

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ОТ ВРЕДНЫХ МИКРОПРИМЕСЕЙ

Шустров Т.Л.

*НИИхиммаш,*

*Б. Новодмитровская ул., 14, Москва, 127015, Россия*

*e-mail: tistrov@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 17.08.2018

Описана структура разрабатываемой имитационной модели, предлагаемой в качестве решения задачи создания и модернизации систем по очистке от микропримесей. Представлено формализованное описание основных элементов имитационной модели. Сформулированы основные факторы, лежащие в основе имитаторов: физико-химические свойства микропримесей, источники и механизмы их образования, стоки и технологии удаления. Продемонстрирована работа блока модели, имитирующего выделение микропримесей экипажем при учете всех основных воздействующих факторов.

*Ключевые слова:* системы жизнеобеспечения космического объекта, газовая среда космического объекта, обитаемость пилотируемого космического аппарата, образование вредных микропримесей, свойства вредных микропримесей, очистка от вредных микропримесей, имитационное моделирование работы аппаратуры по очистке газовой среды, имитационное моделирование выделения веществ в газовую среду.

### Введение

Осуществление длительных космических миссий, связанных с автономными межпланетными полетами к объектам Солнечной системы, предопределяет приоритет совершенствования всех бортовых систем, и в первую очередь по жизнеобеспечению экипажей. Одной из основных функций интегрированной системы жизнеобеспечения (ИСЖО) межпланетного пилотируемого аппарата (МПА) является поддержание заданного химического состава газовой среды обитаемых гермомодулей (ОГМ). При этом особое значение при длительных полетах приобретают обеззараживание и очистка газовой среды от вредных органических и неорганических микропримесей (ВМП). Основная проблема, возникающая при увеличении продолжительности пребывания экипажа в ОГМ, связана с тем, что имеющиеся системы являются непригодными для подобных задач. Недостатки архитектуры, интерфейсов взаимодействия с человеком, неспособность учета важных физико-химических свойств ВМП (например, их полярность) обуславливают необходимость разработки и создания качественно новых подсистем, входящих в усовершенствованную ИСЖО.

Не существует единой точки зрения касательно вопроса выбора финальной конфигурации ИСЖО при подготовке космических миссий. Разнятся не только устройства/оборудования, методы, но также стандарты по требованиям, предъявляемым к итоговым ИСЖО [1, 2]. Необходимо укомплектовывать космические летательные аппараты (КЛА) оборудованием, которое позволит выполнять задачи любого типа при учете максимально возможного количества исходных данных и установок [3, 4].

Статья посвящена решению задачи создания динамической имитационной модели источников и стоков микропримесей газовой среды (ГС) гермомодуля межпланетного пилотируемого аппарата, предназначенной для выбора технологических и конструктивных особенностей системы обеззараживания и очистки от микропримесей.

### Влияние вредных микропримесей на обитаемость гермообъемов

Под обитаемостью понимаются условия жизни членов экипажа и их профессиональная деятельность при нахождении на борту космического корабля [1]. Обитаемость определяется сово-

купностью факторов среды, воздействующих на организм человека в условиях космического полета. Общим фактором является вынужденная изоляция в замкнутом герметичном пространстве в течение заранее означенного времени.

Кратко сформулируем основные влияния загрязнителей различной природы на проблему обитаемости в ОГМ космического летательного аппарата, которые важны при создании имитационной модели [5].

**А.** В условиях герметичного пространства продукты метаболизма влияют на формирование окружающей среды.

**В.** Повышенные объемы ионизирующих излучений активизируют микропримеси, находящиеся в газовой среде, усиливая их потенциальный токсический эффект и способствуя образованию качественно новых загрязнителей.

**С.** Высокая продолжительность нахождения в замкнутом пространстве провоцирует существенные изменения микрофлоры не только ГС ОГМ, но и аутомикрофлоры членов экипажа, что вызывает повышенную восприимчивость к возбудителям различных инфекций, снижение иммунитета [6].

В изолированном замкнутом гермомодуле между человеком и окружающей его средой складываются особые отношения, проявляющиеся в непосредственном участии как самого человека, так и объектов техногенной природы в формировании среды обитания. Связано это с тем, что искусственная газовая среда различных гермомодулей представляет собой динамическую многокомпонентную газовую смесь, предназначенную для обеспечения дыхания, основными компонентами которой являются азот, кислород, диоксид углерода и пары воды. Концентрации данных соединений находятся под постоянным контролем в условиях полета и изменяются в незначительных пределах.

Помимо этого, существуют другие компоненты, рассматриваемые как вредные микропримеси, присутствие которых является нежелательным, а содержание должно постоянно контролироваться.

При этом речь идет не о колебании состава основных ингредиентов (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар), а о загрязнении воздушной среды различными ВМП.

Разнообразие ВМП крайне велико. При этом, как показывает многолетний опыт эксплуатации космических станций, число идентифицируемых ВМП возрастает. Выявление новых микропримесей в атмосфере может быть объяснено как совер-

шением методов контроля, так и эксплуатацией на борту нового оборудования, разнообразием экспериментальных исследований, а также возможным накоплением отдельных микропримесей, обладающих определенными физико-химическими свойствами (плохая сорбируемость, низкая растворимость в воде).

Результаты анализа широкого комплекса исследований, а также накопленный опыт эксплуатации орбитальных космических станций позволяют сделать следующие основные выводы:

— газовая среда гермомодулей пилотируемых космических аппаратов является многокомпонентной смесью, химический состав которой характеризуется наличием химических органических и неорганических соединений различных классов;

— газовая среда не является изотропной субстанцией: ее параметры постоянно изменяются во времени и пространстве (рис. 1), вследствие чего концентрации вредных микропримесей, попадающих из различных источников, варьируются в довольно широких пределах, различаясь на несколько порядков;

— концентрации водорастворимых ВМП симбатно изменяются в газовой среде и конденсате атмосферной влаги — КАВ, подчиняясь определенным физико-химическим закономерностям;

— динамика протекающих процессов зависит от продолжительности использования гермомодуля в условиях полета, функционирования отдельных subsystemов и функциональных узлов ИСЖО, параметров газовой среды и работ, выполняемых экипажем;

— значительно затруднен мониторинг микропримесей, что связано с их разнообразием и в ряде случаев — с неустойчивостью (легко гидролизующиеся и реакционноспособные соединения);

— используемые системы очистки атмосферы от вредных микропримесей обладают рядом недостатков (отсутствие механизмов обеззараживания, отсутствие универсальности очистки, невозможность введения корректирующих настроек в режим работы и т.д.), что не позволяет полностью решить проблему поддержания экологически безопасного уровня среды обитания.

