

Оценка функциональной эффективности при проектировании систем пилотируемого космического аппарата для длительных автономных полетов

© А.Л. Потемкин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва,
Московская область, Королев, 141070, Россия

Рассмотрены решаемые на этапе разработки вопросы количественной оценки функциональной эффективности на примере систем жизнеобеспечения, являющихся одними из ключевых в пилотируемом космическом аппарате (ПКА). Дано определение функциональной эффективности систем жизнеобеспечения ПКА. Выделены формализованные частные комплексные показатели функциональной эффективности, такие как показатель функциональности, функциональной безопасности, функциональной надежности, стоимости, а также обобщенный комплексный показатель функциональной эффективности систем жизнеобеспечения. Предложен основанный на принципах квалиметрии и методе анализа оболочки данных Data Envelopment Analysis подход к формализации частных комплексных показателей и обобщенного комплексного показателя функциональной эффективности систем жизнеобеспечения ПКА с учетом «весомости» этих показателей. Данный подход позволяет интенсифицировать процесс разработки систем жизнеобеспечения ПКА за счет определения оптимальной конфигурации системы на ранних этапах проектирования.

Ключевые слова: регенерационные системы жизнеобеспечения, функциональная эффективность, комплексный показатель эффективности

Введение. Система жизнеобеспечения (СЖО) — сложная техническая система (СТС), включающая в себя подсистемы газового состава, водообеспечения, санитарно-гигиенического обеспечения и т. д. [1]. Ее главная задача — обеспечение необходимых физико-химических параметров среды, количества и качества потребляемых веществ (кислорода, воды, пищи), а также удаления продуктов жизнедеятельности [2] в условиях ПКА. Очевидно, что для выполнения этой задачи будут использованы различные научные, инженерные, технические решения, итоговая композиция которых влияет на облик системы, ее функциональную эффективность, формирующуюся из совокупности технических характеристик, надежности, безопасности и стоимости. Таким образом, функциональную эффективность СЖО ПКА можно представить как количественную характеристику, определяющую способность системы обеспечивать оптимальные показатели назначения, безопасности и надежности при минимальной стоимости.

В настоящее время для оценки эффективности СЖО, как правило, применяют лишь отдельные показатели, в частности, удельную массу, удельную производительность, энергопотребление и т. д., которые не в полной мере отражают совокупность параметров системы, обеспечивающих функциональную эффективность. Это может приводить к не вполне обоснованному выбору той или иной конкурирующей системы или ее составной части, а также к временным и финансовым затратам, возникновению непрогнозируемых отказов, необходимости незапланированных (дорогостоящих) замен, снижению надежности, безопасности и качества.

Цель настоящей статьи — представить разработку подхода к оцениванию функциональной эффективности СЖО ПКА с учетом выделения соответствующих показателей и критериев, а также способов их формализации.

Существующие подходы к определению критериев и показателей функциональной эффективности СЖО ПКА. Показателем эффективности СТС считается мера соответствующего свойства системы, определенная в течение обусловленного периода с учетом расхода ресурсов и воздействия внешней среды. Под критерием эффективности СТС понимается условие, на основе которого устанавливается показатель эффективности, выражающий меру соответствия достигнутых результатов требуемым значениям. Для выделения показателей и критериев оценивания функциональной эффективности СЖО ПКА рассмотрим различные подходы к их определению.

Характеризующие основные цели функционирования СТС критерии эффективности можно подразделить на три группы: функциональные, экономические, временные.

Для большинства СТС (включая СЖО ПКА) характерно наличие ряда критериев и соответствующих им показателей, одни из которых следует максимизировать, а другие — минимизировать.

