

УДК 629.7.048

Глобальные критерии эффективности и их иерархия при анализе систем жизнеобеспечения для экипажей космических станций

Прошкин В.Ю.*, Курмазенко Э.А.**

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

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

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

Аннотация

Для анализа систем жизнеобеспечения (СЖО) экипажей космических станций предложено применять глобальные критерии эффективности (ГКЭ): живучесть, себестоимость, комфортность. Иерархия ГКЭ относительно друг друга зависит от типа и особенностей СЖО. Ограничения для ГКЭ, связанные с особенностями конкретной СЖО (критические параметры), учитываются как коэффициенты влияния.

Ключевые слова: системы жизнеобеспечения, глобальные критерии эффективности, живучесть, себестоимость, комфортность, иерархия глобальных критериев

Введение

На Международной космической станции (МКС) и в будущем, при создании новых обитаемых космических станций, лунной и планетных баз, системы жизнеобеспечения (СЖО) экипажа являются одной из ключевых технологий. Сегодня на борту МКС разные СЖО [1-7] – это набор отдельных систем, слабо связанных друг с другом. Рассмотрение и анализ СЖО, в большинстве случаев, идет индивидуально для каждой системы. Поэтому актуальным является рассмотрение всех системы в качестве единого интегрированного комплекса СЖО (КСЖО). Подобный подход – новый закономерный этап развития СЖО, который можно применить не только к будущим космическим станциям, но и уже сейчас к МКС. КСЖО экипажа:

- включает в свой состав все СЖО;
- учитывает взаимосвязи отдельных СЖО в комплексе;
- рассматривает экипаж и его действия как часть комплекса;
- взаимодействует с другими системами космического аппарата;
- оптимизируется с позиции подготовки и проведения космического полета.

Глобальные критерии эффективности, их оптимизация и ограничения

Есть множество частных критериев эффективности (ЧК), по которым можно анализировать и оценивать СЖО. Разные ЧК противоречат друг другу, что делает затруднительной общую оптимизацию даже для отдельной СЖО, а тем более для КСЖО. Поэтому, все множество ЧК предлагается разбить на 3 группы, которые образуют три обобщенных глобальных критерия эффективности (ГКЭ). При этом:

- каждый ГКЭ объединяющий в себе ряд ЧК;
- ЧК в одном ГКЭ не противоречивы и не конкурируют друг с другом;
- каждый ГКЭ имеет область ограничений.

Этими ГКЭ будут: живучесть G, себестоимость С и комфортность F.

ГКЭ живучесть объединяет ЧК надежность, устойчивость в нештатной ситуации, ресурс, ремонтпригодность и т.д., включая влияние на живучесть других систем. Под живучестью СЖО понимается способность в течение данного времени:

- обеспечивать выполнение своих функций;
- противодействовать отклонению выходных параметров системы;
- поддерживать внутренние параметры системы на заданном уровне;
- противодействовать отрицательному влиянию на систему отличий входных параметров и внешних воздействий от допустимого диапазона;
- восстанавливать работоспособность после нештатных ситуаций (НШС);
- сохранять работоспособность в условиях хранения и перерывов в работе.

Время, в течение которого должна быть обеспечена необходимая живучесть, определяет ресурс СЖО и, следовательно, количество систем на весь период полета.

ГКЭ себестоимость объединяет ЧК энергопотребление, масса, запасное оборудование (ЗИП) для обеспечения работы системы (включая доставку оборудования), затраты времени экипажа на обслуживание, материальные затраты на разработку и изготовление СЖО и т.д. Ресурс СЖО также в большей или меньшей степени входит в ГКЭ себестоимость (подробнее – см. ниже).

ГКЭ комфортность объединяет ЧК, которые определяют параметры среды обитания экипажа, внешнее влияние от СЖО, размещение систем, режимы работы и

управление СЖО, взаимодействие СЖО – экипаж – службы на Земле и т.д. При этом рассматривается не только комфортность в отношении экипажа (параметры среды обитания), но и комфортность в отношении других систем (параметры и требования для работы на борту систем, взаимосвязанных с СЖО – обеспечивающих работу (управление, энергопитание, отвод тепла и т.д.), поставляющих исходный или потребляющих конечный продукт в регенерационных СЖО и др.).

Первоначально использовать ГКЭ живучесть, себестоимость и комфортность предложено при проектировании автоматизированной системы управления КСЖО [8; 9]. Однако такой подход можно распространить на СЖО и КСЖО в целом: как при проектировании новых, так и при анализе существующих систем.

По каждому из ГКЭ для СЖО проводится оптимизация: максимум по живучести G и комфортности F и минимума по себестоимости C , при соответствующих областях ограничений для ГКЭ живучесть R_G , себестоимость R_C и комфортность R_F :

$$\begin{aligned} G &\rightarrow \max, & \text{при ограничениях} & C \in R_C; F \in R_F; \\ C &\rightarrow \min, & \text{при ограничениях} & G \in R_G; F \in R_F; \\ F &\rightarrow \max, & \text{при ограничениях} & G \in R_G; C \in R_C. \end{aligned} \quad (1)$$

При оптимизации по ГКЭ обязательным является рассмотрение СЖО в составе КСЖО и с позиций системного подхода [10; 11], при учете специфики эксплуатации на космической станции [3]. Как частный случай, можно взять более простую задачу: оптимизация ограниченного набора систем по одному из ЧК в

составе ГКЭ.

Области ограничений для ГКЭ (и ЧК в их составе) имеют две составляющие: общие ограничения при создании СЖО [11] и ограничения, связанные с конкретной СЖО исходя из особенностей ее конструкции и эксплуатации (критические параметры данной системы). Из опыта создания и эксплуатации СЖО, для общих ограничений можно на качественном уровне оценить степень их влияния на каждый ГКЭ по принципу: сильное, среднее, слабое влияние – таблица 1.

Таблица 1.

