

Принципы выбора перспективных технологий для интегрированной системы жизнеобеспечения межпланетного пилотируемого корабля

Курмазенко Э.А.^{1*}, Кочетков А.А.^{1**}, Прошкин В.Ю.^{1***},

Кирюшин О.В.^{2****}, Пушкарь О.Д.^{2*****}

¹Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения,

НИИхиммаш, ул. Большая Новодмитровская, 14, Москва, 127015, Россия

²Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,

ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, 141070, Россия

*e-mail: e_kurmazenko@niichimmash.ru

**e-mail: a_kochetkov@niichimmash.ru

***e-mail: v_proshkin@mail.ru

****e-mail: ovkirushin@tsyniimash.ru

*****e-mail: odpushkar@tsyniimash.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы формирования принципов выбора перспективных технологий для интегрированных систем жизнеобеспечения экипажа (ИСЖО) как абиотической части эколого-технической системы (ЭТС) межпланетного пилотируемого корабля для решения сформулированной исходной задачи синтеза технологической структуры ИСЖО. Основу формирования предлагаемых принципов составляют системный подход к проектированию ИСЖО, основные законы энергоэнтропии и принципы зеленой химии.

Ключевые слова: интегрированная система жизнеобеспечения, технологическая структура, межпланетный пилотируемый аппарат, исходная задача синтеза, экипаж, модель эффективности, системный подход к проектированию.

Введение

Проблема создания ультранадежной системы жизнеобеспечения на основе физико-химических технологий преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания является в настоящее время определяющей для осуществления длительных космических миссий к планетам солнечной системы [1, 2].

Определяющими факторами при проектировании ИСЖО являются: программа космической миссии, тип летательного аппарата, характеристики служебных бортовых систем и действующие ограничения на создание системы [3]. В таблице 1 приведено сопоставление параметров внешней среды при орбитальных околоземных полетах (на примере Международной космической станции – МКС) и межпланетного полета на Марс, а также проектные параметры ИСЖО [4].

Таблица 1.

Проектные параметры программы полета и ИСЖО

Тип параметра	Параметр	МКС	Марс транзит
Параметры программы полета	Продолжительность полета	Часы	≈ 6 месяцев
	Длительность космической миссии	≈ 20 лет	≈ 1 год
	Окружающая среда	Низкая околоземная орбита	Дальний космос
	Цикл солнечного облучения	92 минуты	Все время полета
	Гравитация	≈ 0 g	≈ 0 g
	Радиация	Экранирование по-	Максимальная

		верхностью Земли	облученность
	Продолжительность внекорабельной деятельности	Ограничена	Очень маленькая
	Общий риск	Низкий	Высокий
Системные параметры	ИСЖО	Стандартные	Преобразованные
	Надежность оборудования	Низкая	Ультравысокая

По существу рассматривается проблема создания эколого-технической системы (ЭТС) в качественно новой среде, не имеющей аналогов на Земле и в Космосе, существенными отличительными свойствами которой являются:

- экипаж является решающим звеном ЭТС, определяющим цель ее создания, функционирование и развитие;
- необходимость формирования технологической структуры интегрированной системы жизнеобеспечения (ИСЖО) в конечном числе функциональных блоков на основе искусственно организованных технологий;
- резервный фонд, определяющий устойчивость функционирования ИСЖО ограничен объемом обитаемых модулей [5].

Интегрированная система жизнеобеспечения при проектировании рассматривается как абиотическая часть ЭТС, обладающая определенной технологической структурой (ТС) ^{*)}. Решаемая на стадии внешнего проектирования ИСЖО (рис. 1) исходная задача синтеза ТС может быть сформулирована в виде:

^{*)} Технологическая структура (ТС) – совокупность функциональных блоков, реализующих технологии преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания, и связей между ними.