### Основные источники микропримесей

Известно большое количество (приблизительно 500 наименований) органических и неорганических загрязнителей воздуха ОГМ [7]. Важным фактором является влияние ряда свойств ВМП на выбор итогового метода очистки и качественный состав проектируемой системы. Свойства наибо-

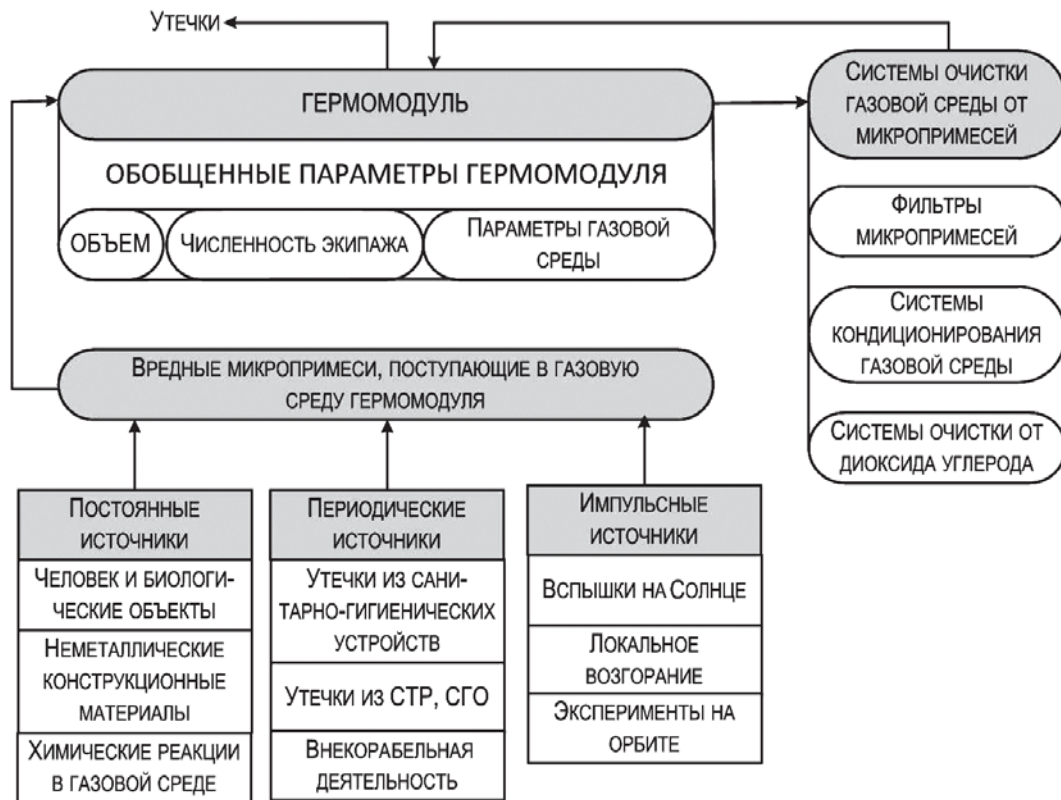


Рис. 1. Форм-факторы газовой среды гермомодуля

лее распространенных ВМП, полученные в результате изучения справочной информации и необходимые для создания формализованного описания имитаторов, представлены в табл. 1.

Основным источником ВМП являются неметаллические конструкционные материалы (НKM), из которых изготовлены корпуса и панели различного оборудования и аппаратной части МПА [8, 9]. Неметаллические конструкционные материалы выделяют приблизительно 100 наименований химических соединений, 70 из них наиболее часто отмечались при использовании газохроматографического анализа [10]. Согласно [11, 12] НКМ, допускаемые к использованию на борту космического корабля, должны выделять не более 100 мкг органических микропримесей на грамм материала. Допускается, что весовое соотношение неметаллических материалов и их химический состав не изменяются, однако такой способ расчета скорости выделений микропримесей из НКМ приблизительный и может рассматриваться только как оценочный [13].

Значительный вклад в итоговый количественный и качественный состав ВМП на борту космического корабля вносит человек: продукты дыхательной системы и деятельности пищеварительной системы, системы терморегуляции (выделе-

ния через пот, кожу, волосы), выделительной системы (моча, кал) [14]. Максимальное количество выделяемых человеком микропримесей (136 наименований) было установлено при использовании при помощи хромато-масс-спектрометрии с дополнительной аппаратной обработкой данных библиотекой спектров и выводом на графопостроитель [15,16].

Важными для рассмотрения являются результаты работ [17, 18], где исследовалось воздействие сторонних факторов на скорость выделения ВМП: температуры, влажности, питания, режима энергозатрат при выполнении отдельных видов работы.

Остальными источниками, учитываемыми в имитационной модели, являются:

- 1) аппаратура системы терморегулирования [10, 16];
- 2) системы очистки от ВМП (в результате высокотемпературных процессов продуктами реакции могут быть более токсичные, чем исходные, вещества);
- 3) санитарно-гигиеническое оборудование и средства личной гигиены;
- 4) различная внекорабельная деятельность также приводит к загрязнению газовой среды (при выходе в открытый космос космонавты попадают

Таблица 1

## Физико-химические свойства ВМП

Микропримесь	Молярная масса, г/моль	Давление насыщенного пара, Па, при температурах, К			Молярная объемная доля, моль/м <sup>3</sup>	Растворимость в воде, г/кг при 30°C	Парциальное давление газа, мПа, при температурах, К		
		293,15	303,15	313,15			293,15 К	303,15 К	313,15 К
Изопропилбензол	120	445	829	1466	$0,42 \times 10^{-5}$	Не растворим	10,24	10,7	11
Толуол	92	2912	4889	7887	$2,17 \times 10^{-5}$	Не смешивается	52,9	54,7	56,5
Циклогексан	84	10333	16226	24619	$3,57 \times 10^{-5}$	0,00052	87	90	93
Этилацетат	88	9706	15825	24824	$4,545 \times 10^{-5}$	0,68	110,77	114,55	118,33
Бензол	78	10025	15918	24371	$2,56 \times 10^{-5}$	0,185	62,4	64,52	66,65
Бутанол	74	600	1426	2480	$0,675 \times 10^{-5}$	66,29	16,45	17,01	17,57
Ацетон	58	24651	37810	56222	$1,72 \times 10^{-5}$	Смешивается	41,92	43,35	44,78
Уксусная кислота	60	1560	2746	4639	$1,67 \times 10^{-5}$	Смешивается	40,7	42,09	43,48
Этанол	46	5853	10559	18038	$21,74 \times 10^{-5}$	0,047	529,85	547,93	566
Ацетальдегид	44	102089	135559	---	$2,27 \times 10^{-5}$	Смешивается	55,33	57,21	59,1
Метанол	32	12985	21798	35290	$3,125 \times 10^{-5}$	Смешивается	76,16	78,76	81,36
Формальдегид	30	---	---	---	$1 \times 10^{-5}$	Растворим	24,37	25,2	26,03
Сероводород	34	---	---	---	$1,47 \times 10^{-5}$	3	35,82	37,05	38,27
Окись азота	30	---	---	---	$0,33 \times 10^{-5}$	---	8,04	8,31	8,59
Аммиак	17	783721	1073555	1439378	$5,88 \times 10^{-5}$	400	143,31	148,2	153,08
Метан	16	---	---	---	3,25	0,018	7921059	8191264	8461469
Окись углерода	28	---	---	---	$17,85 \times 10^{-5}$	0,028	435,05	449,89	464,73
Водород	2	---	---	---	1,63	0,00146	3972716	4108234	4243752
Этиленгликоль	62	62	125	241	$16,13 \times 10^{-5}$	Смешивается	393,13	406,54	419,95

