных примесей из контура воздухообмена скафандра. Слой угля находится по ходу потока воздуха перед слоем сорбента из окисла металла. Регенерация осуществляется посредством пропускания через слои потока горячего воздуха и выброса микропримесей в атмосферу модуля.

В процессе нагрева воздух, проходящий через регенератор, поступает сначала в слой окисла металла, а затем – в слой активированного угля. Во время охлаждения воздух обтекает патроны. Температура воздуха на выходе из нагревателя достигает $218\text{ }^\circ\text{C}$. Спустя 2,75 ч после начала работы системы

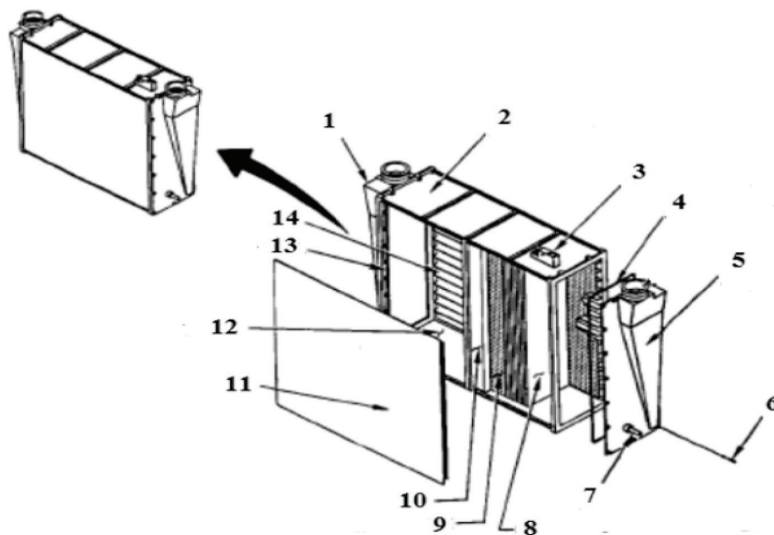


Рис. 2. Общий вид системы Metox:

- 1 – входной патрубок; 2 – верх канистры; 3 – индикатор состояния;
- 4 – уплотнительная прокладка патрубка; 5 – выходной патрубок; 6 – винт;
- 7 – штуцер задвижки; 8 – листы с оксидом металла (перфорированные пластины), набор пластин; 9 – перфорированная пластина; 10 – активированный уголь (в мешке);
- 11 – крышка; 12 – низ канистры; 13 – канал воздушного потока; 14 – ребра

регенерация была остановлена из-за сильного запаха (штатная продолжительность нагрева 10 ч). Экипаж перешел в российский сегмент и закрыл люк, оставив работать для очистки атмосферы модуля систему TCCS. Максимальная температура угля в тот момент должна была быть не более 120 °С. Первоначально регенерация этих фильтров была прекращена через 50 мин из-за появления шума в контуре внутренней циркуляции воздуха. После этого в течение 7 месяцев фильтры находились в регенераторе.

По мнению американских специалистов, появление запаха связано с тем, что при тренировочных работах в системе произошла «перекладка» клапана, направившего воздух к регенераторам. В результате этой операции через регенераторы образовался диффузионный поток атмосферного воздуха в течение времени, достаточного для перенасыщения угля вредными примесями. При возобновлении штатной схемы регенерации появился сильный запах. Как показал наземный анализ ситуации, основными источниками запаха являлись альдегиды, эфиры и ароматические углеводороды. Данные по выделению микропримесей при регенерации Metox приведены в табл. 5.