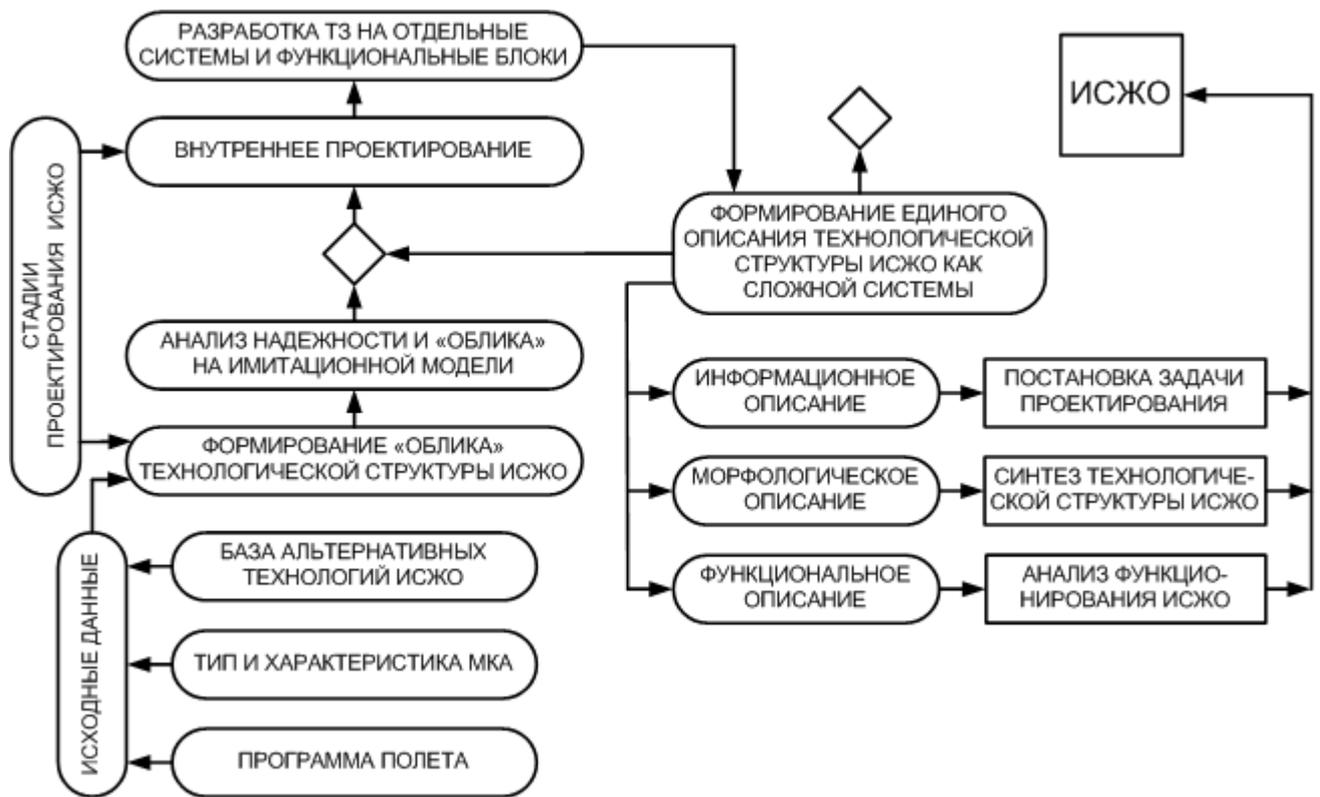


Рис. 1. Укрупненный алгоритм проектирования ИСЖО

Синтезировать синэнергетическую ТС ИСЖО (системы $S \equiv S(|S|, \bar{S})$) на дискретном множестве элементарных структур $\{|X_i|\}$ с закономерностями функционирования $\{\bar{X}_i\}$, обеспечивающими процессы преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания, в соответствии с целью ЭТС МКА (системы $C(|C|, \bar{C}, \underline{C})$) с эффективностью

$$v_0 = \min_{S \in S_{con}} v(u, S, E) \quad (1)$$

в присутствии внешней среды (системы $E \equiv E(|E|, \bar{E}, \underline{C})$).

При этом элементарной структурой $|X_i|$ является функциональный блок, устойчивое допустимое состояние которого определяется условием

$$\forall X_i(|X_i|, \bar{X}_i) \exists \bar{X}_i \equiv (\dot{M}_i \wedge \dot{N}_i) \wedge (\dot{M}_i \wedge \dot{Q}_i), \quad (2)$$

В выражениях (1)÷(2): $|C|, |E|, |S|$ – цели систем; $\bar{C}, \bar{E}, \bar{S}$ – законы функционирования систем; \underline{C} – цель ЭТС; $\dot{M}, \dot{N}, \dot{Q}$ – обобщенные потоки массы, энергии и теплоты; u – количество абстрактных ресурсов, вырабатываемых системой S при потреблении количества v абстрактных ресурсов из внешней среды (из системы E).

Исходная задача синтеза технологической структуры решается на внешней стадии проектирования ИСЖО при формировании морфологического описания.

Формирование морфологического описания ИСЖО

Морфологическое описание, характеризующее технологическую структуру системы, должно учитывать причинно-следственные связи, возникающие при преобразовании потоков массы и энергии в искусственно организованных процессах.

Интенсивность процесса преобразования определяется плотностью потока энергии J_i^E

$$J_i^E = \sum_i \sum_k f_{ik}(J_i^E, |U_k|) Y_i^n, \quad (3)$$

где: $f_{ik}(J_i^E, |U_k|)$ – функция, зависящая от плотности потока энергии и структуры функционального блока $|U_k|$; Y_i^n – движущая термодинамическая сила технологического процесса.

Величина плотности потока энергии ограничена предельными значениями. «Верхняя» граница определяется свойствами среды, в которой происходит процесс преобразования энергии, в соответствии с вектором Умова-Пойнтинга [6, 7], «нижняя» граница характеризует минимальное количество работы, затрачиваемой на преобразование потоков, в теоретическом обратимом процессе, осуществляемом

при параметрах окружающей среды. Необратимость реальных процессов преобразования ведет к диссипации энергии. При этом количество диссипированной энергии пропорционально плотности потока энергии J_i^E .

Из вышеизложенного следует взаимосвязь между плотностью потока энергии, интенсивностью технологического процесса, мощностью от системы энергообеспечения, потребляемой на его организацию, тепловой мощностью, отводимой системой обеспечения теплового режима и массовыми и габаритными характеристиками функционального блока (рис. 2).

