

ДИСКУССИИ

DISCUSSIONS

УДК 629.78.047.048

DOI 10.34131/MSF.20.2.99-113

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ АППАРАТОВ

Э.А. Курмазенко, О.В. Кирюшин, А.А. Кочетков, В.Ю. Прошкин,
А.С. Цыганков, А.Е. Сорокин, А.С. Ведищев

Докт. техн. наук, профессор Э.А. Курмазенко, О.В. Кирюшин,
А.А. Кочетков; канд. техн. наук В.Ю. Прошкин; А.С. Цыганков,
канд. экон. наук, доцент А.Е. Сорокин; А.С. Ведищев
(АО «НИИхиммаш»)

Рассмотрены основные требования к модели эффективности регенерационной системы жизнеобеспечения как абиотической части космической эколого-технической системы межпланетного космического аппарата и сформирована модель эффективности, включающая совокупность показателей для решения исходной задачи синтеза технологической структуры.

Ключевые слова: экипаж, регенерационная система жизнеобеспечения, межпланетный пилотируемый аппарат, технологическая структура, исходная задача синтеза, модель эффективности, локальные показатели эффективности.

Performance Evaluation of the Regenerative Life Support System of Interplanetary Manned Spacecraft. E.A. Kurmazenko, O.V. Kiryushin, A.A. Kochetkov, V.Yu. Proshkin, A.S. Tsygankov, A.E. Sorokin, A.S. Vedischev

The article considers basic requirements for the efficiency model of the regenerative life-support system as an abiotic part of the ecological and technical system of an interplanetary spacecraft. It also describes developed efficiency model, which includes a set of indicators for solving the initial synthesis problem of the technological structure.

Keywords: crew, regenerative life-support system, interplanetary crew vehicle, technological structure, initial synthesis problem, efficiency model, local performance indicators.

На борту межпланетного пилотируемого аппарата (МПА) должна быть создана эколого-техническая система (ЭТС), обеспечивающая преобразование продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания за счет организации круговорота веществ, включающая абиотическую и биотическую части.

Определяющими факторами для создания регенерационной системы жизнеобеспечения (РСЖО) как абиотической части ЭТС являются: программа космической миссии; тип летательного аппарата и характеристики служебных бортовых систем и технологии переработки продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания [1, 2].

РСЖО как абиотическая часть ЭТС МПА является сложной технической системой, характеризующейся стабильной топологией, иерархичностью морфологического описания и явно выраженной целевой функцией.

Являясь сложной технической системой, РСЖО обладает следующими основными свойствами [3]:

– эффективность системы на протяжении жизненного цикла сохраняется выше порогового значения

$$\Phi = \{\varphi_i(\{Q_j\})\} \geq \Phi^*, 0 \leq \tau \leq \tau_{lc}; \quad (1)$$

– скорость уменьшения энтропии ограничена

$$\frac{dS}{d\tau} > 0, 0 \leq \tau \leq \tau_{lc}; \quad (2)$$

– в течение жизненного цикла τ_{lc} системы морфология системы $\{S_i\}$ стабильна

$$\{S_i(\tau)\} \approx \{S_i(\tau = 0)\}, 0 \leq \tau \leq \tau_{lc}. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3): Φ, Φ^* – эффективность системы и ее пороговое значение; $\{Q_j\}$ – множество свойств системы; $\{\varphi_i(\{Q_j\})\}$ – множество функционалов отображения; $\frac{dS}{d\tau}$ – скорость изменения энтропии; $\{S_i(\tau)\}$ – формализованная структура системы; τ – текущее время функционирования системы; τ_{lc} – время жизненного цикла системы.

Проблема создания РСЖО, предназначенной для экипажей МПА как абиотической части космической ЭТС, может быть сформулирована в форме исходной задачи синтеза ее технологической структуры [4] (рис. 1):

«Синтезировать технологическую структуру $S(\{X_i\}_j) \in S_{con}$ с законом функционирования $\bar{S}(\{\bar{X}_i\}_j)$, соответствующим цели ЭТС МПА (системы $\mathbf{C}(|C|, \bar{C}, \underline{C})$) и требованиям информационного описания в присутствии внешней среды с заданными свойствами (системы $\mathbf{E}(|E|, \bar{E}, \underline{C})$) на дискретном множестве элементарных структур $\{X_i\}$ с закономерностями функционирования $\{X_i\}$, обеспечивающими проведение процессов преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания, в соответствии с целью ЭТС МПА – \underline{C} при эффективности

$$v_o = \min_{S \in S_{con}} v(u, \mathbf{S}, \mathbf{E}) \gg. \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{C}(|C|, \bar{C}, \underline{C})$, $\mathbf{S}(|S|, \bar{S})$ и $\mathbf{E}(|E|, \bar{E}, \underline{C})$ – функции, описывающие в пространстве обобщенных состояний ЭТС МПА, РСЖО и внешнюю среду с заданными свойствами, соответственно, принадлежащую множеству связанных