под воздействие управляющих реактивных сопел, использующих в качестве топлива гидразин);

5) диффузионный обмен газовой средой при взаимодействии транспортными и грузовыми кораблями. В данных случаях необходимо тщательно замерять уровни загрязнения сторонних газовых сред, дабы предотвратить потенциально критическое возрастание отдельных примесей;

6) выбросы ВМП в газовую среду ОГМ в результате каких-либо нештатных ситуаций (НшС). Количественный и качественный состав ВМП будет различаться в соответствии с видом НшС и конкретным местом ее возникновения.

### Стоки и методы удаления микропримесей

Описание материального баланса ВМП сформировано на основании расчетной схемы (рис. 2). Единственной движущей силой, обеспечивающей взаимосмещение газовых сред герметичных объектов, является диффузия, обеспечиваемая системой вентиляции КЛА.

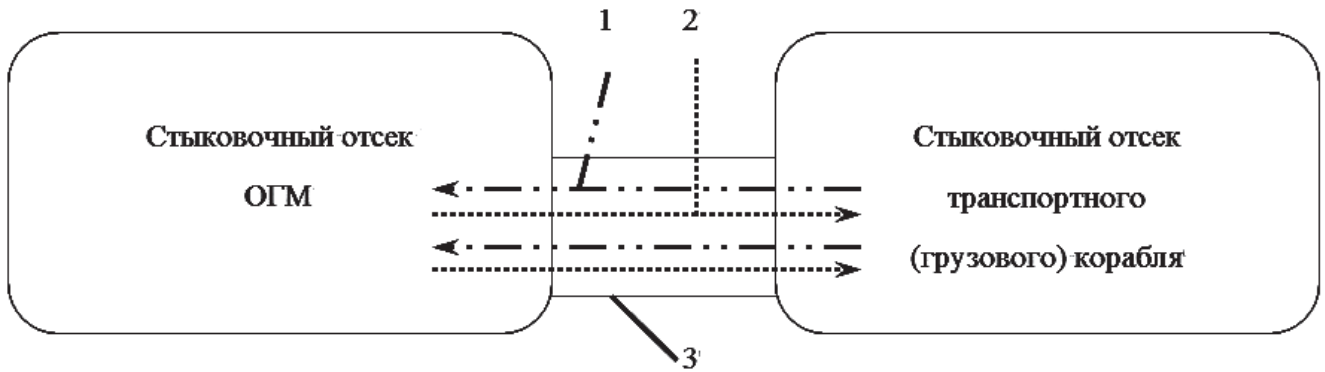


Рис. 2. Расчетная схема для формализованного описания процессов ВМП: 1 – движение частиц газовой среды в ОГМ; 2 – движение частиц газовой среды из ОГМ; 3 – шлюзовая камера

Для составления формализованного описания процессов ВМП были установлены следующие допущения:

1) газовая среда обитаемого модуля на рассматриваемом промежутке времени описывается моделью «идеального смешения» с постоянными значениями температуры и давления;

2) отдельные микропримеси не взаимодействуют друг с другом и не образуют новых химических соединений;

3) интенсивность межмодульной вентиляции определяет перенос примесей между отдельными модулями.

Динамика микропримесей в газовой среде обитаемых модулей описывается следующими нелинейными уравнениями материального баланса [21]:

$$M_{МП}(\tau) = \sum_{i=1}^n M_i(\tau); \tag{1}$$

$$M_{iМП}(\tau + \Delta\tau) = M_{iМП}(\tau) + \left[ \sum_{j=1}^p \dot{M}_{ji}(\tau) - \sum_{k=1}^p \dot{M}_{ki}(\tau) \right] \Delta\tau, \tag{2}$$

где  $M_{МП}(\tau)$  – масса МП в обитаемом модуле в момент времени  $\tau$ ;  $M_i(\tau)$ ,  $\dot{M}_{ji}(\tau)$ ,  $\dot{M}_{ki}(\tau)$  – текущие значения массы, интенсивностей выделения источника  $j$ -го и  $k$ -го стока  $i$ -й микропримеси соответственно;  $\Delta\tau$  – длительность рассматриваемого промежутка времени.

Текущее значение объемной концентрации  $i$ -й микропримеси  $C_i(\tau)$  в объеме  $V_{ОМ}$  обитаемого модуля может быть определено как

$$C_i(\tau) = \frac{M_i(\tau)}{V_{ОМ}}. \tag{3}$$

Интенсивность выделения  $i$ -й микропримеси:

$$(\dot{M}_{ji})^{j=1}(\tau) = A_{1i} \left[ A_{2i, T=293} + A_{3i} (T(\tau) - 293) \right], \tag{4}$$

где  $A_{1i}$ ,  $A_{2i, T=293}$ ,  $A_{3i}$  – коэффициенты регрессионной зависимости, полученной на основе обработки экспериментальных данных [17, 18].

Выделение микропримесей неметаллическими конструкционными материалами:

$$(\dot{M}_{ji})^{j=2}(\tau) = A_1 k_\tau \left[ k_t H_s - B_1 C_i(\tau) \right] V_{ОМ}, \tag{5}$$

где  $A_1, B_1$  – эмпирические коэффициенты;  $k_t$  – временной коэффициент, учитывающий время наступления равновесной концентрации;  $k_T$  – температурный коэффициент, учитывающий значение равновесной концентрации;  $H_s$  – интенсивность дегазации  $s$ -НКМ.

Основные стоки (пути удаления) ВМП из газовой среды [19, 20] ОГМ следующие.

1. Система удаления микропримесей. Данная аппаратура занимается «захватом» ВМП из газовой среды и либо последующим их преобразованием путем каталитических реакций, либо накоплением вредных соединений при помощи сорбции с последующим сбросом загрязняющих веществ/токсичных продуктов реакции в вакуум космоса. Существует целый ряд технологий и методов очистки газовой среды конкретно взятого сооружения от ВМП. Их обобщенная классификация представлена на рис. 3.