Таблица 5

Количество микропримесей в атмосфере американского Airlock при регенерации Metox (мг/м³)

| Химическое вещество | Через 3 часа после начала регенерации (сильный запах, 20.02) | Через 33 часа работы TCCS (22.02) |
|----------------------------|--|-----------------------------------|
| Спирты | 7,55 | 4,52 |
| Альдегиды | 1,15 | 0,15 |
| Кетоны | 0,91 | 0,21 |
| Сложные эфиры | 1,55 | 0,02 |
| Галогенуглеводороды | 0,35 | 0,29 |
| Ароматические углеводороды | 5,63 | 0,28 |
| Кремнеуглеводороды | 8,60 | 8,37 |
| Предельные углеводороды | 4,66 | 0,16 |
| Метан | 240,00 | 120,00 |
| Окись углерода | 1,60 | следы |
| Суммарно (без метана) | 32,0 | 14,0 |

Для обеспечения безопасности экипажа при последующих штатных регенерациях Metox российской и американской сторонами было согласовано летное правило, по которому при регенерации на МКС должны работать обе системы удаления вредных примесей – TCCS и СБМП [8–10].

В то же время остался нерешенным вопрос пожарной безопасности на конечной стадии нагрева Metox при ее регенерации. Повторяющиеся циклы поглощения-регенерации фильтра являются источником образования угольной пыли. Вероятным источником воспламенения этой пыли при штатной

работе системы могут являться сернистые соединения (выделяемые человеком) совместно с соединениями железа. Поэтому подобное проектное решение – регенерацию вредных примесей в атмосферу модуля, а не в заборный вакуум – следует признать нецелесообразным [8–10].

Все рассмотренные случаи подтверждают необходимость принятия всего спектра мер по предупреждению токсической опасности в атмосфере станции и по способам противодействия в случае ее возникновения.

Загрязнение атмосферы станции, связанное с нештатными ситуациями при эксплуатации научного оборудования

Особой проблемой загрязнения становятся выбросы вредных примесей при разгерметизации научного оборудования, содержащего токсичные газы и жидкости. Поскольку научные эксперименты являются одним из основных видов полезной деятельности экипажа на космических станциях, количество и номенклатура используемого научного оборудования быстро возрастают. Особенно опасна разгерметизация научного оборудования тем, что она происходит в основном при работе экипажа с этим оборудованием и связана с большими локальными концентрациями вредной примеси, попадающей при этом в атмосферу станции и воздействующей на экипаж. Поэтому вопрос ограничения содержания высокотоксичных веществ, присутствующих в научном оборудовании, имеет особое значение.

При разгерметизации такого рода могут иметь место два вида выброса:

1. Вещество выделяется в большом количестве, из-за чего после размещения его в объеме модуля или всей станции требуется дополнительная очистка атмосферы.

2. Небольшое количество вещества, что может угрожать только зрению и дыхательным органам человека в сам момент разгерметизации (локализация по месту осуществления операций с оборудованием).

В научном оборудовании могут содержаться:

– в малых количествах (мл и десятки мл) такие вещества, как кислоты, щелочи, спирты, простые и сложные эфиры, соли, многочисленные органические соединения;

– в больших же количествах (до 1 л и более) также кислоты и щелочи, а кроме этого, хлорорганические вещества, фреоны, аммиак, этиленгликоль, формалин (консерванты, теплоносители, растворители).

Нештатные ситуации, связанные с эксплуатацией научной аппаратуры, сопровождались, как правило, незначительным кратковременным загрязнением атмосферы космических станций вследствие применяемых ограничений на качественный и количественный состав веществ, допускаемых к применению в оборудовании.

Однако пример нештатной ситуации, связанный с загрязнением атмосферы станции «Мир» карбогалом, не исключает возможности длительного воздейст-

вия. Идентифицированные концентрации карбогала в атмосфере не превышали ПДК, но в то же время следует отметить, что физико-химические свойства этого вещества способствуют снижению емкости активированного угля, применяемого в системе удаления вредных примесей, и ухудшению кинетики адсорбции угля. Следовательно, применение в научном оборудовании химических веществ должно подвергаться тщательной экспертизе как по составу и концентрационному (количественному) содержанию веществ в части токсикологических параметров, так и по оказываемому влиянию на служебные системы.