Влияние общих ограничений при создании СЖО на ГКЭ

Ограничения [11]	Степень влияния ограничений на ГКЭ		
	Живучесть	Себестоимость	Комфортность
Первый уровень значимости ограничений			
<i>Энергетические:</i> энергопотребление и отвод тепла	слабое	сильное	среднее (температура)
<i>Объемные:</i> возможность размещения СЖО, ЗИПа и расходуемых материалов в отсеке	слабое	сильное	среднее (объем отсека для экипажа)
<i>Массовые:</i> суммарная стартовая масса СЖО с учетом ЗИПа и расходуемых материалов	слабое	сильное	слабое
<i>Ресурсные:</i> безотказная работа в течение полета	сильное	сильное/среднее	слабое
<i>Скорость передачи информации:</i> можно ли управлять с Земли, требования к системе управления и подготовке экипажа	сильное/среднее	сильное/среднее	сильное/среднее (действия экипажа)
Второй уровень значимости ограничений			
<i>Безопасность:</i> безопасность экипажа при работе СЖО	слабое	среднее (затраты)	сильное
<i>Временные:</i> затраты времени экипажа на техническое обслуживание и при работе в НШС	слабое	сильное	сильное (работа экипажа)
<i>Радиационная стойкость:</i> радиационная стойкость используемых материалов	среднее	среднее (затраты на материалы)	среднее (наведенная радиация)
Третий уровень значимости ограничений			
<i>Техническая готовность:</i> достоверность имеющейся информации о СЖО и сроки проектирования	сильное/среднее	сильное	слабое
<i>Технологическая готовность:</i> сроки изготовления СЖО	слабое	сильное	слабое

<i>Возможность дальнейшей модернизации</i>	сильное	сильное	слабое
--	---------	---------	--------

В таблице 1 оценку можно заменить баллами: сильное влияние – 2 балла, среднее – 1 балл, слабое – 0 баллов, промежуточное сильное/среднее – 1,5 балла. Тогда суммарное влияние всех общих ограничений на ГКЭ (сумма баллов): на живучесть = 8 баллов, на себестоимость = 19 баллов, на комфортность = 8,5 баллов. Видно, что для СЖО общие ограничения больше влияют на ГКЭ себестоимость.

Каждое из ограничений, связанное с конкретной СЖО (критический параметр системы), также влияет на все ГКЭ, но при этом имеет свою степень влияния на каждый ГКЭ. Поэтому для оценки суммарного влияния критического параметра СЖО необходимо определить иерархию (значимость) ГКЭ относительно друг друга. Иерархия ГКЭ зависит от типа и особенностей СЖО, ее сложности и от наличия переработки внутри системы исходных веществ в конечные продукты.

Иерархия ГКЭ: регенерационные СЖО и ГКЭ живучесть

Регенерационные СЖО (РСЖО) связаны с непрерывными или циклическими процессами переработки или поглощения-выделения (системы очистки) различных веществ. Расходные вещества и компоненты в РСЖО, как правило, отсутствуют, и РСЖО имеют длительный период нахождения в эксплуатации. Число изделий конкретной РСЖО, которые работали на борту космических станций или проходили длительные испытания на Земле, очень ограничено (максимум ~10 штук и менее, включая все модификации системы). Поэтому, как показал опыт космических станций «Салют», «Мир» и МКС и опыт испытаний на Земле, различного вида нештатные ситуации (НШС) при эксплуатации РСЖО являются неизбежными [3;

12]. Следовательно, наиболее значимым для РСЖО является ГКЭ живучесть G.

В общем виде ГКЭ живучесть позволяет учесть все НШС, непредсказуемые и случайные факторы, наше незнание (неполное или недостаточное знание) каких-либо процессов, ошибочные решения при проектировании, изготовлении и эксплуатации систем, включая ошибки экипажа и служб на Земле.

Основными составляющими живучести будут:

1. Работоспособность и ресурс системы:

- естественная выработка ресурса (время наработки) в процессе работы;
- замена СЖО идет по неустранимому отказу, а не по времени наработки;
- отказ СЖО вызывается, как правило, НШС, а не выработкой ресурса;
- чем больше время наработки, тем, как правило, больше число НШС.

2. Устойчивость системы при НШС.

3. Наблюдаемость СЖО в процессе эксплуатации [3]:

- оценка технического состояния системы и ее комплектующих;
- распознавание НШС.

4. Внешнее воздействие системы и на систему (пример – см. [3]):

- возможность устранить возникшие НШС и их последствия;
- возможность коррекции недостатков СЖО, выявленных эксплуатацией;
- влияние СЖО на живучесть других систем.

Для повышения живучести требуется по вышеуказанным составляющим:

1. Обеспечить стабильность параметров и характеристик СЖО по мере выработки ресурса (времени наработки). При этом, если выявленные на опыте эксплуатации системы причины НШС будут устранены или минимизированы путем

изменения методик эксплуатации или подключением дополнительного оборудования, то это снизит число НШС (т.е. время наработки растёт, но число НШС падает).

2. После устранения НШС система должна:

- сохранять свою работоспособность;
- сохранять прежние значения параметров.

3. Повышение наблюдаемости системы с целью:

- прогноза технического состояния системы;
- распознавания НШС на максимально раннем этапе развития.

4. Внешнее воздействие системы и на систему:

- комплект дополнительного оборудования для устранения НШС и/или минимизации их последствий (пример – см. [3]);

- изначально заложить возможность доработки системы (действующей или последующей) по результатам ее эксплуатации;

- минимизировать влияние СЖО на другие системы, даже при штатной и стабильной работе, но особенно при колебаниях ее параметров и НШС;

- всегда рассматривать систему в составе комплекса СЖО [10].

ГКЭ живучесть задает конструкцию и внутреннюю структуру СЖО и наоборот, конструкция и внутренняя структура системы определяют ГКЭ живучесть.