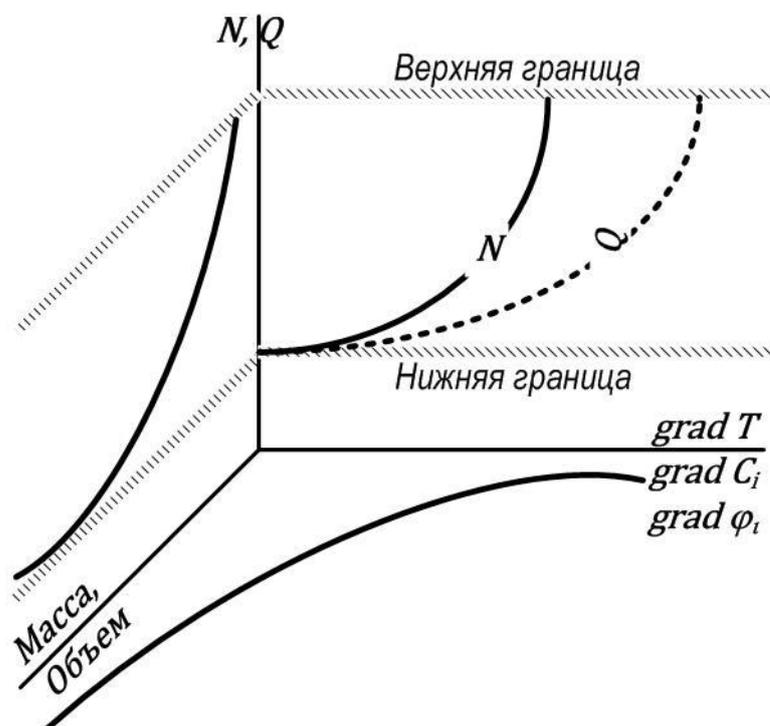


Рис 2. Причинно - следственные связи при преобразовании энергии в функциональном блоке.

Результаты анализа данной взаимосвязи могут служить основой для формирования естественной классификации отдельных технических систем и блоков, входящих в структуру ИСЖО, в виде морфологической карты, которая позволяет

сформировать дискретное множество альтернатив их выполнения и конструктивного оформления, исходя из следующих основных признаков [6]:

- ρ_{1j} – перерабатываемый продукт метаболизма;
- ρ_{2j} – вырабатываемый компонент среды обитания экипажа;
- ρ_{3j} – первичная форма энергии, используемая при организации технологии.

Дополнительными признаками являются:

- \mathfrak{H}_{1j} – количество компонентов перерабатываемого продукта метаболизма;
- \mathfrak{H}_{2j} – агрегатное состояние перерабатываемого продукта метаболизма;
- \mathfrak{H}_{3j} – рабочая среда, в которой осуществляется технологический процесс;
- \mathfrak{H}_{4j} – форма энергии, непосредственно применяемая в технологическом процессе;
- \mathfrak{H}_{5j} – особенности организации технологического процесса.

Совокупность первичных и дополнительных признаков, может быть формализована в форме матрицы, в которой скобками [] выделена одна из возможных альтернатив:

$$X_{jk} = \left\| \begin{array}{c} \rho_{11}, \mathfrak{H}_{12}, [\rho_{13}], \dots, \rho_{1n} \\ \rho_{21}, [\rho_{22}], \dots, \rho_{2m} \\ \rho_{31}, \rho_{32}, \rho_{33}, [\rho_{34}], \dots, \rho_{3g} \\ \mathfrak{H}_{11}, \mathfrak{H}_{12}, [\mathfrak{H}_{13}], \mathfrak{H}_{14} \\ \mathfrak{H}_{21}, \mathfrak{H}_{22}, \mathfrak{H}_{23}, \dots, [\mathfrak{H}_{2j}], \dots, \mathfrak{H}_{2p} \\ \mathfrak{H}_{31}, \mathfrak{H}_{32}, [\mathfrak{H}_{33}], \dots, \mathfrak{H}_{3r} \\ [\mathfrak{H}_{41}], \mathfrak{H}_{42}, \mathfrak{H}_{43}, \dots, \mathfrak{H}_{4s} \\ \mathfrak{H}_{51}, \mathfrak{H}_{52}, \mathfrak{H}_{53}, [\mathfrak{H}_{54}], \dots, \mathfrak{H}_{5t} \end{array} \right\|. \quad (4)$$

Морфологическая карта описывает множество альтернатив технологий X, которые могут быть использованы в технологической структуре ИСЖО при решении

задачи проектирования системы. Чем больше рассмотренных альтернатив $X_j \in X$ на внешней стадии проектирования ИСЖО, тем больше вероятность получить оптимальное решение при формировании технологической структуры.

Результаты анализа морфологической карты (рис. 3) совместно с функциями, выполняемыми отдельными подсистемами в структуре ИСЖО орбитальных станций, показывают, что:

