

УДК 629.7.048

Прогнозирование функционирования перспективной системы обеспечения газового состава для длительных автономных пилотируемых космических полетов

Глебов И.В.^{1*}, Курмазенко Э.А.^{2}, Романов С.Ю.^{1*}, Железняков А.Г.^{1*}**

¹Ракетно-космическая корпорация "Энергия",

ул. Ленина, 4а, Королёв, Московская обл., 141070, Россия

²Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения, Б. Новодмитровская ул., 14, Москва, 127015, Россия

** e-mail: post@rsce.ru*

*** e-mail: kurmazenko@niichimmash.ru*

Аннотация

Статья посвящена решению задачи прогнозирования функционирования перспективной регенерационной системы обеспечения газового состава (РСОГС) пилотируемого космического аппарата (ПКА), проектируемой для длительных автономных пилотируемых космических полетов за пределы околоземных орбит. Предложены формализованные описания отдельных блоков системы и имитационная модель для проведения анализа функционирования. Приведены результаты предварительных вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: пилотируемый космический аппарат, регенерационная система обеспечения газового состава, система переработки диоксида углерода, прогнозирование функционирования, имитационное моделирование,

формализованное описание.

Основные условные обозначения

- D*** – доза поступающего продукта;
- H*** – энтальпия, Дж;
- F*** – площадь поверхности, м²;
- G*** – массовый расход, кг/с;
- K*** – положение регулирующего клапана;
константа равновесия, Па
- M*** – масса газа в емкости, кг;
- N*** – электрическая мощность, Вт;
- R*** – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)
- S_l*** – сигнальная функция;
- T*** – температура, К;
- V*** – объем, м³;
- W*** – скорость химической реакции;
- a*** – динамическая емкость адсорбента, кг/дм³;
безразмерный коэффициент;
- b*** – безразмерный коэффициент;
- c*** – теплоемкость, Дж/(кг·К);
- k*** – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
- m*** – масса, кг;
- p*** – давление, кПа
- α*** – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
- ε*** – пористость;
- τ*** – время, с

Введение

Проблема создания и поддержания условий, обеспечивающих жизнь и деятельность экипажей ПКА при длительных автономных космических полетах за пределы околоземных орбит, является одной из важнейших научно-технических задач, связанной с освоением человеком дальнего космического пространства.

Результаты анализа функционирования РСОГС Российского Сегмента Международной космической станции (МКС) и схемных и конструктивных решений, принятых в опытных образцах американских, европейских и японских систем, предназначенных для околоземных орбитальных полетов, показывают, что[1]:

1. Условия эксплуатации отличаются от условий наземной отработки.
2. Проектные недостатки проявляются при длительной эксплуатации систем на борту МКС.
3. Информационное сопровождение является недостаточным для контроля технического состояния систем на борту МКС.
4. Системы имеют недостаточный проектный ресурс, вследствие чего эксплуатируются за его пределами, и требуют постоянной доставки с Земли и замена вышедших из строя агрегатов и блоков.

Условия эксплуатации систем, предназначенных для пилотируемых космических аппаратов с длительным сроком автономного существования за пределами околоземных орбит характеризуются:

- большой длительностью нахождения экипажа в ограниченном изолированном пространстве, предопределяющей необходимость

расширения выполняемых функций РСОГС в части проведения оперативного мониторинга параметров атмосферы ПКА;

- автономностью пилотируемого космического полета, определяющей невозможность возобновления и доставки расходуемых материалов, узлов аппаратов и продуктов, необходимых для обеспечения жизнедеятельности экипажа;
- необходимостью самостоятельного принятия решений экипажем по идентификации и локализации вероятных нештатных ситуаций в РСОГС, зависящей от скорости передачи информации.

С учетом условий автономного космического полета и действующих ограничений на разработку РСОГС особые требования предъявляются к процессу проектирования данных систем:

- необходимость учета вероятных отказов и нештатных ситуации при постановке задачи проектирования в условиях ограничения по запасным частям и расходуемым материалам;
- необходимость выбора простейших технологических решений для обеспечения безотказного функционирования проектируемой системы;
- прогнозирование функционирования системы с учетом взаимосвязей отдельных РСОГС между собой, с другими системами ПКА (системой электропитания (СЭП), системой терморегулирования (СТР) и др.), экипажем и атмосферой ПКА и вероятных нештатных ситуаций на всех стадиях проектирования.

Точность любого прогноза о безотказном функционировании¹ сложной системы зависит от объема и степени неопределенности исходной информации о свойствах системы, которая зависит от уровня технической готовности разрабатываемой системы.

На различных стадиях проектирования РСОГС в качестве основного метода анализа функционирования системы используется метод имитационного моделирования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения необходимого объема информации. При этом имитационная модель рассматривается как логико-математическое описание объекта, реализованное в программном обеспечении, позволяющее проводить вычислительные эксперименты.