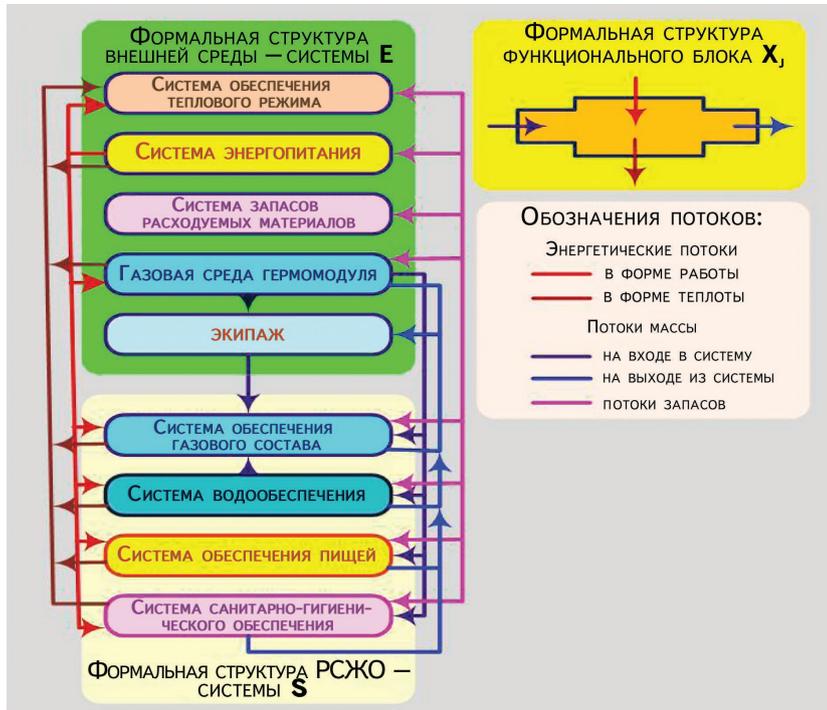


Рис. 1. Формальная структура эколого-технической системы МПА

технологических структур; S_{con} – конкретная технологическая структура системы S ; $|C|$, $|S|$ и $|E|$ – технологические структуры систем C , S и E ; \bar{C} , \bar{S} , \bar{E} – закономерности функционирования данных систем; \underline{C} – цель для ЭТС МПА; v – количество абстрактных ресурсов, поступающих от системы E и затрачиваемых системой S при преобразовании продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания в количестве абстрактных ресурсов u .

С учетом данных определений:

$$|C| \equiv |S| \cap |E|; \tag{5}$$

$$\bar{C} \equiv \bar{S}(|S|, |E|, \bar{E}) \cap \bar{E}(|E|, |S|, \bar{S}). \tag{6}$$

При этом законы функционирования систем S и E в общем случае должны рассматриваться как взаимодействия их сопряженных состояний, приводящие к установлению новых сопряженных состояний

$$(|S|, \bar{S}), (|E|, \bar{E}) \xrightarrow{\Delta\tau} (|S'|, \bar{S}'), (|E'|, \bar{E}') \tag{7}$$

в соответствии с целью \underline{C} для ЭТС.

**Статус разработки технологий
на основе физико-химических процессов
преобразования продуктов метаболизма экипажа
в исходные компоненты среды обитания**

Первая реализация технологий, основанных на регенерации продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания, осуществлена в системе водообеспечения орбитальной станции «Салют-4» в системе регенерации воды из конденсата атмосферной влаги. Аналогичные системы работали на станциях «Салют-6» и «Салют-7», обеспечивая 50 % потребностей в воде. Введение данной технологии доказало возможность формирования систем регенерации на основе физико-химических процессов в условиях космического полета [2, 6, 7].

На орбитальной станции «Мир» впервые в мировой практике реализован комплекс систем жизнеобеспечения, который включил системы:

- регенерации воды из конденсата атмосферной влаги СРВ-К2 на основе очистки сорбционными, ионообменными и каталитическими технологиями;
- приема и консервации урины СПК-У;
- регенерации воды из урины на основе низкотемпературного испарения воды через пористую мембрану;
- регенерации санитарно-гигиенической воды СРВ-СГ на основе фильтрационных мембранных технологий [2];
- генерации кислорода «Электрон-В» на основе электролиза воды из водного раствора щелочи КОН в проточном электролизере;
- очистки атмосферы от углекислого газа «Воздух» на основе адсорбционных технологий, при вакуумной десорбции адсорбента углекислого газа и десорбции осушителя обратным потоком подогретого сухого воздуха;
- очистки атмосферы от микропримесей СБМП на основе адсорбции на активированном угле и низкотемпературном каталитическом окислении водорода и окиси углерода при термовакуумной десорбции адсорбента.

Система регенерации санитарно-гигиенической воды СРВ-СГ временно опробована в штатных условиях эксплуатации и выключена в связи с неудачным конструктивным оформлением душа и умывального устройства для условий полной динамической невесомости.

В связи с отсутствием системы концентрирования углекислого газа, спроектированная и прошедшая наземную отработку система переработки углекислого газа и электролизного водорода, основанная на реакции Сабатье $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$, на борту станции «Мир» не использовалась.