К выбору оптимальной конфигурации СЖО ПКА, т. е. наиболее функционально эффективной, на основе соответствующих критериев и показателей существуют следующие подходы:

- оптимизация массы системы и степени сложности процессов регенерации [2];
- оптимизация суммарной стоимости всех подсистем СЖО (с учетом стоимости удаления появляющихся при их функционировании отходов);
- оптимизация себестоимости, дополненная критериями степени замкнутости, целевой функции термомассовой оптимизации, показателем автономности [3];
- оптимизация глобальных критериев эффективности (ГКЭ) и частных критериев эффективности (ЧКЭ), ранжированных с помощью

весовых коэффициентов [4]. В качестве ГКЭ рассматриваются *живучесть* (ЧКЭ — надежность, устойчивость в нештатной ситуации, ресурс, ремонтпригодность и т. д., включая влияние на живучесть других систем), *себестоимость* (ЧКЭ — энергопотребление, масса, запасное оборудование для обеспечения работы системы, включая его доставку, затраты времени экипажа на обслуживание, материальные затраты на разработку и изготовление СЖО и т. д.) и *комфортность* (ЧКЭ — параметры среды обитания экипажа, внешнее влияние от СЖО, размещение систем, режимы работы и управление СЖО, взаимодействие СЖО — экипаж — службы на Земле и т. д.).

Указанные подходы стали важными шагами на пути определения функциональной эффективности СЖО ПКА. Однако следует отметить присущие им существенные недостатки. Например, они учитывают не все ключевые критерии, необходимые как для СЖО, так и для составных частей (СЧ) СЖО, являются недостаточно формализованными или даже вовсе не формализованными, не учитывают требования ранжирования критериев с учетом этапов разработки и их весомости, а также не предполагают выделения обобщенного комплексного показателя функциональной эффективности и не предоставляют алгоритма выбора оптимальной конфигурации системы.

Предлагаемые показатели и критерии функциональной эффективности СЖО (СЧ СЖО) ПКА. С учетом существующих подходов, а также отмеченных недостатков для обеспечения количественной оценки функциональной эффективности СЖО ПКА имеет смысл выделить соответствующий обобщенный комплексный показатель, включающий учитывающие основные функциональные особенности таких систем частные комплексные показатели: функциональности (K_{ϕ}), функциональной надежности ($K_{\text{н}}$), функциональной безопасности ($K_{\text{б}}$), стоимости ($K_{\text{с}}$).

Далее будет подробно рассмотрен каждый из приведенных частных комплексных показателей с учетом формализации и выделения соответствующих критериев оценивания.

Комплексный показатель функциональности. Данный показатель определяет композицию технических характеристик системы, образованную на основе всех функциональных требований, предъявляемых к СЖО (СЧ СЖО) ПКА. Эти характеристики используются как единичные показатели функциональности (табл. 1).

В зависимости от особенностей конкретной подсистемы СЖО единичные показатели могут изменяться.

Для формализации показателя «Эргономичность» предлагается подход на основе экспертного метода, в ходе которого эксперты оценивают эргономичность СЖО (СЧ СЖО) по соответствующим группам и подгруппам критериев, с учетом коэффициентов весомости групп и подгрупп K_i и K_j соответственно (табл. 2) [5].

Группы и подгруппы единичных показателей функциональности СЖО ПКА

№ п/п	Показатели функциональности
1	<i>Выход по целевому продукту</i>
1.1	Количество (масса, объем) генерируемого вещества (каждого, если их несколько)
1.2	Скорость выделения вещества (каждого, если их несколько)
1.3	Скорость сорбции вещества (каждого, если их несколько)
1.4	Скорость десорбции вещества (каждого, если их несколько)
1.5	Сорбционная емкость (по каждому веществу)
1.6	Расход
1.7	Скорость откачки
1.8	Обеспечиваемое давление (нагнетаемое, откачиваемое)
1.9	Количество измеряемых веществ (параметров)
1.10	Точность измерения каждого вещества (параметра)
1.11	Коэффициент экстракции
2	<i>Энергопотребление</i>
2.1	Номинальное энергопотребление
2.2	Максимальное энергопотребление
2.3	Требуемое напряжение
3	<i>Теплопотребление</i>
3.1	Количество поглощаемой теплоты
3.2	Количество выделяемой теплоты
4	<i>Масса:</i>
4.1	системы
4.2	бортовых запасных инструментов и принадлежностей (БЗИП)
4.3	сменного оборудования (масса сухая, масса с продуктом)
4.4	удаляемых отходов
4.5	вспомогательного оборудования
5	<i>Степень автономности</i>
5.1	Затраты времени экипажа на управление (обеспечение функционирования)
5.2	Затраты времени экипажа на обслуживание
5.3	Срок службы
5.4	Ресурс
6	<i>Эргономичность</i>
6.1	Влияние на здоровье и безопасность экипажа
6.2	Влияние на производительность экипажа
6.3	Удовлетворенность экипажа