Адсорбция отдельных микропримесей из многокомпонентной газовой смеси описывается выражением [15]:

$$\frac{a_i}{a_i^*} = \frac{K_i p_i}{\left(1 - \frac{p_i}{p_i^*}\right)^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{K_i p_i}{1 - \frac{p_i}{p_i^*}}\right]}, \quad (6)$$

где  $a_i$  – текущее значение адсорбции  $i$ -й примеси;  $a_i^*$  – предельное значение адсорбции  $i$ -й примеси;  $K_i$  – константа Генри;  $p_i, p_i^*$  – парциальное давление на входе и парциальное давление при формировании объемной конденсации  $i$ -й примеси из смеси.



Рис. 3. Классификация известных технологий очистки от ВМП

Рассмотрим технологии, оптимальные для использования в имитационной модели [13].

**Адсорбционные методы.** Являются одним из самых распространенных средств защиты газовой среды от вредных микропримесей. Основное достоинством — возможность с помощью ряда фильтров удалить из газовой среды большое количество разнообразных химических загрязнителей, основной недостаток — ограниченность в управлении процессом. Сорбционные фильтры используются в ИСЖО в качестве вспомогательных средств.

Текущие значения удаляемых микропримесей регенерируемыми и нерегенерируемыми адсорбционными фильтрами [19]:

$$(M_i)^{ад,к}(\tau) = \eta_i C_i(\tau) \dot{V}_{ад,к} \frac{a_i(\tau)}{a_i^*}, \quad (7)$$

где  $(M_i)^{ад,к}$  – интенсивность поглощения  $i$ -й микропримеси;  $\dot{V}_{ад,к}$  – значение объемного расхода газовой среды, пропускаемой через адсорб-

ционный фильтр;  $\eta_i$  — эффективность удаления  $i$ -й микропримеси.

**Каталитические методы газоочистки.** Универсальны, дают возможность перерабатывать многокомпонентные газы с малыми начальными концентрациями ВМП, добиваться высоких степеней очистки, вести процесс непрерывно, избегать образования вторичных загрязнителей.

Текущие значения удаляемых микропримесей каталитическими фильтрами описываются выражением:

$$(\dot{M}_i)^{кф,j}(\tau) = \eta_i C_i(\tau) \dot{V}_{кф,j}, \quad (8)$$

где  $(\dot{M}_i)^{кф,j}$  — интенсивность каталитического окисления  $i$ -й микропримеси;  $\dot{V}_{кф,j}$  — значение объемного расхода газовой среды, пропускаемой через каталитический фильтр;  $\eta_i$  — эффективность удаления  $i$ -й микропримеси.

**2. В пассивном режиме стоком ВМП** являются системы концентрации и удаления  $CO_2$ , а также система кондиционирования газовой среды. Конечные продукты каждой из этих систем подвергаются дополнительной обработке при выполнении аппаратурой стандартного рабочего цикла, что также способствует очистке газовой среды ОГМ.

Интенсивность удаления  $i$ -й микропримеси системой концентрирования диоксида углерода:

$$(\dot{M}_i)^{СКДУ,j}(\tau) = \eta_i C_i(\tau) \left( \dot{V}_{СКДУ,j}(\tau) \frac{a_i(\tau)}{a_i^*} \pm \dot{V}_{сб,j}(\tau) \right), \quad (9)$$

где  $(\dot{M}_i)^{СКДУ,j}$  — интенсивность удаления  $j$ -й системой  $i$ -й микропримеси;  $\dot{V}_{СКДУ,j}(\tau), \dot{V}_{сб,j}(\tau)$  — объемные расходы потоков газовой среды на входе в систему и сбрасываемого в газовую среду или в вакуум на стадии десорбции адсорбента.

Интенсивность удаления  $i$ -й микропримеси системой кондиционирования газовой среды (СКГС)

$$(\dot{M}_i)^{СКГС} = \frac{M_{\mu i}}{RT} K_i^{раст} \frac{a_{ГС}}{\rho_{вп}} (\dot{V}_{ГС})^{СКГС}, \quad (10)$$

где  $a_{ГС}$  — абсолютная влажность потока газовой среды на входе в СКГС;  $K_i^{раст}$  — растворимость  $i$ -й микропримеси в воде;  $M_{\mu i}$  — молекулярная масса  $i$ -й микропримеси;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\rho_{вп}$  — плотность водяного пара;  $T$  — температура;  $(\dot{V}_{ГС})^{СКГС}$  — объемный расход потока газовой среды через СКГС.

**3. Внекорабельная деятельность и диффузионный обмен компонентами газовой среды с пристыковывающимися летательными аппаратами** являются не только источниками, но и соответствующими стоками ВМП конкретного ОГМ.

### Имитационная модель динамики вредных микропримесей в газовой среде обитаемого герметичного модуля

В связи с вышеизложенной информацией о ВМП, источниках и условиях их образования, способах и конкретных требованиях, предъявляемых к очистным системам, возникает вполне закономерная необходимость оптимизации предварительного этапа подготовки конкретной системы очистки для конкретной задачи. Большое количество нелинейно меняющихся факторов, преддустановок, условий требует от разработчиков максимально возможной внимательности и глубины расчетов [22, 23]. Следует также отметить высокую селективность имеющихся методов и применяемого оборудования. Существующие системы не способны проводить очистку газовой среды от всех видов микропримесей с оптимальной эффективностью, поэтому требуется комбинирование устройств.

При проектировании необходимо четко подобрать конфигурацию будущей системы очистки и обеззараживания ГС (СООГС). Для данных целей в работе предлагается использование методов имитационного моделирования.

Разрабатываемая имитационная модель (рис. 4) состоит из пяти основных разделов/подпрограмм:

1) Подпрограмма ввода. Здесь происходит задание/формирование стартовых условий для имитации, включающих в себя как эмпирически полученные параметры/константы, так и переменные/результаты subprocessов имитации других блоков.