Иерархия: живучесть > себестоимость > комфортность ($G > C > F$).

Будет для РСЖО с большим временем наработки (несколько месяцев и лет), которые работают постоянно (с допустимыми остановками), без технического

обслуживания. ГКЭ себестоимость таких РСЖО во многом определяется интегральными характеристиками (энергопотребление, эффективность работы, время наработки до отказа, масса и др.) за все время их длительной эксплуатации и поэтому более важна, чем ГКЭ комфортность. Назначение этих РСЖО: получение кислорода электролизом воды, очистка атмосферы от микропримесей и углекислого газа на регенерируемых сорбентах, концентрирование и переработка углекислого газа, дистилляция воды из урины, сбор конденсата атмосферной влаги и т.п. [3; 5; 6; 13-18]

Иерархия: живучесть > комфортность > себестоимость ($G > F > C$).

Будет для РСЖО, которые работают периодически и короткое время (часы) за один цикл работы, с возможным техническим обслуживанием между циклами. ГКЭ себестоимость таких РСЖО имеет меньшую значимость из-за небольшого времени их работы, а к качеству работы таких систем (т.е. к ГКЭ комфортность), напротив, предъявляются более высокие требования, чем к обычным РСЖО. Назначение этих РСЖО: скафандры регенерационного типа для выхода в открытый космос, некоторые системы и аппараты для очистки и подготовки воды или атмосферы (которые работают периодически или только в определенных условиях) и т.п.

Иерархия ГКЭ: СЖО на запасах и ГКЭ себестоимость

СЖО на запасах (СЖО-З) связаны с расходом при работе входящих в их состав веществ и компонентов, что однозначно определяет ресурс (время наработки) системы. Число изделий конкретной СЖО-З, которые работали на борту космических станций или проходили испытания на Земле, составляет, как правило,

~ 10-100 штук, что позволяет иметь значительно больший опыт эксплуатации таких систем. Конструкция СЖО-3 много проще, чем РСЖО, что, вместе с большим опытом эксплуатации, значительно снижает общее количество НШС с системой. Следовательно, наиболее значимым для СЖО-3 является ГКЭ себестоимость (С).

В общем виде ГКЭ себестоимость позволяет учесть все затраты материальных и нематериальных ресурсов и характеристики системы, т.е. всего того, во что обходится разработка, изготовление, доставка на борт и применение системы.

Основными составляющими себестоимости будут:

1. Материальные и нематериальные затраты:

- штатные затраты и параметры;
- масса доставок и запасное оборудование.

1.А. В составе затрат – время обслуживания, в том числе при НШС:

- время влияет на численность экипажа;
- численность экипажа – это масса доставки (экипаж + его обеспечение).

2. Расчетный ресурс (время наработки):

- относительно хорошая отработка систем;
- время наработки системы определено (\pm допустимые отклонения);
- замена системы идет по времени наработки;
- время наработки поддается расчету, срок замены предсказуем.

3. Связи системы на борту – внешняя себестоимость:

- параметры систем, взаимодействующих с рассматриваемой системой;
- условия работы других систем;

– взаимное влияние систем в комплексе СЖО.

Для снижения себестоимости требуется по вышеуказанным составляющим:

1. Минимизировать затраты:

- использовать стандартное и доступное оборудование;
- брать новое поколение оборудования (особенно электроника);
- заимствование существующих разработок (экономия времени и затрат);
- использование отработанных технологий.

1.А. Минимизировать время обслуживания в составе затрат:

- обеспечить устойчивость работы СЖО;
- автоматизация (экономия времени и минимизация ошибок экипажа).

2. Увеличение ресурса:

- оптимизация рассматриваемой системы;
- адаптация других систем для работы с рассматриваемой системой.

3. Связи системы на борту – минимизация внешней себестоимости:

- адаптация рассматриваемой системы для работы с другими системами;
- совместная оптимизация комплекса связанных систем.

ГКЭ себестоимость задает параметры СЖО и взаимодействующих с ней систем и наоборот, параметры систем определяют ГКЭ себестоимость.

Иерархия: себестоимость > комфортность > живучесть (С > F > G).

Будет для СЖО-3 с относительно простой конструкцией и процессами (что дает устойчивость работы и минимизацию НШС, т.е. исходно имеется высокая живучесть) и жесткими требованиями к качеству их работы (комфортности).

Назначение этих СЖО-3: подача воды и газа запасов, наиболее простые процессы

очистки воды и атмосферы на нерегенерируемых поглотителях и т.п.

Иерархия: себестоимость > живучесть > комфортность (С > G > F).

Будет для СЖО-3 с более сложной конструкцией и процессами (больше риск НШС и степень их влияния, т.е. больше требования к живучести) и, как правило, более широким диапазоном качества их работы (комфортности). Назначение таких СЖО-3: большинство процессов регенерации воды и атмосферы с расходом компонентов, консервация отходов (расход – это консервант и емкости), получение кислорода при химическом разложении кислородосодержащих веществ (например, $2\text{KClO}_3 \rightarrow 2\text{KCl} + 3\text{O}_2$; себестоимость – масса, живучесть – срок хранения и протекание реакции с возможной НШС, комфортность – качество кислорода) и т.п.

Ресурс СЖО в составе ГКЭ живучесть и себестоимость

Ресурс (время наработки) СЖО с одной стороны составляющая ГКЭ живучесть, а с другой – ГКЭ себестоимость. Степень вхождения ресурса в состав каждого из критериев определяется характеристиками конкретной СЖО – таблица 2.

Таблица 2.