Группы и подгруппы критериев эргономичности СЖО (СЧ СЖО) ПКА

№ п/п	Группы и подгруппы критериев эргономичности	K_i	K_j
1	Влияние на здоровье и безопасность экипажа	0,520	
1.1	Доступность расположения органов управления СЖО (СЧ СЖО)	–	0,453
1.2	Оптимальность расположения органов управления СЖО (СЧ СЖО) с учетом других систем	–	0,362
1.3	Достаточность визуальных и акустических средств отображения информации при функционировании СЖО (СЧ СЖО)	–	0,185
2	Влияние на производительность экипажа	0,267	–
2.1	Уровень физической нагрузки при работе с СЖО (СЧ СЖО)	–	0,453
2.2	Удобство управления СЖО (СЧ СЖО)	–	0,362
2.3	Простота управления СЖО (СЧ СЖО)	–	0,185
3	Удовлетворенность экипажа	0,213	–
3.1	Функционально-конструктивная приспособленность СЖО (СЧ СЖО) с учетом санитарно-гигиенических потребностей экипажа	–	0,431
3.2	Психологическое восприятие СЖО (СЧ СЖО)	–	0,431
3.3	Дизайн СЖО (СЧ СЖО)	–	0,138

Численное значение показателя «Эргономичность» СЖО ПКА (K_3) рассчитывается по формуле

$$K_3 = \sqrt[y]{\prod_y \left(\sqrt[x]{\prod_x \left(\begin{cases} \prod_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^{N_i} (A_{i,j}^{K_j}) \right)^{K_i} & \text{при } A_{11} > 0,5 \\ 0,5 & \text{при } A_{11} = 0,5 \end{cases} \right)} \right)}, \quad (1)$$

где n — количество групп критериев; N_i — количество критериев в i -й группе; A_{ij} — значение экспертной оценки соответствующего критерия; K_i, K_j — коэффициенты весомости критериев групп и подгрупп; A_{11} — значение экспертной оценки критерия «Доступность расположения органов управления СЖО (СЧ СЖО)»; x — количество приборов, агрегатов в соответствующей СЧ СЖО; y — количество СЧ СЖО.

Численное значение экспертной оценки каждого критерия: полностью удовлетворяет — 1; в целом удовлетворяет — 0,8; частично удовлетворяет — 0,63; не удовлетворяет — 0,5.

На этапе проектирования предварительная оценка эргономичности СЖО ПКА может быть получена посредством имитационного моделирования. Однако в полной мере выполнить оценку вышеперечисленных критериев можно только в условиях, максимально приближенных к реальным (условиям космического полета), или на макетах ПКА при проведении комплексных и (или) межведомственных испытаний с участием космонавтов либо испытателей [5].

Для определения численного значения *комплексного показателя функциональности* на этапе проектирования можно использовать метод анализа оболочки данных — *Data Envelopment Analysis (DEA)*, основанный на построении границы эффективности, которая является аналогом производственной функции [6]. Эта граница, которая имеет форму выпуклой оболочки или выпуклого конуса в пространстве входных и выходных переменных, описывающих каждый объект (агрегат, прибор, систему) в исследуемой совокупности, используется в качестве эталона для получения численного значения оценки эффективности каждого из объектов в исследуемой совокупности. В качестве входных показателей, как правило, используются ресурсы, а выходных — результат работы объекта (или системы). Степень эффективности конкретного объекта (в графической интерпретации) определяется расстоянием между соответствующей ему точкой, и границей эффективности, т. е. критерием для выявления эффективности является достижение оптимума Парето. Базовой моделью метода DEA считается модель CCR (название модели CCR соответствует первым буквам фамилий авторов: Charnes, Cooper, Rhodes). Ее существенным недостатком является предпосылка линейной однородности, т. е. когда увеличение входного ресурса однозначно приводит к увеличению выходного продукта. Для устранения этого недостатка предложена модель ВСС (название модели ВСС также соответствует первым буквам фамилий авторов: Vancser, Charnes, Cooper), учитывающая переменный эффект масштаба, т. е. когда увеличение входного ресурса не обязательно должно приводить к увеличению выходного продукта. Поскольку для СЖО (СЧ СЖО) ПКА связь между входными и выходными параметрами зачастую носит нелинейный характер, модель ВСС более предпочтительна при определении показателя функциональности.