2) Подпрограмма расчета интенсивности источников ВМП. Здесь происходят основные процессы имитации выделения микропримесей при

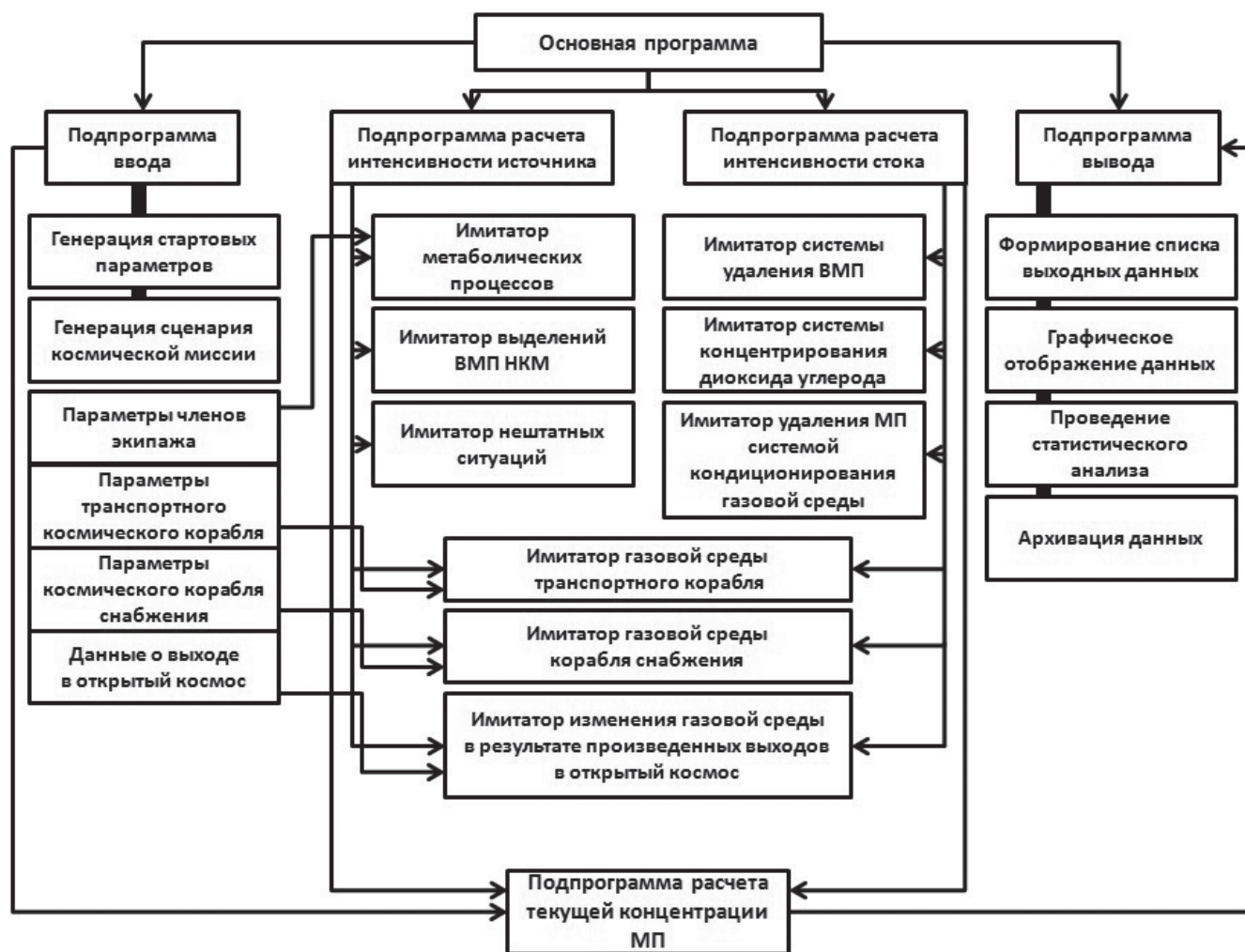


Рис. 4. Структура имитационной модели

учете стартовых параметров и любых требуемых/потенциально возможных условий.

3) Подпрограмма расчета интенсивности стоков. Здесь происходят процессы имитации устранения ВМП из газовой среды конкретного обитаемого герметичного объекта с учетом стартовых данных, любых требуемых/потенциально возможных условий, но главное – с учетом технологии очистки от ВМП. Именно данный оператор является ключевым элементом имитационной модели.

4) Подпрограмма расчета текущей концентрации МП – проводит вычисления с учетом всех результатов, полученных в результате имитационных процессов от предыдущих операторов; оперирует стеком формул операторов.

5) Подпрограмма вывода – фиксирует полученные в результате расчетов и имитаций данные. Проводит статистический анализ проводимых имитаций, сравнивает получаемые результаты с уже известными архивными данными, проводит архивацию полученной информации. Потенциально планируется расширение функции операто-

ра на предоставление «мнения» — в результате имитации и вычислений будет производиться выбор из списка представленных на рассмотрение технологий при учете задаваемого сценария космической миссии (в случае введения требования такого сравнения).

В качестве примера (рис. 5 и 6) продемонстрированы устройство и вид одного из блоков подпрограммы расчета интенсивности выделения ВМП, а именно выделения ВМП экипажем с учетом основных факторов – рациона, энергозатрат, параметров окружающей среды (влажность, температура).

Как видно из представленных рисунков, лицевая панель подпрограммы позволяет оперировать со всеми влияющими на выделения ВМП экипажем параметрами. Имеются контроллеры для задания конкретных временных промежутков в течение суточной активности, соответствующие не только штатному расписанию, но и потенциальной возможной внештатной деятельности. Программа иллюстрирует общее выделение наиболее