Ресурс, характеристики СЖО и ГКЭ живучесть и себестоимость

Характеристика СЖО	Ресурс часть ГКЭ себестоимость	Ресурс часть ГКЭ живучесть
Основа системы	Запасы компонентов	Процессы регенерации
Сложность системы	Техническая простота	Техническая сложность
Время работы	Короткое	Длительное
Число систем	Много	Мало
Отработка системы	Хорошая	Недостаточная
Внешнее влияние	Слабое	Сильное
Ресурс определяется	Временем наработки	Непредсказуемыми НШС
Замена системы	По количеству продукта, времени	По отказу в неустранимой НШС
Ресурс системы	Определен ± допуск	Не установлен

Как пример рассмотрим российские СЖО: технологический блок (ТБ) – блок жидкостной системы генерации кислорода (СГК) «Электрон-ВМ» [13] и блок колонок очистки (БКО), которые работают на МКС с момента ее создания в 2000 г.

В системе «Электрон-ВМ» получают кислород для дыхания экипажа электролизом воды с циркуляцией щелочного электролита через электролизер, разделением смеси газ-жидкость в статических разделителях и каталитической очисткой кислорода. Все технологические процессы реализованы в ТБ системы: наборе взаимосвязанных аппаратов, объединенных в моноблок. Масса ТБ 160 кг (из 164 кг всей СГК), проектный ресурс (наработка без учета времени стоянок) 365 суток, срок нахождения в эксплуатации (хранение до начала работы + наработка + стоянки) 7 лет. Реальная наработка ТБ на МКС идет до неустранимого отказа. Всего на МКС работало 8 ТБ (включая работающий сейчас) и еще 3 ТБ проходило длительные испытания на Земле. Идет постоянная модернизация конструкции ТБ и аппаратов в его составе (по результатам эксплуатации и испытаниям на Земле, для большей технологичности изготовления и из-за проблем со смежниками), так что каждый новый ТБ отличался от предыдущего. Наиболее радикальные изменения, вместе с переносом производства ТБ и его аппаратов в «НИИхиммаш», были в 2005 г., и можно разделить ТБ до этой модернизации (5 на МКС и 2 на Земле) и после нее (3 на МКС и 1 на Земле). Реальный ресурс и срок нахождения в эксплуатации для ТБ не определен. Фактическая наработка ТБ на МКС колебалась в широких пределах, зависела от НШС и внешнего влияния [3] и для некоторых ТБ была меньше заложенного ресурса 365 суток. Модернизация и новые подходы к эксплуатации СГК «Электрон-ВМ» резко сократили число НШС. Нарботка (без учета стоянок)

ТБ на МКС достигла 1265 суток до отказа для ТБ 009 в 2006-2011 гг. и 1455 суток без отказа для ТБ 011 с 2011 г. на сегодня – 31.01.2018 г. При этом, ТБ 011 был изготовлен и испытан на функционирование в апреле 2008 г. (до 2011 г. хранился в запасе), т.е. в эксплуатации 9,8 лет. ТБ 010 проходит различные виды испытаний на Земле с июня 2005 г. (в эксплуатации 12,5 лет), наработал 842 суток и сохраняет работоспособность. Сегодня стоит задача для ТБ на борту МКС достичь наработки в 5-6 лет.

Вывод: ресурс ТБ системы «Электрон-ВМ» является составляющим ГКЭ живучесть. Иерархия ГКЭ ТБ: живучесть G > себестоимость С > комфортность F.

БКО – сменный аппарат системы водообеспечения МКС, представляет собой 5 последовательно соединенных колонок, содержащих активные угли и ионообменные смолы, которые удаляют примеси (очистка) из воды при ее прохождении через блок (поток воды обеспечивает внешний побудитель расхода). БКО применяется в системе регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К) [17] и при совместной работе с системой «Электрон-ВМ» для удаления примесей из воды, идущей на подпитку в ТБ. Масса БКО 17,0-17,5 кг, включая ≈ 3 л воды в БКО (блок поставляют заправленным). Ресурс по воде 300 л (очистка конденсата, воды запасов из системы «Родник» и воды, полученной дистилляцией из урины) или 600 л (очистка воды из топливных элементов пилотируемого корабля «Space Shuttle» и деиодированной воды запасов). Всего на МКС работало 95 БКО, включая работающие сейчас (67 в СРВ-К и 28 совместно с системой «Электрон-ВМ»). Замена БКО шла по выработке ресурса (максимальные отклонения при эксплуатации ± 10 %). Конструкция БКО не менялась за весь период эксплуатации.

НШС с БКО не зафиксированы.

Вывод: ресурс БКО является составляющим ГКЭ себестоимость. Иерархия ГКЭ БКО: себестоимость $C >$ комфортность $F >$ живучесть G .

Иерархия ГКЭ: аварийные СЖО и ГКЭ комфортность

Аварийные СЖО (СЖО-А) применяют непосредственно в момент НШС или после нее и готовят к применению при потенциальной угрозе НШС. СЖО-А обеспечивают защиту экипажа и ликвидацию последствий НШС, а также поддерживают работоспособность технических систем в НШС и после нее. СЖО-А хорошо отработаны на Земле, а на борту их применяли $\approx 1-2$ раза в НШС или не применяли вообще. Главное для СЖО-А – в полном объеме выполнить свое назначение. Следовательно, наиболее значимым для СЖО-А является ГКЭ комфортность.

В общем виде ГКЭ комфортность – это качество работы СЖО, что для СЖО-А равнозначно защите экипажа в НШС (и, в определенной мере, защите техники).

Основными составляющими комфортности будут:

1. Параметры среды обитания:

- оптимальность для экипажа;
- стабильность во времени;
- влияние СЖО на среду обитания (шум, запах и др.);
- занимаемый объем и расположение в гермоотсеке.

2. Влияние на экипаж:

- взаимодействие система – экипаж;

– потенциальная опасность для экипажа при штатной работе и при НШС.

3. При аварии и НШС:

– защита и спасение экипажа;

– поддержание работы техники, необходимой для спасения экипажа.

4. Комфортность для технических систем:

– для рассматриваемой СЖО;

– для взаимосвязанных систем на борту станции;

– для служб и средств обеспечения на Земле.