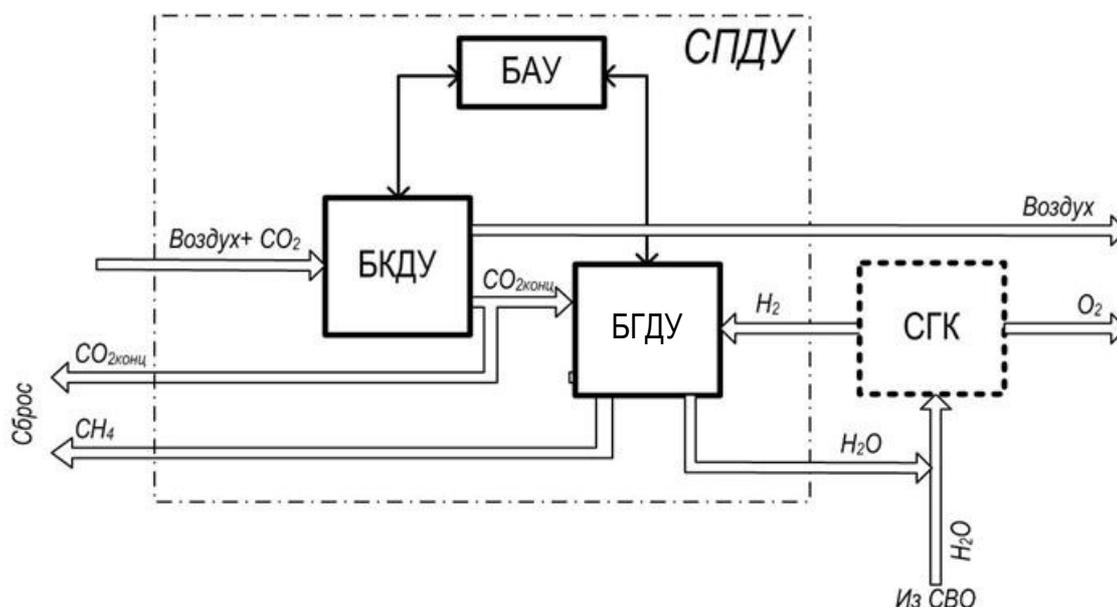
В статье на примере РСОГС рассматривается применение данного подхода к прогнозированию функционирования.

Регенерационная система обеспечения газового состава как объект прогнозирования функционирования

Структурная схема перспективной РСОГС, выбранной в качестве объекта прогнозирования функционирования, приведена на рис.1. Система предназначена для удаления из газовой среды обитаемого модуля диоксида углерода, его концентрирования до 99% и последующей переработки по реакции

¹ Функционирование – безотказная эксплуатация системы по заданному алгоритму. ГОСТ 20911-75. Техническая диагностика. Термины и определения.

гидрирования до газообразных веществ: метана и паров воды.

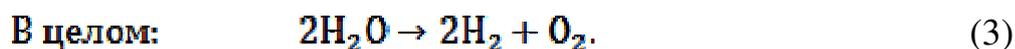
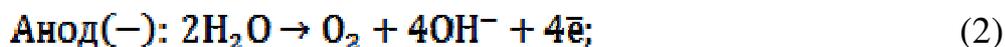
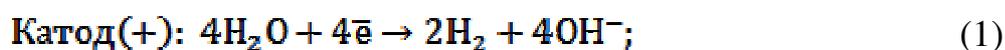


СПДУ – система переработки диоксида углерода, БКДУ и БГДУ – блок концентрирования диоксида углерода и блок гидрирования диоксида углерода, БАУ – блок автоматического управления; СГК – система генерации кислорода на основе электролиза воды из раствора электролита – щелочи

Рис. 1. Структурная схема перспективной PCOGS

Метан подлежит сбросу в Космос или использованию как топлива в двигателе ориентации, а пары воды после конденсации в жидкой фазе подаются в систему генерации кислорода.

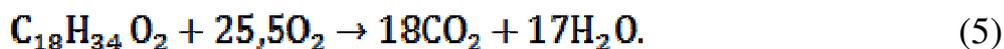
При потреблении 0,84 кг O₂/чел·сут выделяется 1,0 кг CO₂/чел·сут и ≈ 1,6×10⁻⁵ кг микропримесей/чел·сут. Из одного литра воды, поступающей на электролиз в систему генерации кислорода, может быть продуцировано 0,89кг кислорода и 0,11кг водорода в соответствии с электрохимическими реакциями вида



При проведении реакции гидрирования диоксида углерода (реакции Сабатье), исходя из степени превращения $\alpha = 1$, можно получить