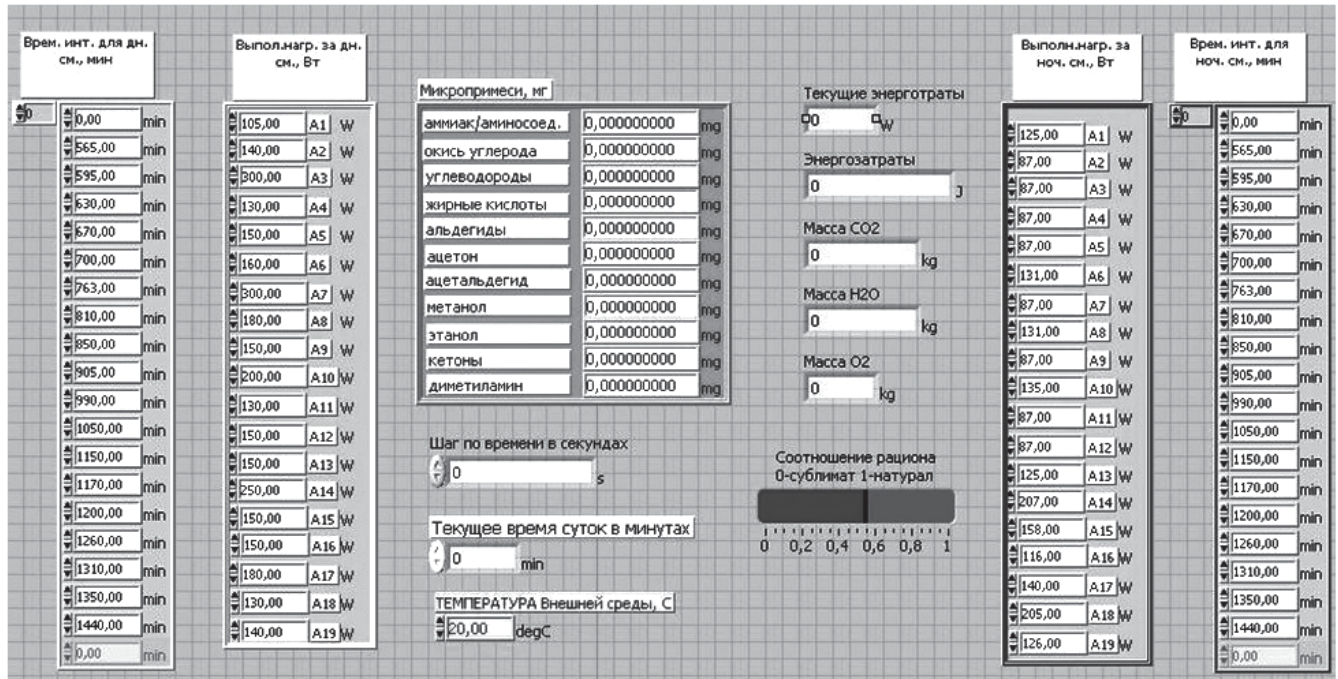


Рис. 5. Лицевая панель блока подпрограммы имитации выделения ВМП экипажем

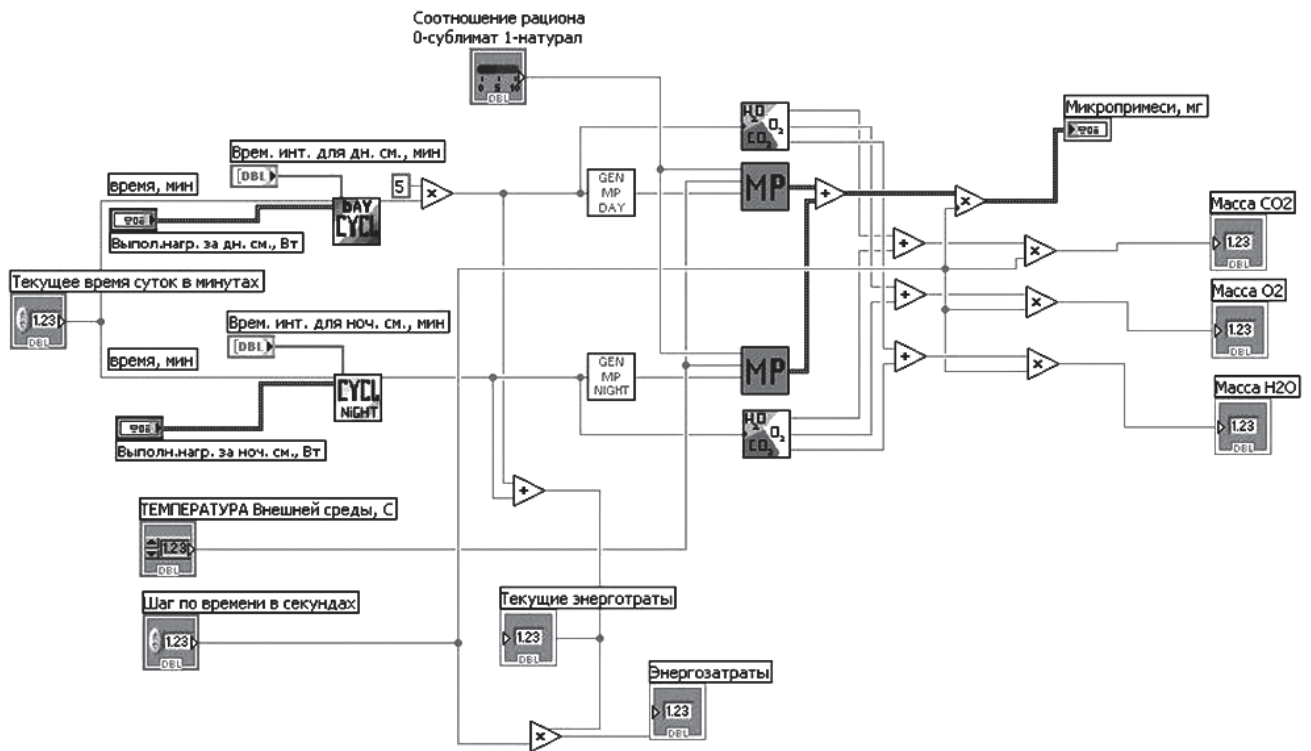


Рис. 6. Блок-диаграмма фрагмента предлагаемой имитационной модели

опасных и обильно выделяемых ВМП, регистрирует расход ресурсов (воды/кислорода). Отдельно стоит отметить гибкое реагирование программы на задаваемый/регистрируемый состав рациона членов экипажа, а именно на качественный состав принимаемой пищи. Как было установлено во множестве работ, в частности [17], сублимирован-

ная и натуральная пища оказывают различное влияние на количественный и качественный состав ВМП. В результате работы программы, в соответствии с задаваемыми стартовыми условиями, на лицевой панели происходит отображение данных по выделениям в виде, представленном на рис. 7.

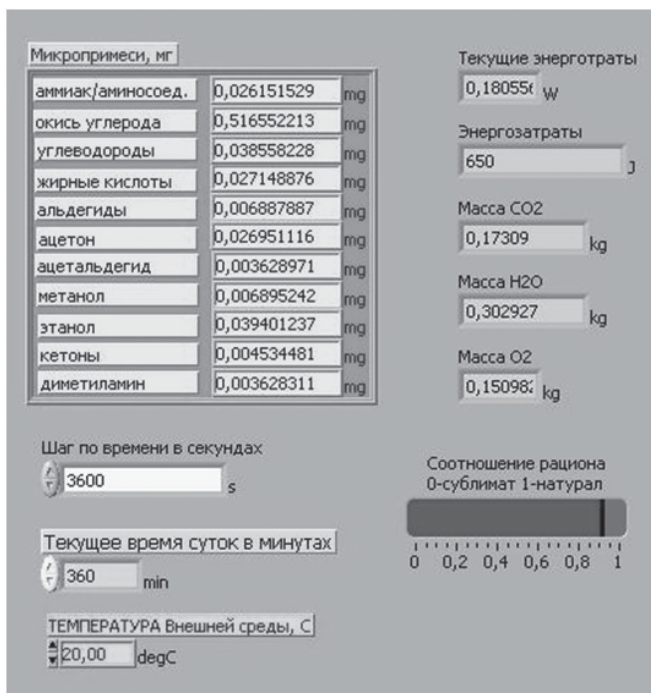


Рис. 7. Образец результатов расчета во время имитации

В данный момент проводятся работы по отладке большинства виртуальных приборов имитационной модели и их предварительному тестированию. Часть приборов будет модернизирована по результатам запланированного ряда экспериментальных испытаний. Блок вспомогательных подпрограмм находится в стадии разработки.