Модели CCR и ВСС, ориентированные на вход и выход (в зависимости от направления оптимизации), преобразованные к линейному, двойственному виду (при котором происходит минимизация взвешенной суммы входных параметров по отношению к нормированному выходному параметру), представлены в табл. 3.

Основные модели метода DEA

Двойственная модель, ориентированная на вход	Двойственная модель, ориентированная на выход
CCR _D -Input	CCR _D -Output
$\max K_{\phi 0} = \sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0}$ <p>при условии:</p> $\sum_{i=1}^r t_i x_{i0} = 1;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} - \sum_{i=1}^r t_i x_{im} \leq 0;$ $m = 1, \dots, n;$ $\mu_j, t_i \geq 0$	$\min K_{\phi 0} = \sum_{i=1}^r t_i x_{i0}$ <p>при условии:</p> $-\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} + \sum_{i=1}^r t_i x_{im} \geq 0;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0} = 1;$ $m = 1, \dots, n;$ $\mu_j, t_i \geq 0$
BCC _D -Input	BCC _D -Output
$\max K_{\phi 0} = \sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0} + u_0$ <p>при условии:</p> $\sum_{i=1}^r t_i x_{i0} = 1;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} - \sum_{i=1}^r t_i x_{im} + \sum_{m=1}^n u_0 \leq 0;$ $m = 1, \dots, n,$ $\mu_j, t_i \geq 0, u_0 \text{ — вещественное число}$	$\min K_{\phi 0} = \sum_{i=1}^r t_i x_{i0} + u_0$ <p>при условии:</p> $-\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} + \sum_{i=1}^r t_i x_{im} + \sum_{m=1}^n u_0 \geq 0;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0} = 1;$ $m = 1, \dots, n,$ $\mu_j, t_i \geq 0, u_0 \text{ — вещественное число}$
<p>Обозначения: $K_{\phi 0}$ — показатель эффективности прибора, агрегата соответствующей СЧ СЖО; μ_j, t_i — переменные коэффициенты веса; x_i, y_j — переменные параметры входа и выхода соответственно; s, r — количество параметров входа и выхода соответственно; i, j — индексы переменных для всех моделей; $m = 1, \dots, n$ — количество оцениваемых объектов (приборов, агрегатов и т. д.), изменяющихся от 1 до n.</p>	

По сравнению с методами оптимизации по максимуму дроби или по максимуму разности метод DEA имеет следующие преимущества:

– позволяет вычислить один агрегированный — скалярный — показатель для каждого сравниваемого объекта: агрегата, прибора, системы (формирует Парето-оптимальное множество точек, соответствующих эффективным объектам);

- одновременно обрабатывает много входных и выходных параметров, каждый из которых при этом может быть измерен в различных единицах;
- помогает учитывать внешние по отношению к рассматриваемой системе переменные — факторы;
- не требует априорного указания весовых коэффициентов для переменных, соответствующих входным и выходным показателям при решении задачи оптимизации;
- не налагает никаких ограничений на функциональную форму зависимости между входными и выходными параметрами;
- позволяет при необходимости учесть предпочтения экспертов, касающиеся важности тех или иных входных или выходных параметров;
- проводит конкретные оценки желательных изменений во входных / выходных параметрах, которые позволили бы вывести неэффективные объекты на границу эффективности.

Следует отметить, что при DEA-анализе могут возникать ситуации, связанные с необходимостью ранжирования объектов, лежащих на фронте эффективности, а также «нежелательные» результаты, когда меньшие значения выходных параметров предпочтительнее бóльших.