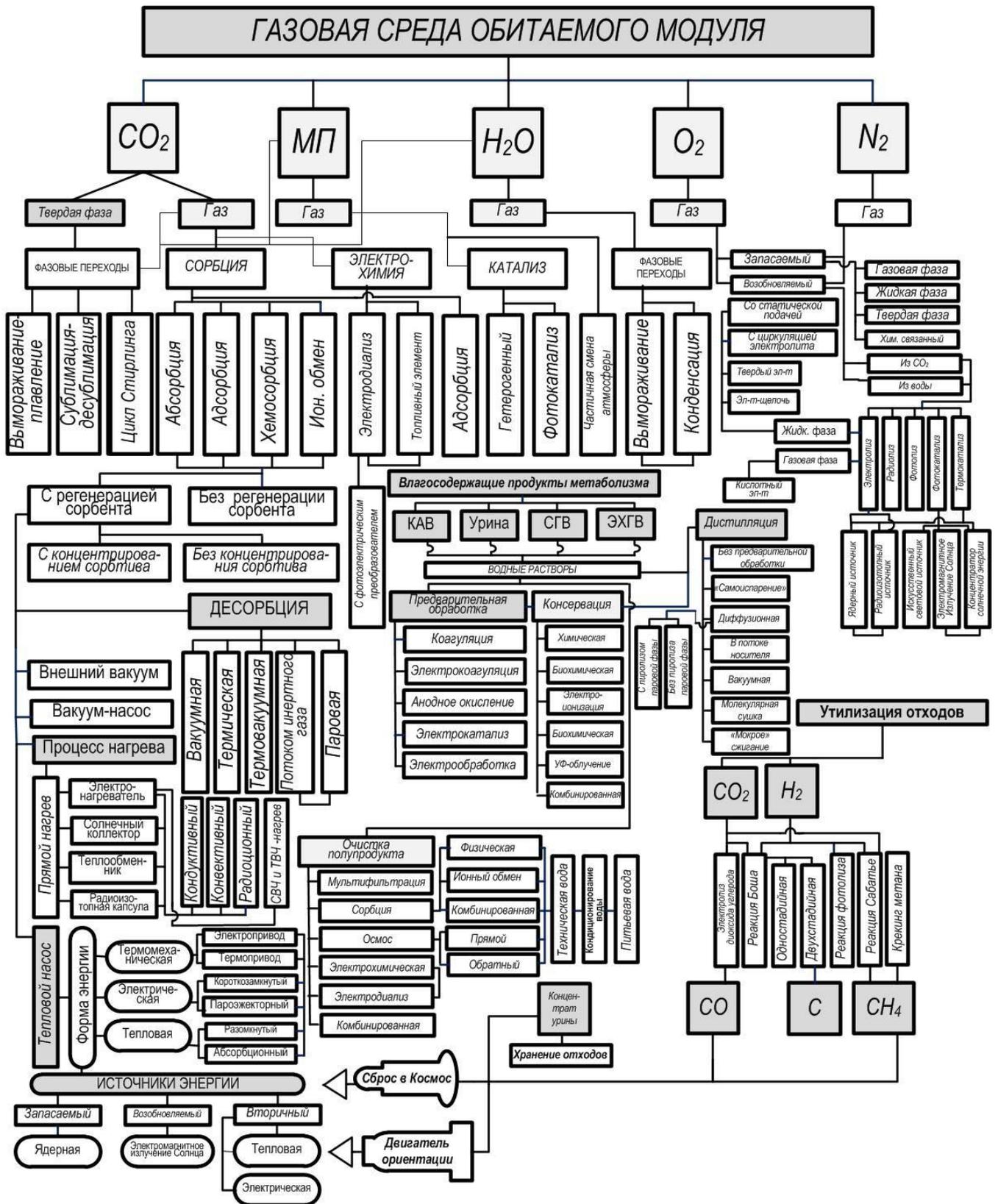


Рис. 3. Морфологическая карта технологий ИСЖО

– в настоящее время исследовано и частично применяется незначительное число альтернатив, которые ориентированы, в основном, на одноцелевые техноло-

- гии, используют в качестве первичной электродинамическую форму энергии и требуют промежуточных преобразований, приводящих к снижению эффективности системы;
- при организации технологических процессов в системах и блоках ИСЖО целесообразно применение в качестве первичных таких форм энергии как: электромагнитная солнечного излучения, тепловая, химическая и отрицательноупругостная;
 - оценка эффективности функционирования отдельной системы жизнеобеспечения может быть корректно осуществлена при условии учета эффективности преобразования энергии в применяемой технологии.

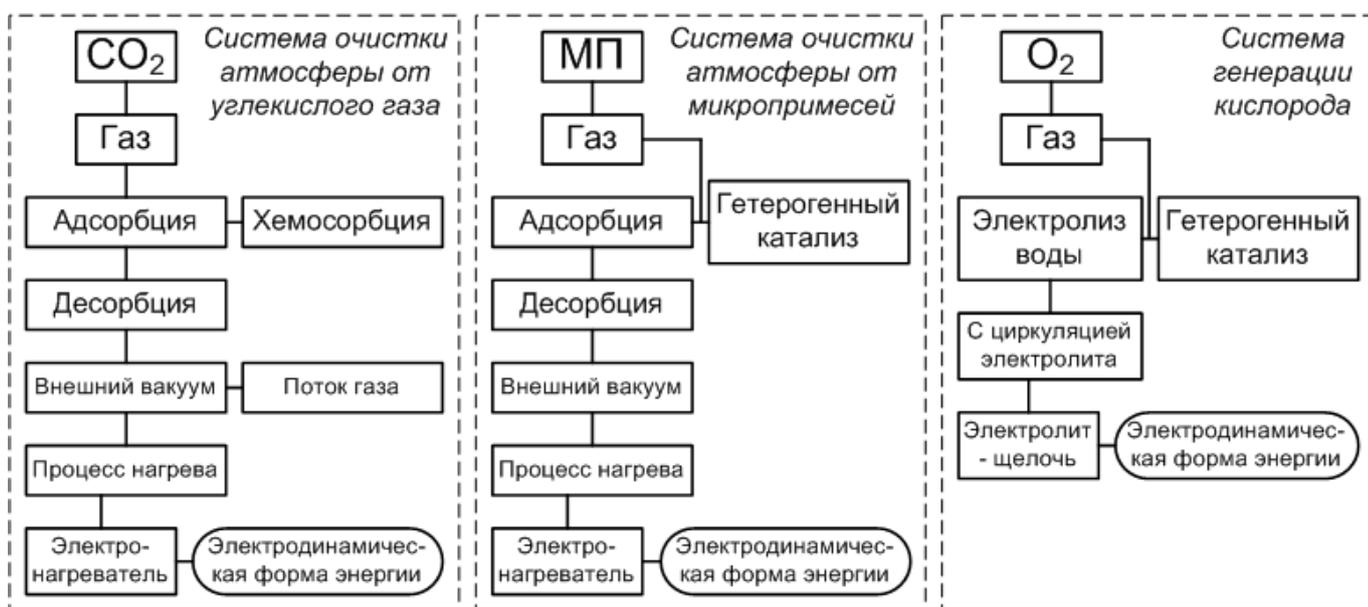


Рис. 4. Фрагменты морфологической карты, описывающие subsystemы обеспечения газового состава Российского Сегмента МКС

На рис. 4 и 5 приведены фрагменты морфологической карты, описывающие системы обеспечения газового состава и водообеспечения Российского сегмента МКС.