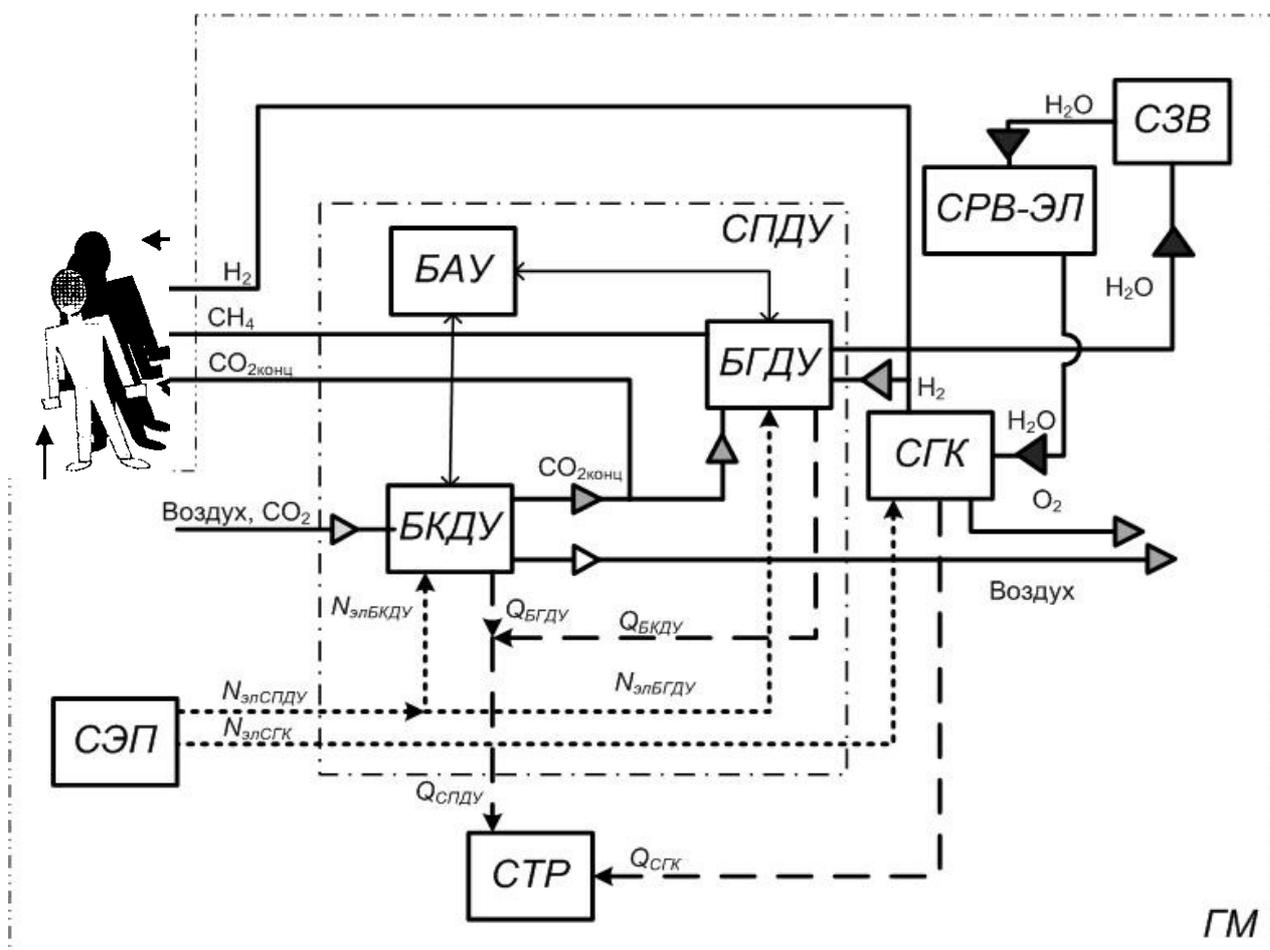


Чистый выход реакции, учитывающий процессы метаболизма экипажа, составит



По данной реакции может быть переработано $\approx 62,5\%$ выделяемого экипажем диоксида углерода. Для экипажа численностью 3 человека при потреблении кислорода 2,54 кг/сут введение в состав комплекса систем жизнеобеспечения СПДУ позволит уменьшить расход воды на генерацию кислорода с 2,85 л/сут до 1,41 л/сут. Для экипажа, численностью 6 человек количество продуцируемой воды составит $\approx 2,8$ л/сут. Экономия массовых затрат от применения системы СПДУ в год составит, соответственно, для экипажа 3 человека – 2121 кг/год и для экипажа 6 человек – 4242 кг/год, учитывая, что относительная масса емкостей составляет 0,15 кг/кг воды [2].

Рассматриваемая система характеризуется сложными взаимосвязями между входящими в нее блоками, характеризующимися различными во времени режимами функционирования (непрерывным – для БГДУ и циклическим – для БКДУ) и сложным взаимодействием при функционировании как между отдельными блоками системы, так и с системами генерации кислорода и водообеспечения и со звеньями внешней среды, такими как СЭП и СТР, «экипаж», «искусственная газовая атмосфера обитаемого модуля» (рис.2).



СПДУ – система переработки диоксида углерода; БКДУ – блок концентрирования диоксида углерода; БГДУ – блок гидрирования диоксида углерода; БАУ – блок автоматического управления; СГК – система генерации диоксида углерода; СЗВ – система запасов воды; СРВ-ЭЛ – система регенерации воды для электролизера; СТР – система терморегулирования; СЭП – система электропитания

Рис.2. Схема интерфейсов системы переработки диоксида углерода

Формализованное описание объекта прогнозирования функционирования

В соответствии с действующими интерфейсами имитационная модель, предназначенная для прогнозирования функционирования СПДУ, должна иметь соответствующую структуру, предназначенную для выполнения поставленной цели.