В целях минимизации опасности возникновения нештатных ситуаций (и/или их последствий) на борту космической станции при планировании к проведению научных экспериментов на биомедицинской и технической аппаратуре, используемой в них, должны быть предусмотрены следующие мероприятия:

- в конструкции – наличие не менее двух барьеров безопасности по локализации содержащихся в ней газов, жидкости, биоматериала (на этапах конструкторских разработок);

- проведение оценки (гигиенической экспертизы) элементов оборудования, неметаллических материалов, используемых в конструкциях, а также веществ, содержащихся во внутреннем объеме оборудования для выполнения исследований (на этапах конструкторских разработок);

- оценка возможности замены химических соединений, содержащихся в научном оборудовании, на менее токсичные (при необходимости);

- размещение научного оборудования в модулях станции, обеспечивающих изоляцию от других обитаемых помещений (при необходимости);

- оценка эффективности существующих на космической станции систем очистки в случае загрязнения атмосферы химическими соединениями, используемыми в научном оборудовании, и возможность доставки (при необходимости) дополнительного оборудования очистки атмосферы;

- работа с использованием герметизируемых камер (перчаточных боксов) при наличии в оборудовании опасных веществ;

- разработка процедуры проведения ремонтно-восстановительных работ для предупреждения утечки токсичных веществ в атмосферу космической станции;

- обеспечение наличия адекватных средств индивидуальной защиты для безопасного проведения экспериментов, ремонтно-восстановительных работ и пребывания экипажа в загрязненной атмосфере при невозможности эвакуации.

Кроме этого, российскими специалистами выпущен Международный стандарт ISO 16726:2018, в котором для оборудования гермообъемов не допускается использовать неметаллические материалы, продукты газовой выделенной которых относятся к группе чрезвычайно токсичных соединений, обладающих эмбриотропным, бластоматозным и аллергическим действиями и вызывающих раздражение кожных покровов при непосредственном контакте с ними, а также приводится список ряда таких веществ [1].

Требования к газоаналитическому оборудованию и системам удаления вредных примесей при нештатных ситуациях

При нештатных ситуациях с выбросом вредных примесей в количествах, превышающих допустимые концентрации в ограниченном объеме при минимальном времени, требуется выполнение первоочередных действий – измерение концентрации этих примесей, поступивших в атмосферу (см. табл. 1).

В настоящее время на АС МКС эксплуатируются и проходят стадию отработки автоматические приборы непрерывного измерения состояния атмосферы. НАСА обрабатывает на своем сегменте несколько типов экспериментальных автоматических газоанализаторов: масс-спектрометр AQM на ~20 примесей, хромато-масс-спектрометр SAM на основные газы и большое количество микропримесей, включая аварийные, фурье-спектрометр совместно с ЕКА – ANITA-2 на большое количество микропримесей, включая аварийные, и другие.

При нештатной ситуации на станции особую важность имеет точность и селективность применяемого газоанализатора. Так, достоверность этого подтверждает случай с прибором AQM на АС МКС, который в течение нескольких месяцев 2020 году показывал превышающие ПДК данные по опасной канцерогенной примеси – бензолу, в атмосфере МКС. Возврат прибора в лабораторию показал ошибочность данных прибора по бензолу, которые могли привести к прекращению пилотируемой экспедиции.

На РС МКС для анализа используются одноразовые индикаторные трубки, не обеспечивающие необходимую точность, селективность и непрерывность измерений. Расширенный анализ применяемых на практике методов газового анализа показал, что наилучшим методом на сегодняшний день является использование диодных лазеров [14]. В настоящее время проводится разработка автоматических газоанализаторов для РС МКС, а разработанные современные белорусские лазеры дают возможность приступить к разработке диодного лазерного газоанализатора.