На российском сегменте Международной космической станции (МКС) регенерационные системы на сегодняшний день представлены модифицированными системами СРВ-К2М, СПК-УМ, «Электрон-ВМ», «Воздух» и СБМП. Функционирование данного комплекса систем доказало возмож-

ность организации физического и химического круговоротов веществ в условиях космического полета. Структура, интерфейс и особенности функционирования РСЖО РС МКС представлены в работе [22].

Регенерационные системы жизнеобеспечения США, Европейского космического агентства и Японии для МКС разработаны в качестве экспериментальных на основе известных технологий 40–50-летней давности и рассматривались как перспективные для полетов к Марсу и другим планетам солнечной системы [2, 8, 9, 10, 11]. Наиболее полно тенденция их создания отражена в интегрированной схеме регенерационных систем жизнеобеспечения США – IRLSS, включающей систему регенерации воды WRS и систему регенерации атмосферы ARS (рис. 2).

Система регенерации воды обеспечивает переработку всех влагосодержащих продуктов метаболизма экипажа и функционирования бортовых систем (за исключением воды фекалий) до кондиции питьевой воды. Очистка потоков воды производится в водном процессоре WPA на основе технологий сорбции, каталитического окисления при 127 °С и мультифильтрации. Урина собирается и консервируется в блоке WHC, объединяющем ассенизационное устройство и систему приема и консервации урины. Консервируемая урина поступает в уриновый процессор UPA, в котором осуществляется процесс вакуумной дистилляции с паровым компрессором. Образовавшийся дистиллят поступает на вход WPA, куда подается также вода, вырабатываемая системой переработки диоксида углерода CRA. Регенерированная вода поступает в распределитель PWD, предназначенный для раздачи воды потребителям.

В электролизере системы генерации кислорода OGA генерируется «сухой» кислород и газожидкостная смесь «водород–вода», из которой после центробежной сепарации выделяется водород, подаваемый вместе с концентрированным углекислым газом из CDRA в систему переработки CRA (на основе реакции Сабатье).

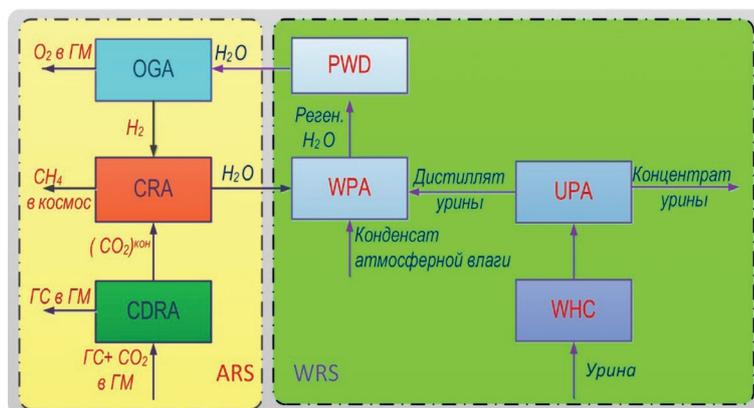


Рис. 2. Технологическая структура IRLSS американского сегмента МКС

Система CDRA предназначена для удаления из атмосферы диоксида углерода и его концентрирования до 96–98 %, основана на применении адсорбционной технологии при термовакuumной десорбции адсорбента – цеолита в адсорберах поглощения диоксида углерода. Десорбция шихты «силикагель–цеолит» в адсорберах-осушителях осуществляется обратным потоком осушенного подогретого воздуха.

Рассмотренная система IRLSS проходит экспериментальную отработку на борту МКС, основной задачей которой является переход к интегрированным технологическим структурам.

По своим массоэнергетическим, габаритным и ресурсным характеристикам функциональные блоки некоторых систем жизнеобеспечения близки, а в ряде случаев являются более затратными по отношению к блокам на запасах [1, 12, 13, 14]. Это обусловлено формированием технологий на основе некорректного определения показателей эффективности и применения принципа независимого проектирования блоков, направленного на разработку систем одноцелевого назначения.

Регенерационная система жизнеобеспечения «всегда существует как единое целое: экипаж, среда обитания, технические устройства, вследствие чего решение отдельных частных вопросов обеспечения жизни, работоспособности и безопасности человека в условиях полета еще не является процессом создания системы, в которой осуществляется сложная взаимосвязь отдельных элементов, а конечные функционирования одних элементов служат исходными для других. Проводимые НИР и ОКР направлены на решение частных задач, что обуславливает их научную, техническую и организационную разобщенность. Необходимо комплексное рассмотрение вопросов, которое может быть осуществлено на основе системного подхода» (рис. 3).