Для повышения комфортности требуется по вышеуказанным составляющим:

1. Оптимизация параметров среды обитания:

– автоматизированная система управления;

– выбор соответствующих алгоритмов управления и режимов работы;

– создание соответствующих методик эксплуатации;

– минимизировать негативное влияние на окружающую среду в отсеке.

2. Влияние на экипаж:

– высокие требования по эргономике;

– максимум автоматизации, минимум ручных операций;

– максимальная безопасность процессов в системе.

3. При аварии и НШС:

– приоритеты для экипажа: жизнь → здоровье → работоспособность;

– максимальное сохранение работоспособности технических систем.

4. Комфортность для технических систем:

– оптимальный режим для рассматриваемой СЖО;

- оптимальные режимы для взаимосвязанных систем на борту;
- оптимизация взаимосвязи и взаимодействия: борт станции – Земля.

ГКЭ комфортность задает взаимодействие, управление и методики в СЖО и наоборот, взаимодействие, управление и методики определяют ГКЭ комфортность.

Иерархия: комфортность > живучесть > себестоимость ($F > G > C$).

Будет для СЖО-А, которым необходимо кратковременно работать в неблагоприятных условиях непосредственного развития НШС: аварийно – спасательный скафандр, средства пожаротушения и т.п.

Иерархия: комфортность > себестоимость > живучесть ($F > C > G$).

Будет для СЖО-А, которые должны проработать определенное время, для ликвидации опасных последствий и их влияния на экипаж после НШС: аварийные средства очистки атмосферы, аварийный запас расходоуемых компонентов и т.п.

Связь ГКЭ комфортность СЖО с ГКЭ живучесть и себестоимость

ГКЭ комфортность (для экипажа и для технических систем) формально можно частично разложить на ГКЭ живучесть и ГКЭ себестоимость.

Комфортность для технических систем. При проектировании и эксплуатации рассматривают СЖО (или аппарат) в комплексе систем. Можно повысить уровень рассмотрения для ЧК в составе ГКЭ комфортность: узел → аппарат СЖО → комплекс СЖО → набор систем на борту → ... [10]. Проводится изменение соответствующих ЧК в составе ГКЭ живучесть и себестоимость более высоких уровней таким образом, чтобы при этом автоматически (или с высокой

вероятностью) обеспечивался заданный ЧК в составе ГКЭ комфортность на рассматриваемом более низком уровне. Т.е. меняются требования к другим системам. Однако при этом:

- возможность влияния на другие системы всегда ограничена;
- чем выше уровень рассмотрения, тем меньше возможность для влияния;
- уровень анализа нельзя повышать бесконечно;
- новые значения ЧК в ГКЭ живучесть и себестоимость – не оптимальны.

Следовательно, комфортность для технических систем всегда будет присутствовать, хотя ее и можно частично разложить на живучесть и себестоимость.

Комфортность для экипажа. Человека можно оценить по ГКЭ живучесть и себестоимость: время, силы, здоровье, адаптация, устойчивость в НШС и т.п.:

- наемный труд является такой оценкой с учетом квалификации человека;
- человека и технику при анализе рассматривают вместе, как части системы;
- по ГКЭ живучесть человек превосходит технику за счет интеллекта;
- способность к адаптации позволяет человеку находить решение в НШС;
- финансовая компенсация человеку, часто, меньше затрат на комфортность.

Формально можно снизить требования к ГКЭ комфортность для экипажа, получив большой выигрыш по ГКЭ живучесть и себестоимость. Однако, принятые в обществе морально-этические нормы (культура) не позволяют сознательно пренебречь жизнью и здоровьем экипажа. Следовательно, комфортность для экипажа всегда будет присутствовать, но с долей риска из-за ограничений ГКЭ комфортность.

Коэффициенты влияния критических параметров СЖО на ГКЭ

Сказанное про ГКЭ живучесть РСЖО, себестоимость СЖО-3 и комфортность СЖО-А (рис. 1), верно для всех СЖО на основе физико-химических процессов.

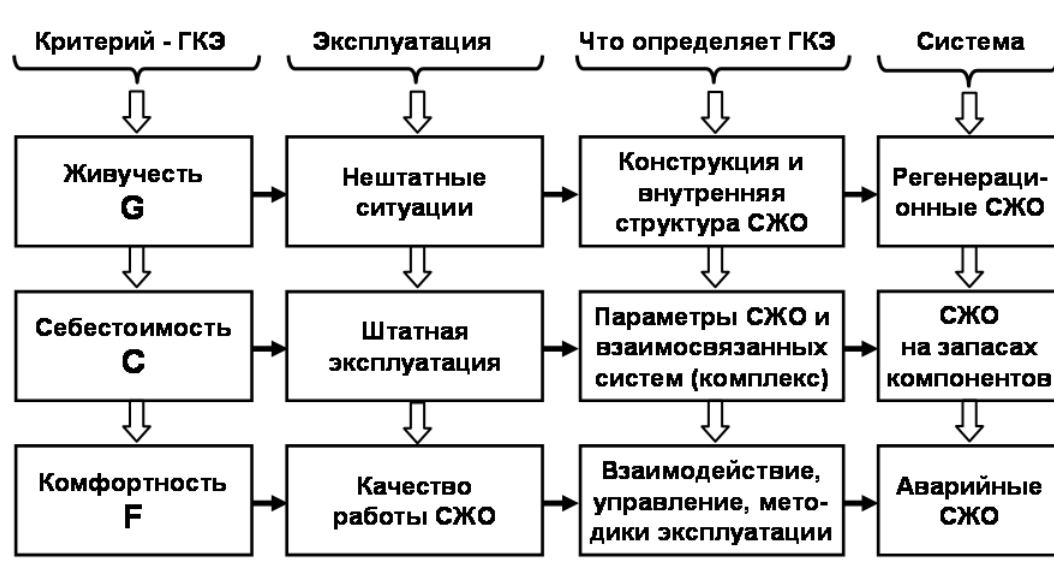


Рис. 1. Глобальные критерии эффективности для СЖО

Ограничения для ГКЭ, связанные с особенностями конструкции и эксплуатации конкретной СЖО (критический параметр СЖО), определяются специалистами исходя из опыта (выявленные критические параметры для существующих СЖО и предполагаемые критические параметры для вновь создаваемых СЖО). Для каждого критического параметра конкретной системы методом экспертных оценок определяются коэффициенты влияния на ГКЭ живучесть, себестоимость и комфортность – соответственно коэффициенты k_G , k_C и k_F . Каждый коэффициент влияния получает целое значение в диапазоне от 0 до 10 баллов, исходя из следующего (таблица 3):