Нередко часть сопоставляемых объектов оказываются на 100 % эффективными, т. е. лежащими на фронте эффективности, следовательно, их сравнение между собой невозможно. Этот недостаток непараметрического метода измерения окажется особенно явным, когда его результаты сопоставляются с результатами параметрического измерения, такого, например, как стохастический граничный анализ. В 1993 г. Андерсен и Петерсен предложили относительно простой метод ранжирования объектов, лежащих на фронте эффективности, который привел к появлению известной модели суперэффективности. Идея метода — исключение исследуемого объекта (обладающего 100%-ной сравнительной эффективностью) из анализируемой совокупности объектов и построение новой границы эффективности для множества из $(n - 1)$ объектов [7].

Математическое представление модели суперэффективности идентично модели ВСС при учете того, что рассматриваемый в данный момент объект исключается из общего набора объектов. В табл. 4 представлены двойственные модели суперэффективности $K_{\phi}^{\text{суп}}$ с ориентацией на вход и выход соответственно.

Для того чтобы исключить «нежелательные» результаты, применяют следующие известные подходы [8]:

- игнорирование «нежелательных» результатов;

- учет «нежелательных» результатов в качестве затрачиваемых ресурсов;
- применение линейного или нелинейного монотонного преобразования;
- поляризация нормирования переменной.

Таблица 4

Модели суперэффективности с ориентацией на вход и выход

BCC _D -Input sup (вход)	BCC _D -Output sup (выход)
$\max K_{\phi}^{\text{суп}} = \sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0} + u_0$ <p>при условии</p> $\sum_{i=1}^r t_i x_{i0} = 1;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} - \sum_{i=1}^r t_i x_{jm} + \sum_{m=1}^n u_0 = 0;$ $m = 1, \dots, n;$ $\mu_j, t_i \geq 0, u_0 \text{ — вещественное число}$	$\min K_{\phi}^{\text{суп}} = \sum_{i=1}^r t_i x_{i0} + u_0$ <p>при условии</p> $-\sum_{j=1}^s \mu_j y_{jm} + \sum_{i=1}^r t_i x_{im} + \sum_{m=1}^n u_0 = 0;$ $\sum_{j=1}^s \mu_j y_{j0} = 1;$ $m = 1, \dots, n;$ $\mu_j, t_i \geq 0, u_0 \text{ — вещественное число}$

Следует отметить, что при игнорировании «нежелательных» результатов теряется существенный объем информации, что значительно снижает достоверность оценки технической эффективности. Учет «нежелательных» результатов как затрат ресурсов также снижает достоверность оценки технической эффективности. При использовании монотонно убывающих преобразований возникает ряд проблем, связанных с выбором функциональных зависимостей и определением значений их параметров.

Поляризация нормированной переменной подразумевает следующее:

– в случае «желательного» результата большему значению описывающей его переменной ставится в соответствие большее нормированное значение, т. е. нормирование представляет собой монотонно неубывающее преобразование исходной переменной;

– в случае «нежелательного» результата большему значению описывающей его переменной ставится в соответствие меньшее нормированное значение, т. е. нормирование представляет собой монотонно невозрастающее преобразование исходной переменной.

В качестве поляризующего нормирующего преобразования используется минимаксное нормирование [8]:

1) для переменных затрат ресурсов

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, \bar{x}_{ij} \in [0, 1], \quad (2)$$

где $\max(x_i) = \max_j \{x_{ij}, j = 1, \dots, k\}$; $\min(x_i) = \min_j \{x_{ij}, j = 1, \dots, k\}$;
 i — индекс вида ресурса, $i \in 1, \dots, n$; j — индекс организационной единицы, $j \in 1, \dots, k$;

2) для переменных «желательного» результата

$$\bar{y}_{pj} = \frac{y_{pj} - \min(y_p)}{\max(y_p) - \min(y_p)}, \bar{y}_{pj} \in [0, 1], \quad (3)$$

где $\max(y_p) = \max_j \{y_{pj}, j = 1, \dots, k\}$; $\min(y_p) = \min_j \{y_{pj}, j = 1, \dots, k\}$;
 p — индекс вида ресурса, $i \in 1, \dots, P$ (P — общее число результатов);
 j — индекс организационной единицы, $j \in 1, \dots, k$;