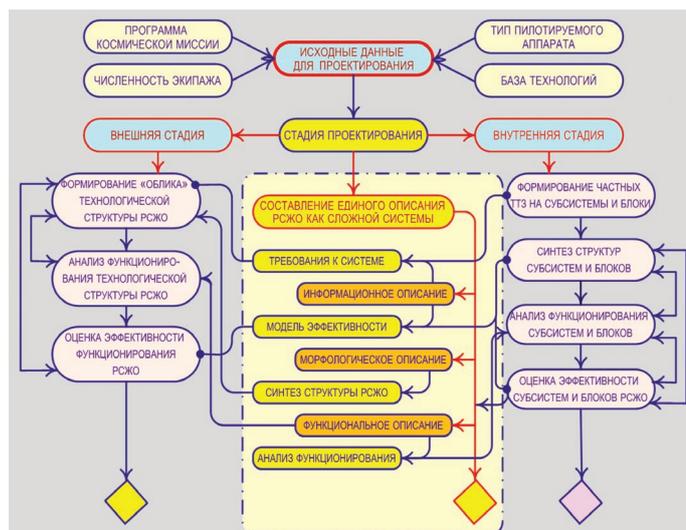


Рис. 3. Укрупненный алгоритм проектирования

Оценка эффективности при решении исходной задачи синтеза в однокритериальной постановке

Понятие «эффективность» при проектировании сложных технических систем, к которым относится РСЖО, имеет важное теоретическое и практическое значение, так как на ее основе проводятся [3, 4]:

- оценка соответствия технологической структуры и закона функционирования РСЖО своему целевому назначению;
- выбор совокупности технологий преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания;
- сопоставление отдельных альтернатив технологической структуры системы.

Данное понятие является внешним по отношению к проектируемой системе, поэтому никакое описание системы не может быть достаточным для формирования модели эффективности. При проектировании РСЖО в настоящее время отсутствует единый подход к оценке эффективности. Формализованная цель системы (ее целевая функция) подменяется количественной оценкой ее отдельного свойства, определяющего возможность ее реализации или закономерность функционирования, а в качестве целевой функции принимается формализованное свойство системы, которое в рамках априорной информации представляется наиболее важным для проектировщика.

Особое распространение получили оценки эффективности на основе таких показателей эффективности, как [15]:

- показатель «степень замкнутости системы по компонентам среды обитания» (СЗС);
- показатель «эквивалентная масса системы» (ЭМС) [16];
- уровень технической готовности (УТГ).

Функциональный показатель эффективности СЗС является характеристикой ЭТС МПА. Достижение ее высокого значения теоретически привлекательно, но экономически и практически неэффективно, так как приводит к экспоненциальному увеличению затрат на функционирование системы [14]. Часто использовался для обоснования малоэффективных и неперспективных технологий. В конце 1990-х годов заменен на показатель эффективности «эквивалентная масса системы».

Функциональный показатель эффективности ЭМС, определяемый как

$$M^{\text{эkv}} = M_{\text{СИСТ}}^{\text{СТАРТ}} + m_{\text{ГО}} V_{\text{СИСТ}}^{\text{ГО}} + M^{\text{ЗИП}} + m_{\text{СЭО}} N_{\text{СИСТ}} + m_{\text{СТР}} Q_{\text{СИСТ}}, \quad (8)$$

дает частичное и предвзятое представление о затратах на обеспечение жизни и деятельности экипажа, являющихся более насущными проблемами, отражая в основном только стоимость запуска.

В выражении (8): $M^{\text{экв}}$, $M_{\text{СИСТ}}^{\text{СТАРТ}}$, $M^{\text{ЗИП}}$ – эквивалентная масса системы, стартовая масса системы и масса ЗИП; $m_{\text{ГО}}$, $m_{\text{СЭО}}$, $m_{\text{СТР}}$ – удельные массы объема гермомодуля, системы энергообеспечения (СЭО) и системы терморегулирования (СТР); $V_{\text{СИСТ}}^{\text{ГО}}$, $N_{\text{СИСТ}}$, $Q_{\text{СИСТ}}$ – объем гермомодуля, для установки системы, потребляемая системой электрическая мощность и тепловая мощность, отводимая при функционировании системы.

Результаты сравнения по показателю ЭСМ являются ненадежными и могут быть искажены.

Функциональный качественный показатель эффективности УТГ характеризует, с одной стороны, этапы развития системы от технического предложения до штатного применения, а с другой – неопределенность в исходной информации, показателей от этапа создания. Обычно он применяется для оценки достигнутого прогресса при проведении научно-исследовательских работ [16].

Основные недостатки данных показателей:

- показатель вычислим, но физически неизмерим, так как вычисления требуют определенных допущений, которые не всегда могут быть корректно обоснованы;

- показатель эффективности и параметры системы входят в различные функциональные пространства, поэтому переход к описанию системы требует установления связи между этими пространствами;

- для многоцелевых систем сформировать показатель эффективности сложно: необходимо решить, какая его компонента обладает большей значимостью.

Более перспективным является формирование физически измеримого показателя эффективности, непосредственно связанного с параметрами технических систем, от которого легко перейти к любому функциональному показателю. Данный критерий должен быть основан на первичных категориях материи: «вещество», «энергия», «информация».