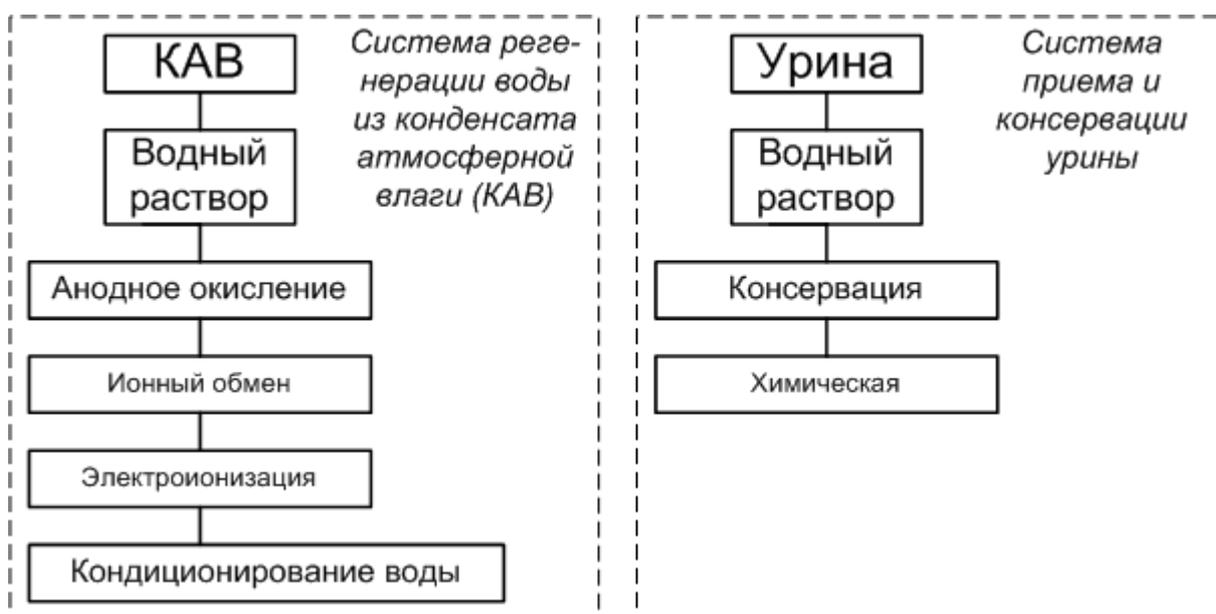


Рис. 5. Фрагменты морфологической карты, описывающие подсистемы водообеспечения Российского Сегмента МКС

Исходя из целевого назначения ЭТС МКА, заключающейся в создании и поддержании по заданной программе условий, гарантирующих экипажу физическую и психосоциальную устойчивость с заданной степенью надежности, формальная структура ИСЖО (системы S) может быть определена как адаптивная, временная, топологически определенная, иерархическая структура, находящаяся в состоянии упреждающей целевой готовности. При этом система S характеризуется [5]:

- иерархичностью структуры;
- наличием взаимосвязанных и взаимодействующих между собой систем и функциональных блоков;
- зависимостью законов функционирования отдельных систем от их места в структуре ИСЖО.

Интегрированная система жизнеобеспечения должна обладать рядом интегративных (общесистемных) и характеристических свойств.

Поэтому при ее декомпозиции необходим учет постулата целостности, в соответствии с которым

$$\forall r_i, S \equiv S(|S|, \bar{S},) \exists! Q(S) \equiv \{Q_i(S)\} \quad \text{при } i = \overline{1, n}; \{Q_r \cap Q_i\} \neq \emptyset. \quad (5)$$

В выражении (5): $r_i (r_i \in r)$ – способ декомпозиции структуры $|S|$; Q_i – свойство системы; Q – множество свойств системы S , определяемое только системой и не зависящее от способа декомпозиции r_i .

Для любой отдельной системы и ИСЖО в целом баланс веществ в обобщенном материальном потоке \dot{M}_Σ является основным условием, позволяющим оценить интенсивности выделения и переработки продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания, необходимое количество запасаемых веществ и тупиковых отходов.

В системах жизнеобеспечения на основе запасов веществ, материальный баланс обеспечивается относительно просто из-за автономности отдельных функциональных блоков одноцелевого назначения. При преобразовании продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания экипажа, организация потоков массы осуществляется более сложно, вследствие замыкания отдельных материальных потоков.

С определения обобщенного материального потока \dot{M}_Σ начинается формирование требований к отдельным системам жизнеобеспечения с учетом программы полета, численности экипажа, типа межпланетного космического аппарата и тому подобных факторов. Анализ обобщенного материального потока позволяет ввести в

рассмотрение формальную структуру ИСЖО $|S_f|$, характеризующуюся необходимыми и достаточными связями для достижения цели ЭТС МКА \underline{C} .

Данной формальной структуре можно поставить в соответствие дискретное множество материальных структур $\{|S_{jm}|\}$ системы S , являющихся различными формами ее реализации, учитывая, что для определенной цели ЭТС МКА (системы S) существует лишь единственная формальная структура $|S_f|$ из-за однозначного логического определения цели системы.

Формальная структура ИСЖО приведена на рис. 6. На этом же рисунке приведена формальная структура отдельной подсистемы ИСЖО, образованной из элементарных структур – обобщенных функциональных блоков.