Регенерационная система БМП обеспечивала удаление токсических примесей в аварийных ситуациях (американская нерегенерационная система TCCS отключалась в этих случаях), это обеспечивалось за счет уменьшения времени очистки до очередной регенерации – уменьшение времени цикла с 20 суток до нескольких. Увеличения эффективности очистки атмосферы в нештатной ситуации можно достигнуть за счет увеличения расхода очистки с 20 м³/ч до 60–100 м³/ч. Для этого может быть использована отдельная переносная система с большим расходом (от 60 до 100 м³/ч), в настоящее время на РС МКС установлена аварийная система-фильтр АФОТ с расходом ≈ 65 м³/ч. Этот фильтр может быть доставлен в изолированный гермомодуль, в котором произошла нештатная ситуация.

Изолирующий противогаз ИПК снабжает человека кислородом из собственного источника, удаляет углекислый газ и изолирует человека от

атмосферы кабины, являясь универсальным аппаратом, предохраняющим человека при любой загрязненности атмосферы.

Маски, разработанные НАСА для использования при тушении пожара, небезопасны. При использовании кислородной маски 80 %-го кислорода, подаваемого в маску, попадает в атмосферу, что угрожает усилением возгорания. При использовании маски с сорбционным фильтром для пожарного случая, сорбенты при температуре воздуха выше 30 °С значительно теряют поглотительную емкость и не смогут предохранить человека от токсических примесей в атмосфере.

Таким образом, все используемые средства предохранения экипажа от вредных примесей в атмосфере, кроме российского изолирующего противогаза ИПК, особенно в случае пожара, следует считать ненадежными и небезопасными.

Выводы

1. Эксплуатация станции «Мир» и МКС позволила сформулировать, отработать и принять к исполнению следующие требования по ограничению опасности при попадании вредных примесей в атмосферу пилотируемых космических объектов в нештатных ситуациях:

- установлена необходимость тройного барьера в конструкции элементов при наличии вредных примесей;
- доказана эффективность регенерационной системы удаления вредных примесей СБМП при выбросах большого количества примесей, в том числе при пожаре на станции «Мир»;
- согласованы с НАСА общие нормативы вредных примесей при эксплуатации МКС;
- согласованы с НАСА нормативы и мероприятия в случае разгерметизации внешнего аммиачного контура СОТР в атмосферу МКС через теплообменник и внутренний контур СОТР;
- выпущен российскими специалистами Международный стандарт ISO 16726:2018 по ограничению использования ряда веществ на космических пилотируемых объектах и по ограничению времени пребывания экипажа на космическом объекте при повышенных концентрациях вредных примесей в нештатных ситуациях.

2. Остается небезопасной работа экипажа с научным оборудованием, поскольку его разгерметизация происходит в основном при работе экипажа и связана с большими локальными концентрациями попадающего при этом в атмосферу вредного вещества. Необходимо введение мероприятий по безопасной работе экипажа с научным оборудованием, основные из которых:

- оценка эффективности существующих на космической станции систем удаления вредных примесей при загрязнении атмосферы химическими соединениями, используемыми в научном оборудовании, и возможность доставки дополнительного оборудования удаления вредных примесей;

- работа с использованием герметизируемых камер (перчаточных боксов) при наличии опасных веществ;
- обеспечение адекватных средств индивидуальной защиты для безопасного проведения экспериментов.

3. Для быстрого удаления вредных примесей при нештатной токсической ситуации необходимо использование регенерационной системы типа БМП с возможностью уменьшения цикла очистки для регенерации сорбента от поглощенных веществ с расходом воздуха ≈ 20 м³/ч и введением дополнительной аварийной переносной системы с расходом 60–100 м³/ч, типа установленного на РС МКС аварийного переносного фильтра АФОТ с расходом ≈ 65 м³/ч.

4. Необходимо введение в состав СЖО газоанализатора аварийных ситуаций. Проведенное рассмотрение методов газового анализа показало, что наилучшим методом по точности, селективности и быстродействию в настоящее время является использование прибора на основе диодных лазеров.