Физически измеримый показатель эффективности «целевая функция термомассовой оптимизации»

Наиболее общим является энергетический критерий эффективности. Энергетический баланс системы определяет в конечном итоге количество альтернативных вариантов технологической структуры РСЖО, которые могут быть реализованы, и интенсивность процессов в системе [13, 17, 18].

Эффективность системы зависит от общего энергетического ресурса и контроля над энергетическими потоками. Процессы преобразования продуктов метаболического обмена экипажа в исходные компоненты среды обитания по своей физической сущности являются искусственно организованными физико-химическими процессами, требующими подвода потока энергии от источника первичной энергии во внешней среде. Данные

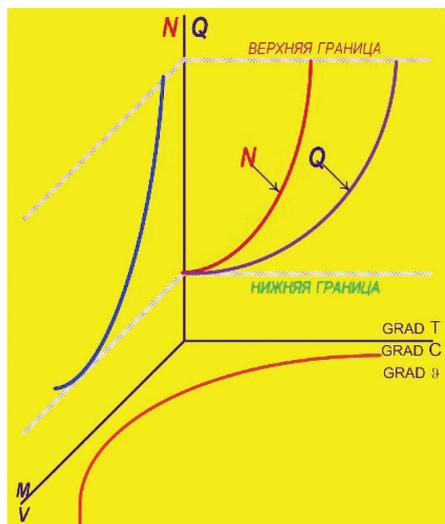


Рис. 4. Причинно-следственные связи при преобразовании энергии в функциональном блоке РСЖО

процессы являются односторонними процессами, необратимость которых возрастает при увеличении степени отклонения параметров состояния технологических потоков от значений аналогичных параметров в окружающей среде.

Существует строгая причинно-следственная связь между плотностью подводимого потока энергии на проведение технологического процесса, термодинамической движущей силой и количеством диссоциированной энергии, определяющей нагрузку на СТР, и массогабаритными характеристиками функционального блока (рис. 4).

«Верхняя» граница определяется свойствами рабочей среды, в которой осуществляется процесс преобразования технологических потоков:

$$\vec{U} < \vec{v}(w)_i \tag{9}$$

где \vec{U} – вектор Умова–Пойнтинга (вектор плотности потока энергии); \vec{v} – скорость распространения деформации в рассматриваемой рабочей среде; w – свойства рабочей среды с числом компонент i .

«Нижняя» граница характеризует минимальное значение плотности потока энергии в идеальном теоретически осуществимом процессе, проводимом при параметрах окружающей среды.

Для формирования энергетического критерия эффективности использован инвариант энергии – эксергия¹, являющаяся непрерывной термодинамической функцией неравновесного относительно внешней среды состояния, характеризующей способность рассматриваемого потока (или системы) к энергетическим преобразованиям, определяемая параметрами системы и внешней среды, и не подчиняется консервативным законам сохранения [17, 18, 19, 20]

$$E_{fl} = G_{fl} \left((h_{fl} - h_{env}) - T_{env}(s_{fl} - s_{env}) + \sum_i \varphi_{i,fl} (n_{i,fl} - n_{i,env}) \right) \tag{10}$$

и относительный показатель эффективности вида

$$\phi = \frac{[\text{затраты}]}{[\text{полезный эффект}] \times [\text{время функционирования}]} \tag{11}$$

¹ Термин «эксергия» введен в 1956 г. З. Рантом по предложению Р. Планка. Состоит из двух частей греческого слова *ergon* – работа, сила и приставки *ex*, означающей «из», «вне».

Выражая положительный эффект через полезную эксергетическую мощность связанной подсистемы, затрачиваемую на получение j -го целевого продукта

$$P_j^{useful} = G_j (\sum_i e_{ij}'' - \sum_i e_{ij}') \quad (12)$$

и общее уравнение затрат, при их определении в единицах удельной массы системы на единицу положительного эффекта

$$m_j^\Sigma = k_{j1} m_j^{const} + k_{j2} m_j^{var}, \quad (13)$$

$$m_j^{const} \equiv \frac{M_j^{const}}{P_j^{useful}} = k_{j1} (m_j^{sys} + m_{k,ГО}^{sys} V_{k,ГО}^{sys}), \quad (14)$$

$$m_j^{var} \equiv \frac{M_j^{var}}{P_j^{useful}} = k_{j2} (m_{CЭО} N_j^{CЭО} + m_{СТР} Q_j^{СТР}). \quad (15)$$

Определяя $N_j^{CЭО}$, $Q_j^{СТР}$ через параметры системы, окончательно получим целевую функцию термомассовой оптимизации (ЦФТМО):

$$m_j^\Sigma = k_{j1} (m_j^{sys} + m_{k,ГО}^{sys} V_{k,ГО}^{sys}) + k_{j2} (m_{CЭО} (\frac{2}{\eta_j} + \vartheta_j (\frac{1}{\eta_j} - 1)) + m_{СТР} (\frac{1}{\eta_j} - 1)). \quad (16)$$