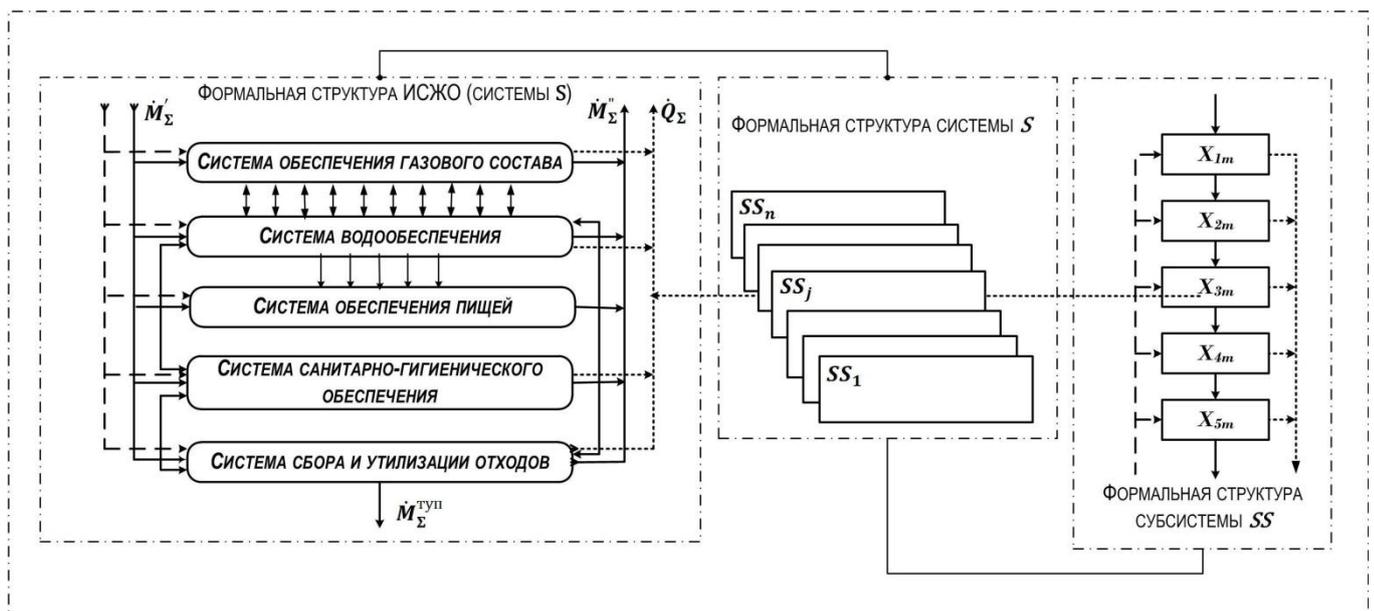


Рис. 6. Формальная структура интегрированной системы жизнеобеспечения

Результаты анализа основных характеристик системы энергообеспечения (СЭО), применяемых в настоящее время и находящихся в стадии разработки, показывают, что использование известных источников и преобразователей энергии не

позволяет существенно повысить их эффективность и снизить массу. Поэтому при проектировании ИСЖО особое значение приобретает решение проблемы минимизации энергозатрат на основе перехода к синэнергетическим структурам на основе принципа повышения уровня организации.

Искусственно организованные процессы преобразования технологических потоков в системе S являются односторонними необратимыми процессами. Необратимость данных процессов увеличивается при возрастании величин отклонений значе- ний параметров состояния потоков от их значений во внешней среде.

Практически любая интенсификация технологических процессов приводит к увеличению мощности потоков диссипированной энергии, которую для обеспечения устойчивого функционирования ИСЖО необходимо отвести от последней. Поддер- жание необходимых для экипажа температурно-влажностных параметров и устой- чивого функционирования subsystem и функциональных блоков определяет значе- ние суммарного потока теплоты \dot{Q}_Σ , которым ИСЖО обменивается с системой обес- печения теплового режима (СОТР). Суммарный поток теплоты \dot{Q}_Σ , определяет за- траты массы на поддержание параметров состояния газовой среды обитаемого мо- дуля и работу subsystem и функциональных блоков ИСЖО.

Вторичная декомпозиция системы $E \equiv E(|E|, \bar{E}, \underline{C})$ определяет ее формальную структуру $|E_f|$, которая в соответствии с программой полета и конкретным типом МКА переходит в материальную, характеризующую внешнюю относительно ИСЖО среду с известными свойствами – систему $E_m^o \equiv E_m^o(|E_m^o|, \bar{E}_m^o, \underline{C})$ (рис. 7).