5. Изолирующий российский противогаз ИПК снабжает человека кислородом из собственного источника, удаляет углекислый газ и изолирует человека от атмосферы кабины, являясь универсальным аппаратом, предохраняющим человека от любой загрязненности атмосферы. Все остальные средства предохранения экипажа от токсичных примесей, особенно в случае пожара, следует считать небезопасными.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ISO 16726:2018 Space Systems – Human-life Activity Support Systems and Equipment Integration in Space Flight – Techno-medical Requirements for Space Vehicle Human Habitation Environments – Requirements for the Air Quality Affected by Harmful Chemical Contaminants.
- [2] ГОСТ Р 50804–95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. – М.: Госстандарт России, 1995. – 118 с.
- [3] Мухамедиева Л.Н. Закономерности формирования и гигиеническое регламентирование многокомпонентного загрязнения воздушной среды пилотируемых орбитальных станций: дисс. д-ра м. наук: 14.00.32 / Л.Н. Мухамедиева. – Москва, 2003. – 239 с.
- [4] Cole H., Manuel S., Rather D., Ward S., Jones K., Perry J., Gouzenberg A., Savina V., Muhkamedieva L., Mikos K. Mir Space Station Trace Contaminant Assessment. 26th International Conference on Environmental Systems, 1996, 20 p.
- [5] Линенджер Дж. Отчет по состоянию дел на борту с точки зрения медицины и СЖО – пожар на борту КС «Мир» (предварительная редакция). 25.12.1997. – С. 1–3.
- [6] Cole H., Ward S., Manuel S., Rather D., Simon P., Farant J-P., Krasnec J., Gouzenberg A., Muhkamedieva L., Mikos K. The Application of Grab and Time Integrated Sampling to the Characterization of Trace Contaminants Contributed by the Docking and Integration of the Priroda Module to Space Station Mir. 28th International Conference on Environmental Systems, 1998, p. 21.

- [7] Гигиеническое сопровождение нештатных ситуаций, связанных с локальным возгоранием в условиях пилотируемых орбитальных станций / В.М. Баранов, Л.Н. Мухамедиева, В.З. Аксель-Рубинштейн и др. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2001. – Т. 35, № 36. – С. 13–18.
- [8] Обеспечение токсически безопасной атмосферы обитаемых космических станций при аварийных ситуациях / А.В. Юргин, С.Ю. Романов, А.С. Гузенберг и др. // *Известия РАН. Энергетика*. – 2007. – № 3. – С. 75–95.
- [9] Вредные примеси в атмосфере обитаемых космических станций / С.Ю. Романов, Л.Н. Мухамедиева, А.С. Гузенберг и др. // *Известия РАН. Энергетика*. – 2006. – № 1. – С. 31–49.
- [10] Романов С.Ю., Гузенберг А.С. Космические системы жизнеобеспечения: особенности обеспечения токсической безопасности искусственной среды на многомодульных космических станциях // *Инженерная экология*. – 2013. – № 2. – С. 50–61.
- [11] Macatangay A.V., Prokhorov K.S., Sweterlitsch J.J. Strategies to Mitigate Ammonia Release on the International Space Station. NASA. SAE Technical paper series 2007-01-2806.
- [12] Duchesne S.M., Sweterlitsch J.J., Son Ch.X., Perry J.L. Brief Information under the Analysis of Emission of Ammonia in Case of Break interface Heat exchanger.ISS. CM 019 (Rev.01.2011). NASA 01.2012. p. 40.
- [13] Исследование очистки атмосферы российского сегмента МКС при разгерметизации оборудования с токсичным компонентом / А.С. Гузенберг, А.Г. Железняков, А.А. Телегин, А.В. Юргин // *Космическая техника и технология*. – 2018. – № 4. – С. 81–87.
- [14] Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. Работы по аналитическому использованию диодной лазерной спектроскопии в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН // *Журнал аналитической химии*. – 2017. – Т. 72, № 12. – С. 84–89.