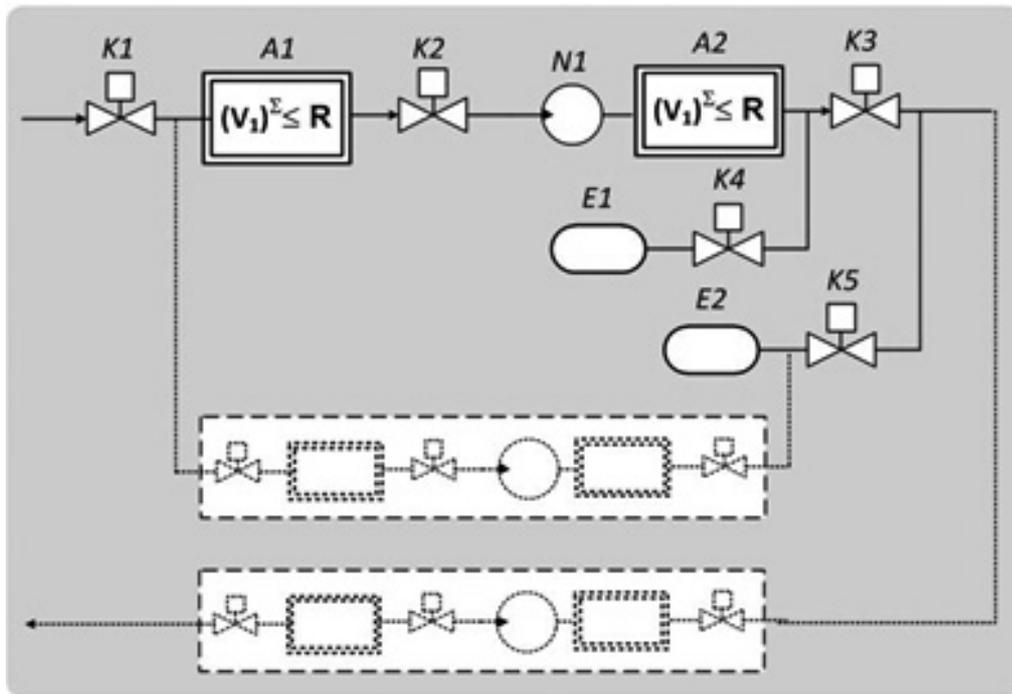
Структура имитационной модели и функции отдельных ее компонентов приведены на рис. 3.



Рис. 3. Функции и структура программного обеспечения

Для формирования формализованного описания технологических блоков концентрирования и гидрирования диоксида углерода принят подход, основанный на их представлении в виде «агрегативной схемы» (рис. 4) [3], основанной на следующих допущениях:

- блок рассматривается как совокупность аккумулирующих и проточных массовых и/или тепловых резервуаров, клапанов и побудителей расходов;
- связи между аппаратами и емкостями, с другими системами и звеньями внешней среды и направления технологических потоков определяются логикой функционирования моделируемого функционального блока;
- формирование контрольных сигналов, отражающих взаимодействия в структуре функционального блока, описывается системой логических высказываний, описывающих алгоритм функционирования блока.



А – аппарат; Е – емкость; К – клапан; N – побудитель расхода

Рис.4. Расчетная схема отдельного блока

Формализованное описание «агрегатной» схемы имеет вид

$$V_j(\tau) = V_j(\tau - \Delta\tau) + \sum_{l=1}^m (D_{1l} V_{lj} \int_{t=0}^{\tau} G_{1j} d\tau) K_1 \mp \dots \mp \sum_{n=1}^n (D_{1n} V_{nj} \int_{t=0}^{\tau} G_{1j} d\tau) K_n; \quad (6)$$

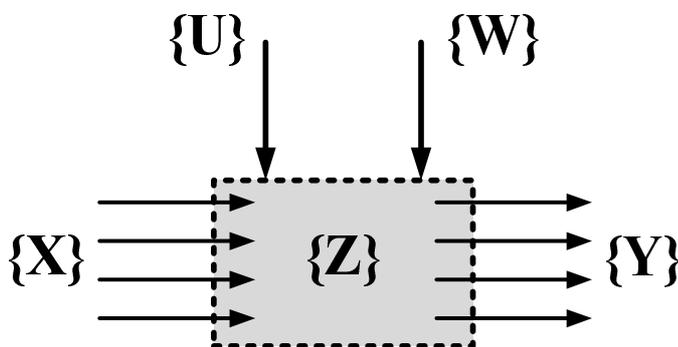
$$\prod_{l=1}^k (S_l) = 1 \Rightarrow (K_n = 1); \quad \prod_{l=1}^k (S_l) = 0 \Rightarrow (K_n = 0); \quad (7)$$

$$\prod_{n=1}^m (S_n) = 1 \Rightarrow (K_l = 1); \quad \prod_{n=1}^m (S_n) = 0 \Rightarrow (K_l = 0). \quad (8)$$

В зависимостях (6) ÷(8) приняты следующие обозначения: $V_{ij}(\tau)$ – текущее значение заполненного объема; D_{ij} –число поступающих доз продукта; G_{ij} – массовый расход технологического потока; K_n – обозначение клапана; S_l , S_n –сигнальная функция.