В выражениях (10)–(16): e_{ij}' , e_{ij}'' – удельная эксергия на выходе и входе; E_{fl} – полная эксергия; G_{fl} , G_j – массовые расходы; h_{env} , h_{fl} , $n_{i,env}$, $n_{i,fl}$, s_{env} , s_{fl} – удельные энтальпии, количества вещества и энтропии; k_{j1} , k_{j2} – коэффициенты возрастания массы и энергопотребления при обеспечении надежности; m_j^{sys} , $m_{CЭО}$, $m_{СТР}$, $m_{k,ГО}^{sys}$ – удельные массы подсистем РСЖО, СЭО, СТР и гермомодуля; m_j^Σ , m_j^{const} , m_j^{var} – удельные суммарные, постоянные и переменные затраты массы на единицу полезной эксергетической мощности; M_j^{const} , M_j^{var} – постоянные и переменные затраты общей массы; $N_j^{CЭО}$, $Q_j^{СТР}$ – энергопотребление от СЭО и тепловая мощность, отводимая СТР; P_j^{useful} – полезная эксергетическая мощность, затраченная на получение целевого продукта; T_{env} – температура внешней среды; $V_{k,ГО}^{sys}$ – объем, занимаемый системой в гермомодуле; η_j – эксергетический КПД (степень термодинамического совершенства); $\varphi_{i,fl}$ – химический потенциал; ϑ_j – относительный температурный уровень технологического процесса. Индексы при переменных: fl – технологический поток; env – окружающая среда; i – компонент вещества технологического потока; j – целевой продукт (компонент среды обитания) или подсистема для его получения.

Дополнительные локальные показатели

Целевая функция термомассовой оптимизации РСЖО позволяет учесть ряд характеристик системы, связанных с процессами преобразования массы и энергии. Однако отдельные параметры РСЖО, характеризующие такие свойства, как: безопасность экипажа в условиях полета; комфортность для членов экипажа применения технологии преобразования продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания; надежность и т.п., характерные для сложных технических систем, данный показатель эффективности не может учитывать.

Окончательный выбор технологической структуры РСЖО объективно может быть произведен на основе решения многокритериальной задачи выбора с учетом дополнительной совокупности некоторых частных (локальных) показателей. Данные показатели являются качественными, трудно формализуемыми, измеряемыми в шкалах простого порядка, для формирования которых целесообразно использовать лингвистические термы теории нечетких множеств.

В качестве примера ниже рассмотрен показатель «безопасность экипажа» (рис. 5), предназначенный для оценки ответов на следующие вопросы:



Рис. 5. Показатель «безопасность экипажа»

- Насколько безопасна выбранная базовая альтернатива технологии?
- Насколько серьезны потенциальные опасности для членов экипажа?
- Насколько серьезны потенциальные опасности для космического аппарата?

Аналогично построена шкала простого порядка для измерения локального показателя «радиационная безопасность» (рис. 6). При этом «радиационная безопасность» рассматривается как характеристика качества защиты окружающей среды от действия радиации.



Рис. 6. Показатель «радиационная безопасность»



Рис. 7. Показатель эффективности «ремонтопригодность»

Локальный показатель эффективности «ремонтопригодность». Данный показатель эффективности используется для оценки альтернативных технологий с точки зрения затрат, необходимых для поддержания их функционирования (рис. 7).

Выводы

1. Рассмотрена возможность создания модели эффективности на основе физически измеряемого энергетического критерия и дополнительных показателях, учитывающих свойства входящих в интегрированную систему РСЖО отдельных subsystem и функциональных блоков.

2. Показано, что, в отличие от функционального показателя «эквивалентная масса системы», энергетический критерий «целевая функция термомассовой оптимизации» является физически измеримым и неформально введенным показателем.

3. Проиллюстрирована возможность формализации дополнительных качественных показателей интегрированной системы РСЖО на основе лингвистических термов теории нечетких множеств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kurmazenko E.A., Gavrilov L.I., Kochetkov A.A., Khabarovskiy N.N. Space Ecological/Engineering System for the Manned Interplanetary Vehicles Crew: Status and Key Technologies for its Development // 60th International Astronautical Congress 2009 (Daejeon, Republic of Korea). October 12–16, 2009. – Paper IAC-09.A1.6.4. – pp. 1–12. – DVD.
- [2] Космические эколого-технические системы: статус и направления развития интегрированных систем жизнеобеспечения экипажей межпланетных космических аппаратов / Курмазенко Э.А., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Прошкин В.Ю., Хабаровский Н.Н. // Инженерная экология. – 2014. – № 2. – С. 2–26.
- [3] Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. – М.: Воениздат. – 1976.
- [4] Принципы выбора перспективных технологий для интегрированной системы жизнеобеспечения межпланетного пилотируемого корабля / Курмазенко Э.А., Кочетков А.А., Прошкин В.Ю., Кирюшин О.В., Пушкарь О.Д. // Труды МАИ. – 2017. – № 93. – С. 1–21. – Электронный ресурс, создан 28.04.2017 г. <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=80262>
- [5] Флейшман Б.С. Основы системотехники. – М.: «Радио и связь», 1982.