REFERENCES

- [1] ISO 16726:2018 Space Systems – Human-life Activity Support Systems and Equipment Integration in Space Flight – Techno-medical Requirements for Space Vehicle Human Habitation Environments – Requirements for the Air Quality Affected by Harmful Chemical Contaminants.
- [2]. GOST R 50804-95. ГОСТ Р 50804–95, Cosmonaut’s habitable environments on board of manned spacecraft. General medicotechnical requirements. – Moscow: Committee of the RF for Standardization, 1995, p. 118.
- [3] Mukhamediev L.N. Patterns of Formation and Hygienic Regulation of Multicomponent Air Pollution of Manned Orbital Stations. Thesis Doc Med Science. Scientific Center of the Russian Federation, IBMP RAS, Moscow, 2003, p. 239.
- [4] Cole H., Manuel S., Rather D., Ward S., Jones K., Perry J., Gouzenberg A., Savina V., Muhkamedieva L., Mikos K. Mir Space Station Trace Contaminant Assessment. 26th International Conference on Environmental Systems, 1996, p. 20.
- [5] Linenger Jerry. Report on the State Of Affairs on Board Fin Terms of Medicine and LSS – Fire on Board the Mir Space Station (Preliminary Version). 12/25/1997, pp. 1–3.
- [6] Cole H., Ward S., Manuel S., Rather D., Simon P., Farant J-P., Krasnec J., Gouzenberg A., Muhkamedieva L., Mikos K. The Application of Grab and Time Integrated

- Sampling to the Characterization of Trace Contaminants Contributed by the Docking and Integration of the Priroda Module to Space Station Mir. 28th International Conference on Environmental Systems, 1998, p. 21.
- [7] Baranov V.M., Mukhamedieva L.N., Aksel-Rubinshtein V.Z., Mikos K.N., Nikitin E.N., Romanov S.Yu., Guzenberg A.S. Hygienic Control of Contingencies Associated with Local Fire Events Aboard Piloted Orbital Stations. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2001, Vol. 35, No 6, pp. 13–18.
- [8] Yurgin A.V., Romanov S.Yu., Guzenberg A.S., Telegin A.A., Mukhamedieva L.N., Ereemeev S.I. Ensuring a Toxically Safe Atmosphere for Habitable Space Stations in Emergency Situations. *Proceedings of the RAS. Power Engineering*. 2007, No 3, pp. 75–95.
- [9] Romanov S.Yu., Mukhamedieva L.N., Guzenberg A.S., Mikos K.N. Contaminants in Space Stations Atmosphere. *Proceedings of the RAS. Power engineering*. 2006, No 1, pp. 31–49.
- [10] Romanov S.Yu., Guzenberg A.S. Space Life Support Systems: Features of Ensuring the Toxic Safety of the Artificial Environment on Board Multi-Module Space Stations. *Engineering Ecology*. 2013, No 2, pp. 50–61.
- [11] Macatangay A.V., Prokhorov K.S., Sweterlitsch J.J. Strategies to Mitigate Ammonia Release on the International Space Station. NASA. SAE Technical Paper Series 2007-01-2806.
- [12] Duchesne S.M., Sweterlitsch J.J., Son Ch.X., Perry J.L. Brief Information under the Analysis of Emission of Ammonia in Case of Break Interface Heat Exchanger. ISS. CM 019 (Rev.01/2011). NASA 01.2012, p. 40.
- [13] Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A., Yurgin A.V. A study of purification of the ISS Russian Segment Atmosphere in Case of a Containment Failure in the Hardware Containing a Toxic Component. *Space Engineering and Technology*. 2018, No 4, pp. 81–87.
- [14] Nadezhdinsky A.I., Ponurovsky Ya.Ya. Proceedngs on the Analytical Use of Diode Laser Spectroscopy at the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (GPI RAS). *Journal of Analytical Chemistry*. 2017, Vol. 72, No 12, pp. 84–89.