Запланировано дополнение для модели — «суб-процесс выбора», позволяющий в результате имитации иметь на руках не просто большой объем данных, полученных в результате виртуальной имитации, а полностью сформированное программой на их основе аргументированное предложение по выбору конкретной технологии/конструкции.

## Выводы

Показано, что при разработке качественно новых и модернизации уже существующих систем очистки газовой среды от микропримесей имитационное моделирование позволяет: компоновать систему для конкретных задач, прогнозировать поведение системы в течение периода ее эксплуатации, рассчитывать ее функциональную надежность.

Предложено структурное описание имитационной модели в опциональной программной среде, сформированное на основе имеющихся знаний об источниках, стоках, свойствах микропримесей.

Разработана базовая конфигурация имитационной модели, сфокусированная на основных элементах системы очистки атмосферы от микропримесей СБМП и сопутствующем оборудовании, эксплуатируемом на российском сегменте Международной космической станции.

Продемонстрирован пример работы одного из функциональных блоков модели, имитирующей выделение микропримесей членами экипажа, результаты которой отличаются от показателей ранее использовавшихся моделей не более чем на 15–20%.

## Библиографический список

- ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом полете. Общие медико-технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1995. — 122 с.
- NASA-STD-3001, NASA Space Flight Human-System Standard. Vol. 2 “Human Factors, Habitability, And Environmental Health” // National Aeronautics and Space Administration Washington, DC 20546-0001 — 196 p.
- Захарова Н.Г., Юрищева А.А., Карандин В.И., Рожков А.Г., Кыдралиева К.А. О перспективах использования наносорбентов и методов фракционирования в системах жизнеобеспечения космических полетов // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 189–197.
- Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Курмазенко Э.А. Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых космических полетов: предварительный анализ // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 17–24.
- Нефедов Ю.Г. Обитаемость космических кораблей // Космическая медицина и биология: Сб. статей. — М.: Знание, 1978. — 64 с.
- Дмитриев М.Т., Малышева А.Г., Растянников Е.Г. Специфические органические соединения в продуктах жизнедеятельности // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1987. Т. 21. № 4. С. 50–56.
- Conkle J.P., Mabson W.E., Adams J.D., Zeff H.J., Welch B.E. Detailed study of contaminant production in a space cabin simulator at 760 mm of mercury // Aerospace Medical. 1967. Vol. 38. No. 5, pp. 491–499.
- Соломин Г.И. Гигиенические вопросы, связанные с применением полимерных материалов в гермозамкнутых помещениях // Проблемы космической биологии: Сб. статей. Т. 42. Санитарно-гигиенические и физиологические аспекты обитаемых космических кораблей. — М.: Наука, 1980. С. 43–67.
- Мухамедиева Л.Н., Гузенберг А.С., Пахомова А.А., Юргин А.В., Смирнов Ю.А. Токсикологические аспекты управления качеством воздушной среды ор-

- битальных станций // Международная космическая станция, Российский сегмент. Космическая биология и медицина: Сб. научных статей. — Воронеж: Научная книга, 2011. — Т. 1. Медицинское обеспечение экипажей МКС. С. 299-315.
10. Яблочкин В.Д. Разработка мер по предупреждению загрязнения атмосферы герметически замкнутых помещений // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1975. Т. 9. № 4. С. 27-30.
  11. Соломин Г.И. К проблеме комплексной токсиколого-гигиенической оценки конструкционных полимерных материалов // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1985. Т. 19. № 5. С. 92-95.
  12. Finkenor M.M. Materials for Spacecraft. Chapter 6 ID 20160013391, M16-5055 // NASA Marshall Space Flight Center; Huntsville, AL, United States. 2016, 29 p.
  13. Злотопольский В.М. Технологические основы адаптивной физико-химической системы жизнеобеспечения человека: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: Институт медико-биологических проблем, 1999. — 347 с.
  14. Газенко О.Г., Кальвин М. Основы космической биологии и медицины. Т. II. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. Кн. 2. — М.: Наука, 1975. С. 76.
  15. Александров Н.Л., Высикайло Ф.И., Исламов Р.Ш. и др. Функция распределения электронов в смеси N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=4:1 // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 1. С. 22-27.
  16. Jansson B.O., Larsson B.T. Analysis of organic compounds in human breath by gas chromatography-mass spectrometry // Journal of Laboratory and Clinical Medicine. 1969. Vol. 74. No. 6, pp. 961-966.
  17. Савина В.П., Кузнецова Т.И. Источники микропримесей и их токсикологическая оценка // Проблемы космической биологии: Сб. статей / Под ред. В.Н. Черниговского. — М.: Наука, 1980. — 286 с.
  18. Савина В.П., Нефедов Ю.Г., Соколов Н.Л. и др. Исследование микропримесей в выдыхаемом человеком воздухе // Космическая биология и медицина. 1969. Т. 3. №5. С. 71-87.
  19. Курмазенко Э.А., Громов Д.Г., Коробков А.Е., Кочетков А.А., Цыганков А.С., Козлов Д.В., Калинько П.А., Кирюшин О.В., Пушкарь О.Д. Фотокаталитическая система обеззараживания и очистки атмосферы обитаемых модулей космических аппаратов от микропримесей // Пилотируемые полеты в космос. 2016. № 3(20). С. 88-100.
  20. Матрос Ю.Ш., Носков А.С. Обезвреживание газобразных выбросов промышленных производств // Успехи химии. 1990. Т. 59. № 10. С. 1700-1727.
  21. Kurmazenko E.A., Samsonov N.M., Gavrilov L.I., Farafonov N.S., Dokunin I.V., Pavlova T.N., Shumyatsky I.I. Model for simulation of pollution dynamics for the design concept of TCRS // SAE Technical Papers. 2005. No. 1, 12 p.
  22. Крючков Б.И. Моделирование процессов технической эксплуатации комплексов систем обеспечения жизнедеятельности экипажей пилотируемых космических аппаратов: Разработка теоретических основ и практических методов: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: Институт медико-биологических проблем, 1996. — 553 с.
  23. Морозов Г.И. Теоретические основы проектирования систем жизнеобеспечения. — М.: Наука, 1977. — 256 с.

## SIMULATION AS A SUBSTANTIATION OF THE TRACE CONTAMINANTS REMOVAL SYSTEM SELECTION

**Shustrov T.L.**

*NIIhimmash,*

*14, B. Novodmitrovskaya str., Moscow, 127015, Russia*

*e-mail: tistrov@gmail.com*

### Abstract

The article is dedicated to one of the most important problems while preparing any potential long-term or interplanetary space missions, namely the inefficiency of the life support subsystems employed at the habitable spacecraft. The article focuses mainly on the trace contaminants removal system (TCRS) being an important element of the space object life support system. It purifies the atmosphere of an object

from any contaminants, and keeps it at the predetermined chemical balance.