- [6] Samsonov N.M., Kurmazenko E.A., Farafonov N.S., Menkin E.V. An Efficiency of Technologies and A Strategy for Synthesis of Integrated Life Support System Structure // SAE Technical Paper Series, 2000 # 2000-01-2396, 2000.
- [7] Водообеспечение экипажей / Синяк Ю.Е., Гайдадымов В.Б., Скуратов В.М., Зауер Р.Л., Муррей Р.У. // Космическая биология и медицина. – Том II. / РАН, NASA США – М.: Наука, 1994.
- [8] Проблемы жизнеобеспечения экипажей длительных космических экспедиций / Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А., Андрейчук П.О., Гузенберг А.С., Любимов Г.А., Протасов Н.Н., Рябкин А.М., Юргин А.В., Самсонов Н.М., Гаврилов Л.И., Бобе Л.С., Григорьев А.И., Баранов В.М., Синяк Ю.Е. // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2008. – Т. 42. – № 6/1. – С. 13–16.
- [9] Воронин Г.И., Поливода А.И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей. – М.: Машиностроение, 1967.
- [10] Williams D.E., Spector L.N. Node 3 Relocation Environmental Control and Life Support System Modification Kit Verification and Updated Status // AIAA Technical Paper Series, 2010 # 2010-621.
- [11] Witt J., Hovland S., Bockstahler K. ACLS – Europe’s Closed Loop Air Revitalisation System // AIAA Technical Paper Series, 2010, # 2010-6232.
- [12] Sakurai Masato, Shima Asuka, Sone Tomotsugu, Oguchi Mitsuo, Ohnishi Mitsuru, Tachihara Satoru, Satoh Naoki. Air Revitalization Technologies for Manned Long Term Exploration Aim to ISS Demonstration // Proceedings of 62 International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa. – 2011, 5 p., (DVD).
- [13] Nakanoya Sogo, Matsumura Yusuke. Water Reclamation Demonstration on the Jem (Kibo) for a Future Long-Duration Manned Mission // Proceedings of 62 International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa. – 2011, (DVD).
- [14] A global efficiency criterion and its use for designing regenerative LSS for manned spaceflight // Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems (Noordwijk, the Netherlands). May 20–22, 1997. – ESA SP. 1997. – pp. 677–684.
- [15] Некоторые проблемы создания систем обеспечения жизнедеятельности и безопасности экипажей летательных аппаратов / Правецкий В.Н., Самсонов Н.М., Утямышев Р.И., Курмазенко Э.А. // Фундаментальные науки – медицине. Материалы совместной сессии Общего собрания АН СССР и Общего собрания АМН СССР 19–20 ноября 1980 г. – М.: Наука. 1981.
- [16] Jones H.W. Don’t Trust a Management Metric, Especially in Life Support // 44th International Conference on Environmental Systems (Tucson, Arizona, USA). July 13–17, 2014. – ICES Publication. ICES-2014-073. – pp. 1–10.
- [17] Jones H.W. Multiple Metrics for Advanced Life Support // 29th International Conference on Environmental Systems (Denver, Colorado, USA). July 12–15, 1999. – SAE Technical Papers Series. 1999-01-2079. – pp. 1–12.
- [18] Kurmazenko E., Korobkov A., Tsygankov A., Kochetkov A. Exergy Approach to Evaluating the Effectiveness of Regenerative Life – Support Systems // 66th International Astronautical Congress 2015 (Jerusalem, Israel). October 12–16, 2015. – Paper IAC-15.A1.7.2. – pp. 1–7. – DVD.
- [19] Luther M.B., Hall T.W. Exergy Applied to Lunar Base Design. // 40th International Conference on Environmental Systems (Barcelona, Spain). July 11–15, 2010. – AIAA Publication. AIAA-2010-6107. – pp. 1–8.

- [20] Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / Под ред. В.М. Бродянского – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [21] Surdyk R.J., Morrow R.C., Wetzel J.P. Life Support Multidimensional Assessment Criteria // 47th International Conference on Environmental Systems (Charleston, South Carolina, USA). 16–20 July, 2017. – ICES Publication. ICES-2017-306. – pp. 1–9.
- [22] Романов С.Ю., Бобе Л.С. Построение и энергомассовые характеристики группы регенерационных систем водообеспечения космической станции // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 25–34.