Каждый технологический аппарат, входящий в «агрегатную» схему, описывается в форме дискретно-детерминированной модели, основанной на теории конечных автоматов [4,5], т.е. формализуется в виде некоторого устройства, на вход

которого подаются входные сигналы, а с выхода снимаются выходные сигналы (рис. 5).



$\{X\}$ - алфавит входных параметров состояния; $\{Y\}$ - алфавит выходных параметров состояния; $\{Z\}$ - алфавит внутренних параметров состояния; $\{U\}$ - алфавит управляющих параметров состояния; $\{W\}$ - алфавит внешних и внутренних возмущающих воздействий

Рис.5. Представление технологического аппарата в форме дискретно-детерминированной модели

При этом формирование алфавита внутренних состояний основано на формализованном описании процессов, протекающих внутри аппарата.

В качестве примера ниже приведены расчетные схемы и формализованные описания алфавита внутренних состояний каталитического реактора БГДУ и адсорбера БГДУ, основанные на приближении «идеального смешения».

Расчетная схема каталитического реактора приведена на рис. 6.

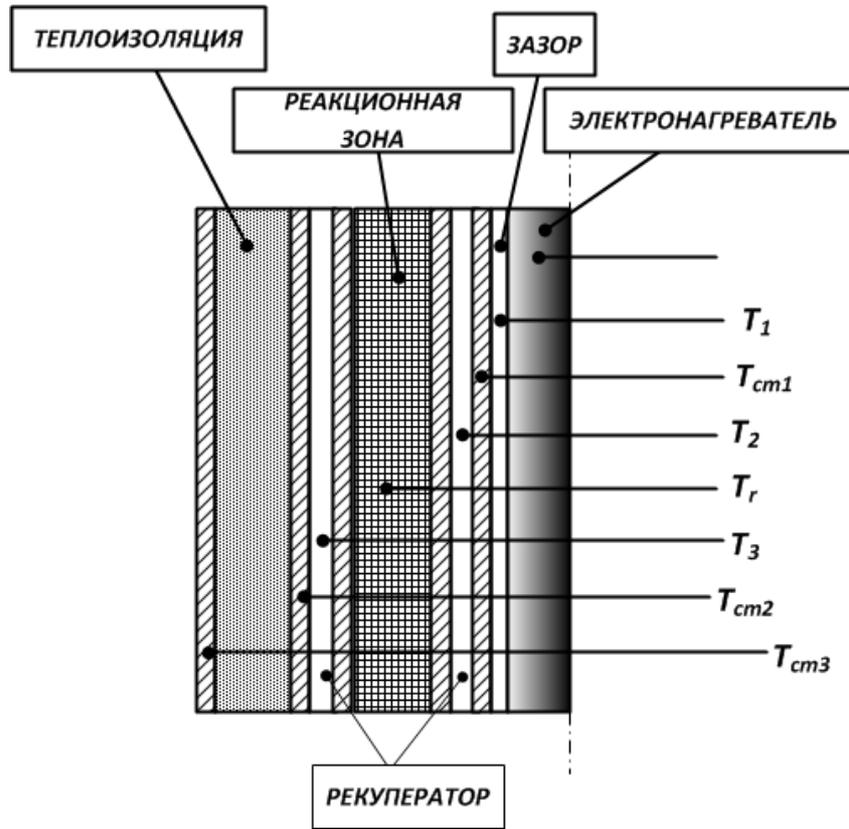


Рис. 6. Расчетная схема реактора

Формализованное описание каталитического реактора основано на следующих зависимостях

$$c_p^{elh} m \frac{dT_{elh}}{dx} = N_{elh} - \alpha_1 F_1 (T_{elh} - T_1)$$

$$T_{elh}(\tau) = T_{elh}(\tau - \Delta\tau) + (N_{elh} - \alpha_1 (T_{elh} - T_1)) \Delta\tau \quad (9)$$

$$(c_p \rho V)^3 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_1 F_1 (T_{elh} - T_1) - \alpha_1 F_2 (T_1 - T_{ct1}); \quad (10)$$

$$(c_p \rho V)^{ct1} \frac{dT_{ct1}}{dx} = \alpha_1 F_1 (T_1 - T_{ct1}) - \alpha_2 F_2 (T_1 - T_{ct1}); \quad (11)$$

$$(c_p \rho V)^2 \frac{dT_2}{dx} = c_p G_2 (T_{in} - T_2) + k_3 F_3 (T_2 - T_r) - \alpha_2 F_2 (T_2 - T_{ct1}); \quad (12)$$