- влияние незначительное (его нет или им можно пренебречь) – 0 баллов;
- влияние особое (исключительно сильное) – 10 баллов;

- для остального – 3 группы по степени влияния: сильное, среднее, слабое;
- внутри каждой из 3-х групп вводим второй уровень влияния, 3 подгруппы – сильное, среднее, слабое влияние (т.е. всего 9 подгрупп, баллы от 1 до 9).

Таблица 3

Коэффициенты влияние критического параметра СЖО на ГКЭ

Влияние	Уровень 2	Балл	k_{Σ} для {1, 3, 9}	k_{Σ}^*
Влияние особое		10	118-130	$9 < k_{\Sigma}^* \leq 10$
Влияние сильное	Сильное	9	105-117	$8 < k_{\Sigma}^* \leq 9$
	Среднее	8	92-104	$7 < k_{\Sigma}^* \leq 8$
	Слабое	7	79-91	$6 < k_{\Sigma}^* \leq 7$
Влияние среднее	Сильное	6	66-78	$5 < k_{\Sigma}^* \leq 6$
	Среднее	5	53-65	$4 < k_{\Sigma}^* \leq 5$
	Слабое	4	40-52	$3 < k_{\Sigma}^* \leq 4$
Влияние слабое	Сильное	3	27-39	$2 < k_{\Sigma}^* \leq 3$
	Среднее	2	14-26	$1 < k_{\Sigma}^* \leq 2$
	Слабое	1	1-13	$0 < k_{\Sigma}^* \leq 1$
Влияние незначительное		0	0	$k_{\Sigma}^* = 0$

Суммарный коэффициент влияния критического параметра на все 3 ГКЭ:

$$k_{\Sigma} = a_1 \cdot k_G + a_2 \cdot k_C + a_3 \cdot k_F \quad (2)$$

Где: a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты при коэффициентах влияния.

Из опыта создания и эксплуатации СЖО, весовым коэффициентам можно дать значения 1, 3, 9, т.е. $\{a_1, a_2, a_3\} \equiv \{1, 3, 9\}$, количественная оценка различия двух соседних ГКЭ в их иерархии составляет 3. Значения весовых коэффициентов из множества $\{1, 3, 9\}$ соответствуют иерархии ГКЭ данной СЖО. Например:

- ТБ системы «Электрон-ВМ» (иерархия $G > C > F$), $k_{\Sigma} = 9 \cdot k_G + 3 \cdot k_C + 1 \cdot k_F$;
- блок колонок очистки (иерархия $C > F > G$): $k_{\Sigma} = 1 \cdot k_G + 9 \cdot k_C + 3 \cdot k_F$.

В общем виде, весовые коэффициенты $\{a_1, a_2, a_3\}$ могут иметь иные значения, кроме $\{1, 3, 9\}$. Тогда можно использовать нормированное значение суммарного

коэффициента влияния k_{Σ}^* , которое всегда будет принимать значения от 0 до 10:

$$k_{\Sigma}^* = \frac{k_{\Sigma}}{a_1 + a_2 + a_3} = \frac{a_1 \cdot k_G + a_2 \cdot k_C + a_3 \cdot k_F}{a_1 + a_2 + a_3} \quad (3)$$

Иерархия ГКЭ: биотехнические системы

Биотехнические СЖО (БТСЖО) включают в свой состав биологические объекты (в первую очередь – растения) вместе с оборудованием, обеспечивающим их существование, и связаны с процессами получения пищи для экипажа и с частичной или полной регенерацией среды обитания (для экипажа и самой БТСЖО). На станциях «Мир» и МКС БТСЖО – небольшие экспериментально-исследовательские системы [19; 20]. На будущих планетных базах БТСЖО получат большее развитие. ГКЭ применимы к БТСЖО так же, как к СЖО на физико-химических процессах.

Как показал имеющийся опыт, биообъекты (растения) более чувствительны к параметрам среды обитания, чем человек, и, следовательно, менее живучи.

Особенностями ГКЭ живучесть для БТСЖО будут:

- обеспечение выживаемости биообъектов;
- сложность (БТСЖО – комплекс взаимосвязанных систем); [21]
- длительность работы;
- устойчивость (стабильность параметров при штатной работе и НШС);
- внешние воздействия;
- обеспечение необходимого ресурса.

БТСЖО имеют высокие массово-энергетические характеристики. Поэтому

особенностями ГКЭ себестоимость для БТСЖО будут:

- большая масса;
- большой занимаемый объем;
- высокое энергопотребление;
- время цикла: посев – рост (вегетация) – сбор урожая;
- трудозатраты экипажа;
- затраты ресурсов на обеспечения работы БТСЖО.

Из-за специфических требований к СЖО оранжерей (и других биообъектов, при их наличии), особенностями ГКЭ комфортность для БТСЖО будут:

- особая СЖО для оранжерей (и других биообъектов при их наличии);
- комфортность для самих биообъектов;
- связи в комплексе БТСЖО;
- комфортность продуктов БТСЖО для их потребления экипажем;
- взаимодействие БТСЖО – экипаж, включая психологическую разгрузку;
- взаимодействие БТСЖО – другие системы на борту.