REFERENCES

- [1] Kurmazenko E.A., Gavrilov L.I., Kochetkov A.A., Khabarovskiy N.N. Space Ecological/Engineering System for the Manned Interplanetary Vehicles Crew: Status and Key Technologies for its Development // 60th International Astronautical Congress 2009 (Daejeon, Republic of Korea). October 12–16, 2009. – Paper IAC-09.A1.6.4. – pp. 1–12. – DVD.
- [2] Space ecological and technical systems: status and directions for the development of integrated life support systems for interplanetary spacecraft crews / Kurmazenko E.A., Bobe L.S., Gavrilov L.I., Kochetkov A.A., Proshkin V.Yu., Khabarovskiy N.N. // Engineering Ecology. – 2014. – No 2. – pp. 2–26.
- [3] Druzhinin V.V., Kontorov D.S. Issues of military system in engineering. – Moscow: Voenizdat. – 1976.
- [4] The principles of selecting promising technologies for an integrated life support system of interplanetary manned spacecraft / Kurmazenko E.A., Kochetkov A.A., Proshkin V.Yu., Kiryushin O.V., Puskkar O.D. // Proceedings of MAI – 2017. – No 93. – pp. 1–21. – Electronic source, created 28.04.2017. <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=80262>
- [5] Fleishman B.S. Fundamentals of Systemology. – Moscow: «Radio and Communication», 1982.
- [6] Samsonov N.M., Kurmazenko E.A., Farafonov N.S., Menkin E.V. An Efficiency of Technologies and A Strategy for Synthesis of Integrated Life Support System Structure // SAE Technical Paper Series, 2000 # 2000-01-2396, 2000.
- [7] Crew water supply / Siniak Yu.E., Gaidadymov V.B., Skuratov V.M., Zauer R.L., Murrei R.U. // Space Biology and Medicine. – V II. / RAS, NASA USA – Moscow: Nauka, 1994.
- [8] Life-support issues of long-term expeditions / Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A., Andreichuk P.O., Gusenberg A.S., Lyubimov G.A., Protasov N.N., Ryabkin A.M., Yurgin A.V., Samsonov N.M., Gavrilov L.I., Bobe L.S., Grigoryev A.I., Baranov V.M., Sinyak Yu.E. // Aerospace and Environmental Medicine – 2008. – V. 42. – No 6/1. – pp. 13–16.
- [9] Voronin G.I., Polivoda A.I. Life support of spacecraft crews. – Moscow: Mashinostroenie, 1967.
- [10] Williams D.E., Spector L.N. Node 3 Relocation Environmental Control and Life Support System Modification Kit Verification and Updated Status // AIAA Technical Paper Series, 2010 # 2010-621.
- [11] Witt J., Hovland S., Bockstahler K. ACLS – Europe’s Closed Loop Air Revitalisation System // AIAA Technical Paper Series, 2010, # 2010-6232.

- [12] Sakurai Masato, Shima Asuka, Sone Tomotsugu, Oguchi Mitsuo, Ohnishi Mitsuru, Tachihara Satoru, Satoh Naoki. Air Revitalization Technologies for Manned Long Term Exploration Aim to ISS Demonstration // Proceedings of 62 International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa. – 2011, 5 p., (DVD).
- [13] Nakanoya Sogo, Matsumura Yusuke. Water Reclamation Demonstration on the Jem (Kibo) for a Future Long-Duration Manned Mission // Proceedings of the 62 International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa. – 2011, (DVD).
- [14] A global efficiency criterion and its use for designing regenerative LSS for manned spaceflight // Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems (Noordwijk, the Netherlands). May 20–22, 1997. – ESA SP. 1997. – pp. 677–684.
- [15] Problems of creating life support and crew safety systems / Pravetsky V.N., Samsonov N.M., Utiamyshev R.I., Kurzamenko E.A. // Fundamental Sciences – for Medicine. Proceedings of the joint session of the General Meeting of the USSR Academy of Sciences and the General Meeting of the USSR Academy of Medical Sciences on November 19–20, 1980. – Moscow: Nauka. 1981.
- [16] Jones H.W. Don't Trust a Management Metric, Especially in Life Support // 44th International Conference on Environmental Systems (Tucson, Arizona, USA). July 13–17, 2014. – ICES Publication. ICES-2014-073. – pp. 1–10.
- [17] Jones H.W. Multiple Metrics for Advanced Life Support // 29th International Conference on Environmental Systems (Denver, Colorado, USA). July 12–15, 1999. – SAE Technical Papers Series. 1999-01-2079. – pp. 1–12.
- [18] Kurmazenko E., Korobkov A., Tsygankov A., Kochetkov A. Exergy Approach to Evaluating the Effectiveness of Regenerative Life – Support Systems // 66th International Astronautical Congress 2015 (Jerusalem, Israel). October 12–16, 2015. – Paper IAC-15.A1.7.2. – pp. 1–7. – DVD.
- [19] Luther M.B., Hall T.W. Exergy Applied to Lunar Base Design. // 40th International Conference on Environmental Systems (Barcelona, Spain). July 11–15, 2010. – AIAA Publication. AIAA-2010-6107. – pp. 1–8.
- [20] Brodyansky V.M., Fratsher V., Mikhaliok K. Exergy method and its applications / Edited by Brodyansky V.M. – Moscow: Energoatomizdat, 1988.
- [21] Surdyk R.J., Morrow R.C., Wetzel J.P. Life Support Multidimensional Assessment Criteria // 47th International Conference on Environmental Systems (Charleston, South Carolina, USA). July 16–20, 2017. – ICES Publication. ICES-2017-306. – pp. 1–9.
- [22] Romanov S.Yu. Bobe L.S. Construction and Energy-Mass Characteristics of the Group of Regeneration Water Supply Systems of the Space Station // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2016. – No 2(19). – pp. 25–34.