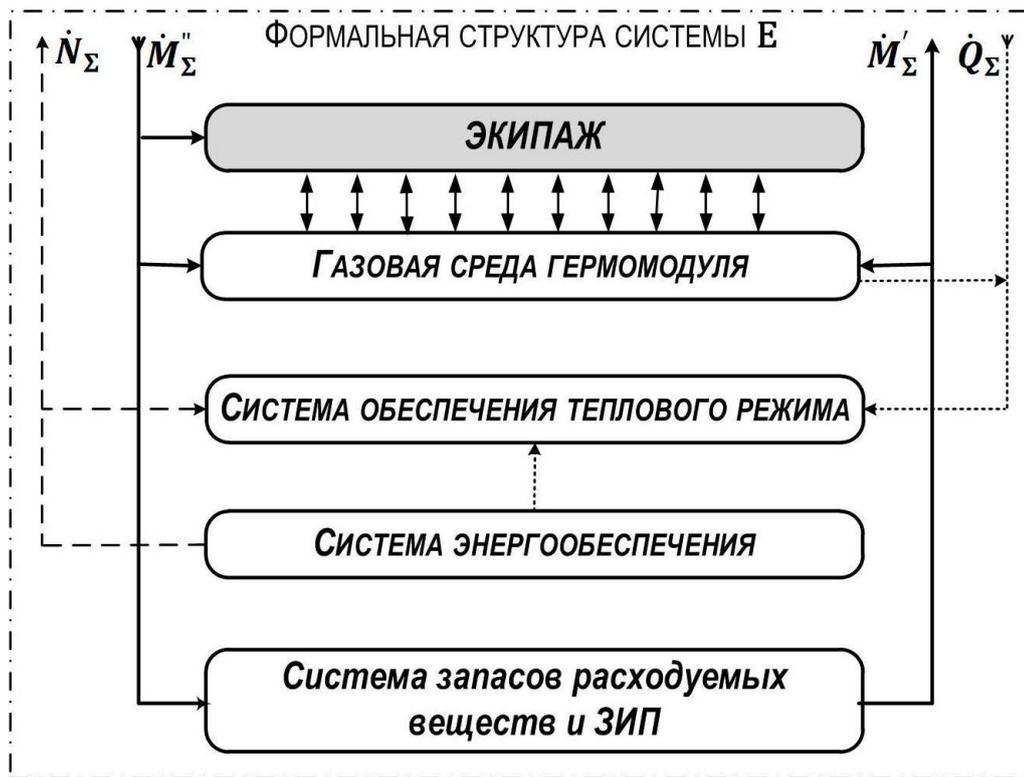


Рис. 7. Формальная структура системы Е, описывающей внешнюю относительно ИСЖО среду

Результаты анализа формальной структуры системы E_m^0 показывают, что при выборе технологий для ИСЖО необходим учет характеристик интерфейсов разрабатываемой системы с системами СЭО и СОТР, так как от данных характеристик во многом зависит возможность эффективного применения технологии преобразования массовых и энергетических потоков в технологической структуре ИСЖО.

На основе морфологической карты и введенных формальных структур может быть построена интегрально-гипотетическая технологическая структура ИСЖО в виде структурного графа, которая формализуется логическими высказываниями с применением плекс-грамматик и особых скобочных нормальных форм булевой алгебры и применяется для решения исходной задачи синтеза технологической структуры системы.

Принципы выбора перспективных технологий

Рассматриваемые принципы решения исходной задачи синтеза технологической структуры ИСЖО как синэнергетической системы основаны на применении:

- основных законов энергоэнтропикаки: уменьшения энтропии открытых систем, предельного развития и конкуренции [8];
- принципа повышения уровня организации технологической структуры ИСЖО;
- 12 принципов «зеленой» химии [9];

Из результатов анализа исходных предпосылок следует, что:

- *технологическая структура ИСЖО должна обеспечить безотказную работу системы при минимальных значениях стартовой массы, энергопотребления и запасов ЗИП и расходующих веществ;*
- *при формировании технологической структуры должен учитываться принцип повышения уровня организации;*
- *применяемые технологии должны обеспечить преобразование продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания при значениях температур и давлений, не приводящих при нештатных ситуациях к возникновению опасности для экипажа;*
- *компоненты среды обитания не должны потребляться другими технологиями, приводящими к изменению их свойств;*
- *применяемые технологии не должны включать промежуточные стадии, приводящие к дополнительным затратам;*

- должны быть исключены сорбенты, катализаторы, консерванты и стабилизаторы, вызывающие загрязнения среды обитания экипажа;
- предпочтительными являются технологии на основе электрохимических, каталитических и фот каталитических процессов, а также СВЧ- и ТВЧ-нагрева.

Обобщенная модель эффективности

Решение исходной задачи синтеза технологической структуры должно основываться на определенной модели эффективности, позволяющей принимать решения на каждом этапе внешнего и внутреннего проектирования ИСЖО (рис. 8).

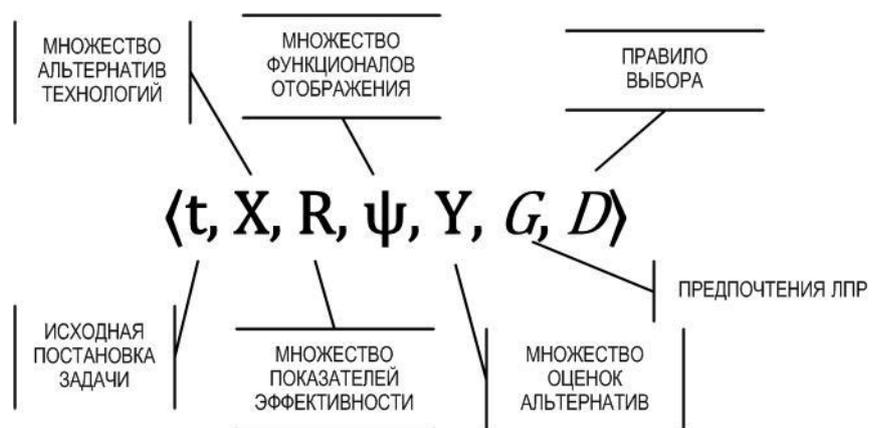


Рис. 8. Общая постановка задачи принятия решения

При проектировании ИСЖО 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 [10].