В области создания БТСЖО проведено множество работ [19-23], однако:

- летные варианты полноразмерных БТСЖО для экипажа разработаны недостаточно, даже для начала их наземных испытаний;
- не согласованы четкие задачи для БТСЖО (варианты: психологическая разгрузка экипажа, витаминная оранжерея, получение 50 % пищи), численность экипажа и степень регенерации среды обитания экипажа с помощью БТСЖО;
- оценка эффективности БТСЖО (с получением 50 % пищи) по сравнению с СЖО на физико-химических процессах, показывает, что для использования БТСЖО

время существования планетной базы должно быть не менее 25 лет [24].

С учетом сказанного, в иерархии ГКЭ для БТСЖО все критерии можно оценить как равнозначные: живучесть \approx себестоимость \approx комфортность ($G \approx C \approx F$), и все весовые коэффициенты при коэффициентах влияния критического параметра (выражения 2 и 3) будут равны 1, т.е. $\{a_1, a_2, a_3\}_{\text{БТСЖО}} \equiv \{1, 1, 1\}_{\text{БТСЖО}}$.

Суммарный коэффициент влияния критического параметра на все 3 ГКЭ для БТСЖО $k_{\Sigma}|_{\text{БТСЖО}}$ принимает значения от 0 до 30 (таблица 3, выражение 2), но его нормированное значение (выражение 3) $k_{\Sigma}^*|_{\text{БТСЖО}}$ не изменится и будет от 0 до 10.

Другие варианты иерархии ГКЭ

При создании СЖО на основе физико-химических процессов и БТСЖО могут быть особые системы, в которых два ГКЭ равнозначны, а значимость третьего ГКЭ – больше или меньше. Основная характеристика таких систем дана в таблице 4.

Весовые коэффициенты при коэффициентах влияния критического параметра (выражения 2 и 3) для таких систем зависят от количественной оценки различия ГКЭ в их иерархии и могут составлять:

- низкое различие (3 раза), $\{a_1, a_2, a_3\} \equiv \{1, 1, 3\}$ или $\{1, 3, 3\}$;
- высокое различие (9 раз), $\{a_1, a_2, a_3\} \equiv \{1, 1, 9\}$ или $\{1, 9, 9\}$;
- среднее различие ($\sqrt{3 \cdot 9} = 5,2 \approx 5$ раз), $\{a_1, a_2, a_3\} \equiv \{1, 1, 5\}$ или $\{1, 5, 5\}$.

Таблица 4.

Другие варианты иерархии ГКЭ

Иерархия ГКЭ	Основная характеристика СЖО
Живучесть \approx себестоимость $>$ комфортность ($G \approx C > F$)	Технически сложная
Живучесть \approx себестоимость $<$ комфортность ($G \approx C < F$)	Работа при аварии и НШС
Живучесть \approx комфортность $>$ себестоимость ($G \approx F > C$)	Короткое время работы

Живучесть \approx комфортность $<$ себестоимость ($G \approx F < C$)	Система на запасах
Себестоимость \approx комфортность $>$ живучесть ($C \approx F > G$)	Технически простая
Себестоимость \approx комфортность $<$ живучесть ($C \approx F < G$)	Процессы регенерации

В каждом случае будет свой диапазон значений у суммарного коэффициента влияния критического параметра на все 3 ГКЭ $k_{\Sigma|др.}$ (таблица 3, выражение 2), но его нормированное значение (выражение 3) $k_{\Sigma}^*|др.$ не изменится и будет от 0 до 10.

Заключение

ГКЭ живучесть, себестоимость, комфортность и их иерархию можно применять при анализе существующих СЖО разного типа, и при создании новых систем. Выявляются критические параметры СЖО с наибольшим влиянием на конкретный ГКЭ и наибольшим суммарным влиянием на все три ГКЭ и определяются направления конструкторской и эксплуатационной модернизации. Подобный подход можно использовать и при декомпозиции СЖО на отдельные составляющие и при синтезе сложной СЖО (или комплекса СЖО) из более простых составляющих.

Зарубежными авторами в качестве критериев эффективности для анализа СЖО предложено три критерия – степень замкнутости (комплекса СЖО), эквивалентная масса, уровень технической готовности [25]. Также предложено как основной критерий эффективности брать эквивалентную массу СЖО и как вспомогательные – безопасность, радиационную стойкость, уровень технической готовности, денежные затраты, человеческий фактор, надежность и ремонтпригодность [26].

Высокая степень замкнутости комплекса СЖО не является свидетельством его

эффективности. Например, комплекс БТСЖО имеет значительно больше степень замкнутости, чем комплекс СЖО на основе физико-химических процессов. Однако, другие характеристики БТСЖО (в первую очередь, массово-габаритные и энергетические) не позволяют его применять на современных космических станциях.

Уровень технической готовности показывает состояние разработки технологий и СЖО, влияет на затраты времени и денег при создании СЖО, является общим ограничением при создании СЖО (см. выше таблицу 1), но не является характеристикой эффективности системы и не задает направления ее развития.

Эквивалентная масса и перечисленные выше вспомогательные критерии – это параметры СЖО и ограничения при их создании, которые имеют большое значение (особенно, эквивалентная масса), но не учитывают другие показатели.