$$(c_p \rho V)^r \frac{dT_r}{dx} = c_p G^r (T_2 - T_r) k_3 F_3 (T_2 - T_r) - k_4 F_4 (T_r - T_3) + \Delta \tilde{H}_r W(x, T_r) V_r; \quad (13)$$

$$(c_p \rho V)^3 \frac{dT_3}{dx} = c_p G_3 (T_{in} - T_3) - k_5 F_5 (T_3 - T_{env}) + k_4 F_4 (T_r - T_3) \quad (14)$$

$$C_0 \frac{dx(\tau)}{dx} = C_0 l_r x(\tau - \Delta\tau) + v W(x, T_r) V_r; \quad (15)$$

$$W(x, T_r) = \frac{S_{sp} \rho_r}{3600 V_{\mu}^n} \cdot \frac{K_1 (\alpha - 4x) (1 - x) p}{s \left(K_2 (\alpha - 4x) + 1 - x + K_3 \frac{s}{p} \right)} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{(\beta + x) (\gamma + 4x)^2 s^2}{K_r (1 - x) ((\alpha - 4x))^4 p^2} \right); \quad (16)$$

$$s = 1 + \alpha + \beta + \gamma + \delta - 2x; \quad (17)$$

$$p_{CO_2}^{output}(\tau) = 0,5 \left(p_{CO_2}(\tau) - \left(p_{CO_2}^2(\tau) - \frac{4G_{CO_2}^{output}}{(0,95f \cdot 3/kRT)^{0,5}} \right)^{0,5} \right), \quad (18)$$

где

$$\alpha = \frac{C_{CO_2}^0}{C_{H_2}^0}; \quad \beta = \frac{C_{CH_4}^0}{C_{CO_2}^0}; \quad \gamma = \frac{C_{H_2O}^0}{C_{CO_2}^0}; \quad \delta = \frac{C_{N_2}^0}{C_{CO_2}^0}; \quad K_1 = 1,03 \times 10^9 \exp\left(-\frac{10320}{T_r}\right);$$

$$K_2 = 7,64 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{2620}{T_r}\right); \quad K_3 = 2,02 \times 10^4 \exp\left(-\frac{5300}{T_r}\right).$$

Работа блока БГДУ, принципиальная схема которого приведена на рис. 7, осуществляется в циклическом режиме. Входящие в блоки ФБ2 и ФБ4 адсорберы работают в циклическом режиме, включающем две последовательные стадии: адсорбцию и десорбцию.

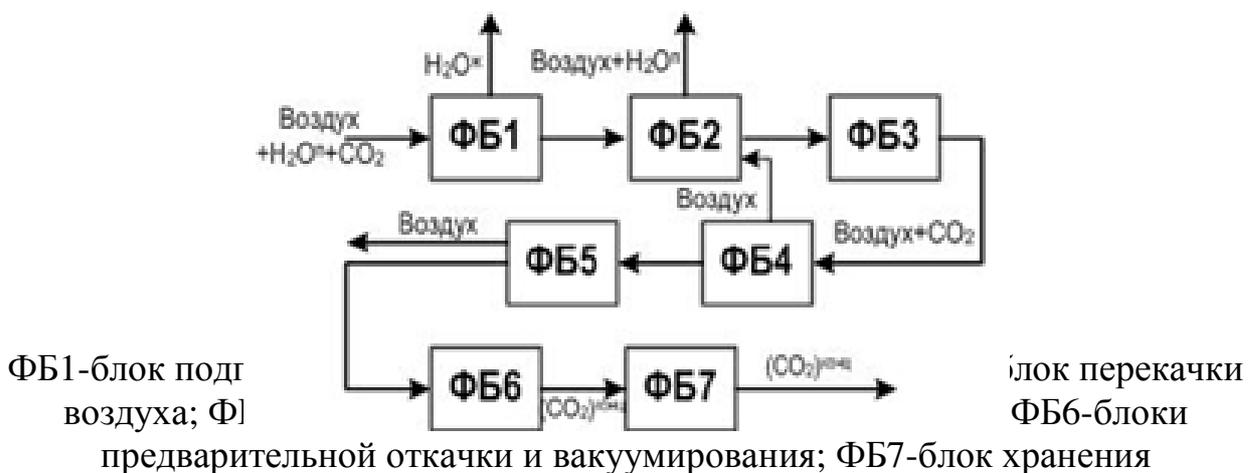


Рис. 7. Принципиальная схема БГДУ

Для составления формализованного описания адсорберов в качестве исходного применено приближение Льюиса, учитывающее одновременное поглощение паров и диоксида углерода, вида

$$\frac{a_{CO_2}}{a_{CO_2}^0} + \frac{a_{H_2O}}{a_{H_2O}^0} = 1; \quad (19)$$

При данном приближении формализованное описание адсорбера для стадии адсорбции может быть записано в виде

$$\varepsilon \frac{dC^{H_2O^*}}{d\tau} + (1 - \varepsilon) \frac{da^{H_2O}}{d\tau} = 0; \quad (20)$$

$$\varepsilon \frac{dC^{CO_2^*}}{d\tau} + (1 - \varepsilon) \frac{da^{CO_2}}{d\tau} = 0; \quad (21)$$

$$\varepsilon c_{p,a} \frac{dT_s}{d\tau} = \alpha(T_s - T_w) - kF_{sur}(T_w - T_s); \quad (22)$$

$$(1 - \varepsilon) c_{p,s} \frac{dT_s}{d\tau} = \alpha(T_w - T_s) - r_{adc} (1 - \varepsilon) \frac{da^{H_2O}}{d\tau}. \quad (23)$$