The main hazards requiring permanent system regeneration and its keeping at the maximal possible technical level are as follows:

- Atypical habitability conditions at the space object;

- The crew impact (chemicals secretion as a metabolism result), as well as the spacecraft itself

(chemicals emission as a result of degradation of coverings, used for internal plating, ) on the artificial living space.

The artificial atmosphere of any isolated airtight object is affected by its inhabitants, which could lead to the sensitive equipment failures, destructive emergencies, and deaths among the crewmembers. The presented article suggests employing simulation model as an attempt to improve the design and production of the future trace contaminants removal systems. The model allows computing the resulting amount of trace contaminants formed by any number of potential sources. The model structure provides the designer with maximum flexibility while the process regulation, which might help while creating individual configuration of the trace contaminants removal systems with account for the space mission scenario.

The article presents mathematical/technical description, structure, and examples of the simulations results. Most subprocesses are at the final stage of testing. The simulation results correspond to the telemetry data from the space station. In the future, after the final testing the authors plan to create the “artificial helper” for the model that will perform automatic selection of the trace contaminants removal system based on the results obtained after the simulation.

**Keywords:** space object life support system, space object gas medium, manned spacecraft habitability, trace contaminants formation, trace contaminants properties, trace contaminants removal, modelling of equipment for gas media purification from trace contaminants, simulation of substances emission into gas medium.

## References

1. *Sreda obitaniya kosmonavta v pilotiruемом kosmicheskom polete. Obshchie mediko-tehnicheskie trebovaniya. GOST R 50804-95* (Astronaut habitat in manned space flight. General medical and technical requirements. State Standard R 50804-95), Moscow, Standarty, 1995, 122 p.
2. NASA-STD-3001, *NASA Space Flight Human-System Standard. Vol. 2 “Human Factors, Habitability, And Environmental Health”*. National Aeronautics and Space Administration Washington, DC 20546-0001, 196 p.
3. Zakharova N.G., Yurishcheva A.A., Karandin V.I., Rozhkov A.G., Kydraliev K.A. On the usage prospects of nanosorbents and fractionation methods in the space live support systems. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 189-197.
4. Bobe L.S., Gavrilov L.I., Kurmazenko E.A. Development prospects for regenerating life support systems in regard to long-term manned space flights: A preliminary analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 17-24.
5. Nefedov Yu.G. *Kosmicheskaya meditsina i biologiya. Sbornik statei*, Moscow, Znanie, 1978, 64 p.
6. Dmitriev M.T., Malysheva A.G., Rastyannikov E.G. *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 50-56.
7. Conkle J.P., Mabson W.E., Adams J.D., Zeft H.J., Welch B.E. Detailed study of contaminant production in a space cabin simulator at 760 mm of mercury. *Aerospace Medical*, 1967, vol. 38, no. 5, pp. 491-499.
8. Solomin G.I. *Problemy kosmicheskoi biologii. Sbornik statei. Vol. 42 “Sanitarno-gigienicheskie i fiziologicheskie aspekty obitaemykh kosmicheskikh korablei”*, Moscow, Nauka, 1980, pp. 43-67.
9. Mukhamedieva L.N., Guzenberg A.S., Pakhomova A.A., Yurgin A.V., Smirnov Yu.A. *Mezhdunarodnaya kosmicheskaya stantsiya, Rossiiskii segment. Kosmicheskaya biologiya i meditsina. Sbornik nauchnykh statei. Voronezh, Nauchnaya kniga*, 2011, vol. 1, pp. 299-315 (376 p.)
10. Yablochkin V.D. *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina*, 1975, vol. 9, no. 4, pp. 27-30.
11. Solomin G.I. *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina*, 1985, vol. 19, no. 5, pp. 92-95.
12. Finkenor M.M. Materials for Spacecraft. Chapter 6 ID 20160013391, M16-5055. *NASA Marshall Space Flight Center*, Huntsville, AL, United States. 2016, 29 p.
13. Zlotopol'skii V.M. *Tekhnologicheskie osnovy adaptivnoi fiziko-khimicheskoi sistemy zhizneobespecheniya cheloveka* (Technological fundamentals of adaptive physico-chemical human life-support system), Doctor's thesis, Moscow, Institut mediko-biologicheskikh problem, 1999, 347 p.
14. Gazenko O.G., Kal'vin M. *Osnovy kosmicheskoi biologii i meditsiny. T. II. Ekologicheskie i fiziologicheskie osnovy kosmicheskoi biologii i meditsiny, kn. 2* (Fundamentals of Space Biology and Medicine. Vol. II. Ecological and physiological basics of space biology and medicine, book 2), Moscow, Nauka, 1975, p. 76.
15. Aleksandrov N.L., Vysikailo F.I., Islamov R.Sh. *Teplofizika vysokikh temperature*, 1981, vol. 19, no. 1, pp. 22-27.
16. Jansson B.O., Larsson B.T. Analysis of organic compounds in human breath by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 1969, vol. 74, no. 6, pp. 961-966.
17. Savina V.P., Kuznetsova T.I. *Problemy kosmicheskoi biologii*. Moscow, Nauka, 1980, vol. 42, 286 p.
18. Savina V.P., Nefedov Yu.G., Sokolov N.L. *Kosmicheskaya biologiya i meditsina*, 1969, vol. 3, no. 5, pp. 71-87.
19. Kurmazenko E.A., Gromov D.G., Korobkov A.E., Kochetkov A.A., Tsygankov A.S., Kozlov D.V., Kalin'ko P.A., Kiryushin O.V., Pushkar' O.D. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2016, no. 3(20), pp. 88-100.

20. Matros Yu.Sh., Noskov A.S. *Uspekhi khimii*, 1990, vol. 59, no. 10, pp. 1700-1727.
21. Kurmazenko E.A., Samsonov N.M., Gavrilov L.I., Farafonov N.S., Dokunin I.V., Pavlova T.N., Shumyatsky I.I. Model for simulation of pollution dynamics for the design concept of TCRS. *SAE Technical Papers*, 2005, no. 1, 12 p.
22. Kryuchkov B.I. *Modelirovanie protsessov tekhnicheskoi ekspluatatsii kompleksov sistem obespecheniya zhiznedeyatel'nosti ekipazhei pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov* (Technological operation processes modeling of complexes of a manned spacecraft crew life support system), Doctor's thesis, Moscow, Institut mediko-biologicheskikh problem, 1996, 553 p.
23. Morozov G.I. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya sistem zhizneobespecheniya* (Theoretical basics of life support systems design), Moscow, Nauka, 1977, 256 p.