В настоящее время в качестве основных при проектировании ИСЖО применяются три показателя эффективности: степень замкнутости по компонентам среды обитания ЗКСО, эквивалентная масса системы ЭМС, уровень технической готовности УТГ [11]. Результаты сопоставления данных показателей приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты сопоставления применяемых показателей эффективности

Свойство	Показатель эффективности		
	ЗКСО	ЭМС	УТГ
Важное? Фундаментальное?	ДА	ДА	ДА
Где применяется?	ЭТС	ИСЖО	Планирование НИР/ОКР
Цель применения	Увеличение рецикла веществ	Уменьшение стартовых затрат	Анализ прогресса разработок
Эффект	Переработка всех продуктов метаболизма	Переработка при сохранении массы	Обоснование НИР/ОКР
Показатель оценки?	НЕТ	ДА	ДА
Единственный показатель выбора структуры?	НЕТ	НЕТ	ДА
Актуальный для использования?	НЕТ	ДА	НЕТ
Другие показатели нивелируются?	НЕТ	ДА	НЕТ
Может ли влиять на финансирование?	ДА	ДА	ДА
Оправдываются ли более дешевые проекты?	ДА	ДА	НЕТ

Как мера информативности качества преобразуемого технологического потока вводится термодинамическая функция неравновесного относительно внешней среды состояния. Эта функция – «удельная эксергия потока вещества» в виде

$$e_{fl} \equiv (h_{fl} - h_{env}) - T_{env}(s_{fl} - s_{env}) + \sum_i \varphi_{ifl}(n_{ifl} - n_{ienv}). \quad (6)$$

Полезный эффект от функционирования системы можно выразить через эксергетическую производительность W_e

$$W_e = P_{eS}^{us} \Delta \tau_S^{func}. \quad (7)$$

Тогда в качестве основного критерия эффективности, имеющего определенный физический смысл, при синтезе технологической структуры ИСЖО может быть применена целевая функция термомассовой оптимизации [12]

$$m_S^{\Sigma} = (A_{1S}m_S + m_{pr.m}V_{pr.m}^S) + A_{2S}m_{POWS} \left[\frac{2}{\eta_S} + \vartheta_S^{tech} \left(\frac{1}{\eta_S} - 1 \right) \right] + A_{2S}m_{TCS} \left(\frac{1}{\eta_S} - 1 \right) + m_S^{ad}. \quad (8)$$

В выражениях (6)÷(8): A_{1S} и A_{2S} – коэффициент резервирования и коэффициент увеличения энергопотребления; e_{fl} – удельная эксергия потока вещества; h_{fl}, n_{ifl}, s_{fl} – удельные значения энтальпии, количества вещества i -ого компонента и энтропии при параметрах потока; $h_{env}, n_{ienv}, s_{env}$ – значения тех же параметров в окружающей среде; $m_S, m_{pr.m}, m_{POWS}, m_{TCS}, m_S^{ad}$ – значения удельных масс собственно системы, гермомодуля, системы энергообеспечения, системы терморегулирования и дополнительной массы, соответственно; P_{eS}^{us} – полезная эксергетическая мощность системы; T_{env} – температура окружающей среды; $V_{pr.m}^S$ – объем гермомодуля, определяемый инсталляцией системы; ϑ_S^{tech} – температурный уровень процесса преобразования; η_S – эксергетический КПД системы; $\Delta\tau_S^{func}$ – время функционирования системы; φ_{ifl} – химический потенциал i -ого компонента при параметрах потока.

Окончательное решение по эффективности проектируемой системы принимается на основе решения многокритериальной задачи выбора с использованием локальных количественных и качественных показателей эффективности с учетом неопределенности в исходной информации.

Заключение

Интегрированная система жизнеобеспечения как абиотическая часть сложной эколого-технической системы МКА должна проектироваться «сверху – вниз», то есть процесс проектирования должен иметь нисходящий характер. При переходе от одной стадии к другой увеличивается детализация описаний.

Проектные решения принимаются в условиях риска и неопределенности, необходимости согласования принимаемых на всех уровнях решений, использования упрощенных функциональных описаний проектируемых subsystem и знаний о характеристических и интегративных свойствах, неполноты информации, получаемой в вычислительных, полунатурных и натуральных экспериментах.

Библиографический список

1. Jones H. Comparison of Bioregenerative and Physical/Chemical Life Support Systems // Proceeding of 36th International Conference of Environmental Systems. SAE Technical Paper 2006-01-2082. 14 p.
2. Курмазенко Э.А., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Прошкин В.Ю., Хабаровский Н.Н. Космические эколого-технические системы: статус и направления развития интегрированных систем жизнеобеспечения межпланетных космических аппаратов // Инженерная экология. 2015. № 2(116). С. 2-26.
3. Строгонова Л. Б., Столярчук В.А., Макарова С.М., Васин Ю.А. Лунная база, проблемы обитаемости // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41586>

4. Jones H., Hodson E.W., Kliss M.H. Life Support for Deep Space and Mars. // Proceeding of 44th International Conference of Environmental Systems. 2014. ICES-2014-074. 15 p.
5. Kurmazenko E.A., Gavrillov 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. // Proceedings of 60th International Astronautical Congress. Daejeon. Republic of Korea. 2009. 12 p.
6. Умов Н.А. Избранные сочинения. – М.: ГИТТЛ, 1950. - 506 с.
7. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. – М.: Наука, 1981. - 496 с.
8. Алексеев Г.Н. Энергоэнтропика. – М.: Знание, 1983. - 192 с.
9. Anastas P.T., Warner J.C. Green Chemistry: Theory and Practice. - Oxford University Press. New York. 1998. - 236 p.
10. Смерчинская С.О., Яшина Н.П. Агрегирование предпочтений с учетом важности критериев // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63146>
11. Jones H. Don't Trust a Management Metric, Especially in Life Support // Proceeding of 44th International Conference of Environmental Systems. 2014. ICES-2014-073. 10 p.
12. Kurmazenko E., Korobkov A., Tsygankov A., Kochetkov A. Exergy approach to Evaluating the Effectiveness of Regenerative Life - Support Systems // Proceedings of 66th International Astronautical Congress. Jerusalem. Israel. 2015, 12 p.