Для стадии десорбции формализованное описание имеет вид

$$\frac{da^{H_2O^*}}{d\tau} = -b^{H_2O} \frac{s}{\rho} (C^{H_2O} - dC^{H_2O^*}); \quad (24)$$

$$\frac{da^{CO_2^*}}{d\tau} = -b^{CO_2} \frac{s}{\rho} (C^{CO_2} - dC^{CO_2^*}); \quad (25)$$

$$(1 - \varepsilon) c_{p,s} \frac{dT_s}{d\tau} = r_{adc} (1 - \varepsilon) \frac{da^{H_2O}}{d\tau}. \quad (26)$$

В выражениях (20)-(26)

$$a^{H_2O} = f_1(C^{H_2O^*}, T_s); \quad a^{CO_2} = f_2(C^{CO_2^*}, T_s);$$

$$C^{H_2O^*} = f_3(a^{H_2O}, T_s); \quad C^{CO_2^*} = f_4(a^{CO_2}, T_s).$$

Рис. 8. Фронтальные панели программ,

входящих в имитационную модель РСОГС

Программа «экипаж», основанная на формализованном описании, основанном на уточненной международной модели «условного человека», работает в фоновом режиме.

Предварительные вычислительные эксперименты

Разработанная имитационная модель РСОГС была апробирована для определения функций и требований блока согласующего оборудования, необходимого для обеспечения совместной работы БКДУ и БГДУ, характеризующихся различными временными режимами функционирования.

На рис. 9 приведена расчетная схема, примененная для выбора параметров блока согласующего оборудования.

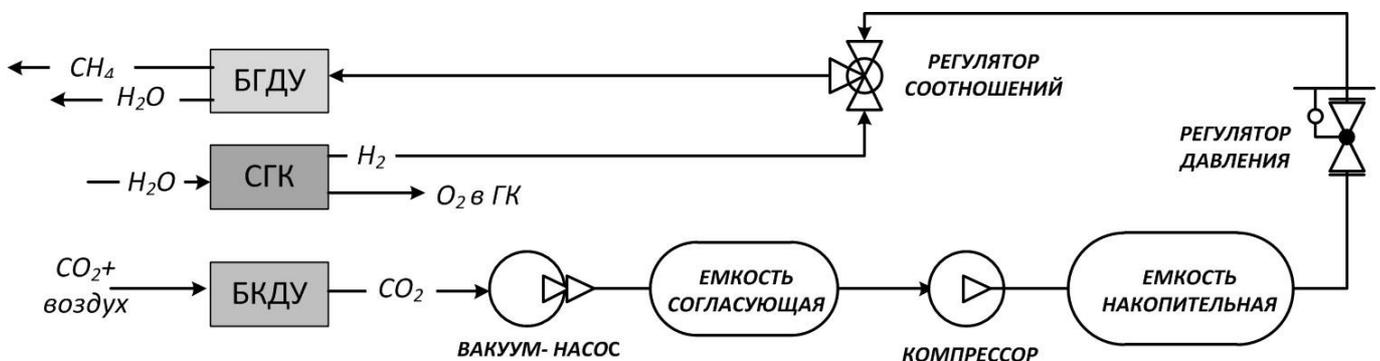


Рис. 9. Расчетная схема блока согласующего оборудования

Уравнения, описывающие динамику содержания диоксида углерода в согласующей и накопительной емкостях, имеют вид

$$\frac{dM_s}{d\tau} = G_{CO_2}^{input,s}(\tau) - G_{CO_2}^{output,s}(\tau); \quad (27)$$

$$\frac{dM_{ac}}{d\tau} = G_{CO_2}^{output,s}(\tau) - G_{CO_2}^{output,ac}(\tau); \quad (28)$$

При условии, что объем накопительной емкости много больше объема магистральной, производительность компрессора от давления принимает вид

$$G_{CO_2}^{output,s}(\tau) = \rho_{CO_2} \left(a \frac{M_s}{M_{ac,s}^0} + b \right), \quad (29)$$

Результаты моделирования динамики содержания диоксида углерода в согласующей и аккумулирующей емкостях для различных типов микрокомпрессора (рис. 10) приведены на рис. 11.