Все указанные критерии эффективности для СЖО, рассматриваемые зарубежными авторами, не дают полной характеристики системы и как частные критерии эффективности входят в составе предлагаемых в статье трех ГКЭ. Кроме того, зарубежными авторами не учитывается различная степень значимости (иерархия) предлагаемых ими критериев в зависимости от типа СЖО. Таким образом, по сравнению с подходом зарубежных авторов, предлагаемый в статье подход на основе трех ГКЭ живучесть, себестоимость и комфортность, с учетом иерархии ГКЭ для СЖО разного типа, является более полным, учитывающим в комплексе все параметры и характеристики системы при ее проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Библиографический список

1. Бобе Л.С., Самсонов Н.М., Новиков В.М., Кочетков А.А., Солоухин В.А., Телегин А.А., Андрейчук П.О., Протасов Н.Н., Синяк Ю.Е. Перспективы развития систем регенерации воды обитаемых космических станций // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 69 - 78.
2. Bobe L., Kochetkov A., Tsygankov A., Korobkov A., Romanov S., Zeleznyakov A., Andreychuk P., Sinyak Yu.E. Design and Operation of Water Recovery Systems for Space Stations // 46th International Conference on Environmental Systems, Vienna, Austria, July 10-14, 2016, ICES-2016-28, pp. 10.
3. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Кочетков А.А., Гаврилов Л.И. Вопросы эксплуатации регенерационных систем обеспечения газового состава Российского модуля Международной космической станции // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35841>
4. Bagdigian R.M., Dake J., Gentry G., Gault M. International Space Station Environmental Control and Life Support System Mass and Crewtime Utilization in Comparison to a Long Duration Human Space Exploration Mission // 45th International Conference on Environmental Systems, Bellevue, Washington, USA, 12-16 July, 2015, ICES-2015-094, pp. 16.
5. Gentry G.J. International Space Station (ISS) Environmental Control and Life Support (ECLS) System Overview of Events: 2016-2017 // 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina, USA, 16-20 July, 2017, ICES-2017-059, pp. 10.
6. Carter L., Takada K., Brown C.A., Bazley J., Gazda D., Schaezler R., Thomas F. Status

of ISS Water Management and Recovery // 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina, USA, 16-20 July, 2017, ICES-2017-036, pp. 17.

7. Bockstahler K., Hartwich R., Matthias C., Witt J., Hovland S., Laurini D. Status of the Advanced Closed Loop System ACLS for Accommodation on the ISS // 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina, USA, 16-20 July, 2017, ICES-2017-135, pp. 11.

8. Малозёмов В.В., Зарецкий Б.Ф. Космические системы жизнеобеспечения: обеспечение жизнедеятельности экипажа в дальних космических экспедициях // Инженерная экология. 2012. № 2. С. 37 - 45.

9. Зарецкий Б.Ф., Морозов Г.И., Курмазенко Э.А., Прошкин В.Ю. Система управления средствами жизнеобеспечения экипажа космической станции // Пилотируемые полёты в космос. 2015. № 2. С. 49 - 66.

10. Прошкин В.Ю. Космические системы жизнеобеспечения: системный подход при разработке комплекса регенерационных систем жизнеобеспечения для обитаемых космических станций // Инженерная экология. 2014. № 2. С. 27 - 45.

11. 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 экипажей межпланетных космических аппаратов // Инженерная экология. 2014. № 2. С. 2 - 26.

12. Jones H.W. Reliability and Failure in NASA Missions: Blunders, Normal Accidents, High Reliability, Bad Luck // 45th International Conference on Environmental Systems, Bellevue, Washington, USA, 12-16 July, 2015, ICES-2015-045, pp. 10.

13. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А. Система генерации кислорода «Электрон-ВМ» на борту Международной космической станции // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 3. С. 84 - 99.
14. Коган И.Л. Расчетно-экспериментальный анализ работы реактора гидрирования диоксида углерода // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58453>
15. Бобе Л.С., Раков В.В., Аракчеев Д.В., Канаев П.А. Влияние неконденсирующихся газов на процесс теплообмена в центробежном дистилляторе системы регенерации воды из урины // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29414>
16. Юргин А.В., Романов С.Ю., Гузенберг А.С., Рябкин А.М., Телегин А.А. Эксплуатация системы удаления диоксида углерода из атмосферы Международной космической станции // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2008. Т. 42. № 6/1 дополнительный. С. 92 - 93.
17. Bobe L., Kochetkov A., Tsygankov A., Zeleznyakov A., Andreychuk P., Sinyak Ju.E. The Performance of the System for Water Recovery from Humidity Condensate (SRV-K) and the System for Urine Feed and Pretreatment (SPK-U) on Russian Segment of the ISS (Missions 1 through 37) // 44th International Conference on Environmental Systems, Tucson, Arizona, USA, July 13-17, 2014, ICES-2014-307, pp. 11.
18. Isobe J., Henson P., MacKnight A., Yates S., Schuck D., Winton D. Carbon Dioxide Removal Technologies for U.S. Space Vehicles: Past, Present, and Future // 46th International Conference on Environmental Systems, Vienna, Austria, July 10 - 14, 2016, ICES-2016-425, pp. 10.

19. Григорьев А.И., Сычев В.Н. Системы жизнеобеспечения космонавтов на основе биосферных механизмов // Вестник Российской академии наук. 2004. Т. 74. № 8. С. 675 - 689.
20. Morrow R.C., Wetzel J.P., Richter R.C., Crabb T.M. Evolution of Space-Based Plant Growth Technologies for Hybrid Life Support Systems // 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina, USA, 16-20 July, 2017, ICES-2017-301, pp. 9.
21. Морозов Г.И. Проектирование биотехнических систем жизнеобеспечения космонавтов. - М.: МАИ-Принт, 2010. - 187 с.
22. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я. Биологические системы жизнеобеспечения (замкнутые экологические системы). - М.: Синтез, 1994. - 278 с.
23. Escobar C.M., Nability J.A. Past, Present, and Future of Closed Human Life Support Ecosystems - A Review // 47th International Conference on Environmental Systems, (Charleston, South Carolina), USA, 16-20 July, 2017, ICES-2017-311, pp. 1 - 18.
24. Jones H. Comparison of Bioregenerative and Physical/Chemical Life Support Systems // 36th International Conference on Environmental Systems, Norfolk, Virginia, USA, July 17-20, 2006, SAE Technical Paper Series, 2006-01-2082, pp. 12.
25. 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-2014-073, pp. 10.
26. 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-2017-306, pp. 9.