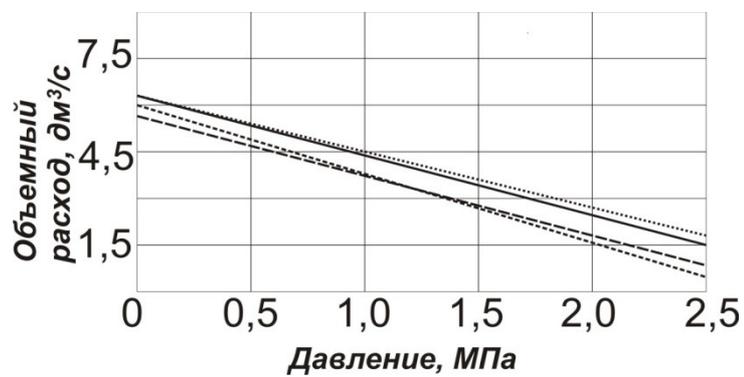


Рис. 10. Характеристики микрокомпрессоров

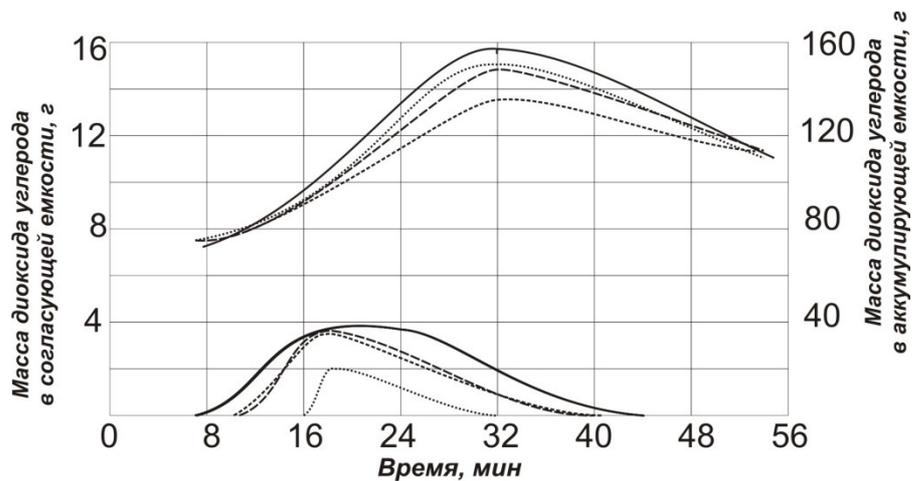


Рис.11. Динамика изменения содержания диоксида углерода в аккумулирующей и согласующей емкостях

Результаты моделирования позволяют произвести выбор необходимого объема согласующей емкости, выбор рабочего диапазона давлений в аккумулирующей емкости, выбор производительности и типа микрокомпрессора.

Заключение

Предложенный подход к прогнозированию функционирования РСОГС как сложной системы, включающей в технологическую структуру взаимосвязанные блоки, функционирующие в разных временных режимах и взаимодействующие с другими системами и звеньями внешней относительно объекта проектирования среды, предназначен для решения ряда задач на различных стадиях проектирования.

Направлениями дальнейших работ являются:

1. Верификация разработанных имитационных моделей по результатам экспериментальных исследований отдельных блоков.
2. Дополнение имитационной модели процедурами оценки надежности.
3. Проведение вычислительных экспериментов на имитационной модели с оценкой влияния отказов и вероятных нештатных ситуаций на проектные параметры РСОГС и создания системы контроля технического состояния и идентификации и локализации отказов в технологической структуре СОГС.

Библиографический список

1. Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, Э.А. Курмазенко. Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых полетов: предварительный анализ – «Вестник Московского авиационного института», М.: МАИ, 2008 г., №1, т.15.

2. E.A. Kurmazenko, M.Ju. Tomashpolskiy, L.I. Gavrilov, A.A. Kochetkov, N.N. Khabarovskiy. Crew's Life Support Aboard the Long-Term Planetary Orbital Station and Interplanetary Vehicles. - Proceedings of DGRL International Symposium "TO MOON and Beyond" – Bremen, Germany, 2008 (CD-ROM).
3. Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 1998 г.
4. Морев В.И. Моделирование сложных систем в базах данных. – М.: «Спутник+», 2009 г.
5. E. A. Kurmazenko, M.Ju. Tomashpolskiy, L.I. Gavrilov, A.A. Kochetkov, N.N. Khabarovskiy, A.I. Grigoriev, V.M. Baranov, E.P. Demin. Life Support System Virtual Simulators for Mars-500 Ground-Based Experiment. – Proceedings of 59th International Astronautical Congress – Glasgow, Scotland, 2008, (CD ROM).
6. Eduard Kurmazenko, Nikolay Khabarovskiy, GuzelKamaletdinova, EvgeniyDemin and Boris Morukov // Life Support System Virtual Simulators for Mars-500 Ground-Based Experiment, / Chapter 22 in the book "Biomedical Science, Engineering and Technology", edited by Dhanjoo N. Ghista – InTech, 2012.
7. А. А. Кочетков, Э.А. Курмазенко, Н.Н. Хабаровский, Г.Р. Камалетдинова. Расширение возможностей АПКОЭС в процессе проведения 520-ти суточного эксперимента по программе «МАРС-500». – «Труды МАИ», № 43, 2011.