3) для переменных «нежелательного» результата

$$\bar{y}_{sj} = \frac{\max(y_s) - y_{sj}}{\max(y_s) - \min(y_s)}, \bar{y}_{sj} \in [0, 1], \quad (4)$$

где $\max(y_s) = \max_j \{y_{sj}, j = 1, \dots, k\}$; $\min(y_s) = \min_j \{y_{sj}, j = 1, \dots, k\}$;
 s — индекс вида «нежелательного» результата, $s \in 1, \dots, S$ (S — общее число результатов); j — индекс организационной единицы, $j \in 1, \dots, k$.

Полученные с помощью данного преобразования значения переменных неотрицательны, они находятся в интервале от 0 до 1, при этом максимальному значению переменной, описывающей «нежелательный» результат, соответствует нулевое нормированное значение, а минимальному — единичное.

Если полагать, что все подсистемы обладают свойством эквистатности, можно определить комплексный показатель функциональности СЖО ПКА:

$$K_{\Phi} = \sqrt[j]{\prod_{j=1}^J \left(\sqrt[i]{\prod_{i=1}^I (K_{\Phi i})} \right)}, \quad (5)$$

где $K_{\Phi i}$ — комплексный показатель функциональности прибора, агрегата j -й СЧ СЖО (вычисленный с помощью метода DEA); I — количество приборов, агрегатов в соответствующей СЧ СЖО; J — количество СЧ СЖО.

Если прибор, агрегат или подсистема СЖО заимствуется без изменений, то соответствующий показатель функциональности принимается равным 1 и метод сравнительного анализа не применим.

В случае использования моделей DEA, ориентированных на вход в качестве критерия оценивания показателя функциональности, применяется $K_{\phi} \rightarrow 1$ или $K_{\phi} \rightarrow \max$ при использовании модели суперэффективности. Соответственно, в случае применения моделей DEA, ориентированных на выход, в качестве критерия оценивания показателя функциональности используется $K_{\phi} \rightarrow 0$ или $K_{\phi} \rightarrow \min$ при модели суперэффективности.

На этапе экспериментальной отработки определение показателя функциональности на основе сравнительного DEA-анализа теряет актуальность, поскольку к этому времени, как правило, выбор в пользу той или иной системы либо ее составной части уже сделан. Поэтому на этих этапах следует выбирать подход, определяющий максимальное соответствие показателей функциональности требованиям назначения. С учетом того, что невыполнение любого из требований назначения негативно отражается на функциональности системы или ее составной части, разумно наделить их свойствами эквистатности. Отклонение параметра назначения $\mu_{\text{н}}$ и $\mu_{\text{в}}$ (нижняя и верхняя границы) от оптимальных значений, заданных в техническом задании, определяется по формулам [9]:

$$\mu_{\text{н}} = \bar{X} - t_{\alpha}(v) \frac{S_x}{\sqrt{n}} \geq x_{\text{н}}; \quad (6)$$

$$\mu_{\text{в}} = \bar{X} + t_{\alpha}(v) \frac{S_x}{\sqrt{n}} \leq x_{\text{в}}, \quad (7)$$

где $\mu_{\text{н}}$ — нижняя расчетная граница доверительного интервала; $\mu_{\text{в}}$ — верхняя расчетная граница доверительного интервала; \bar{X} — выборочная оценка среднего значения параметра x по результатам испытаний $x_i, i = \overline{1, n}$ (x_i — значение одного из контролируемых параметров, зафиксированное в i -м испытании; $i = \overline{1, n}$ — номер испытания; n — текущий объем выборки параметра); $t_{\alpha}(v)$ — квантиль распределения Стьюдента с v степенями свободы и доверительной вероятностью α ; S_x — выборочная оценка параметра x по результатам испытаний, $x_i, i = \overline{1, n}$.

Если $x_{\text{в}} \geq \mu_{\text{в}}$ и $x_{\text{н}} \leq \mu_{\text{н}}$, то нижняя (верхняя) граница значения соответствующего параметра $x_{\text{н}}$ ($x_{\text{в}}$), заданная в техническом задании,

согласуется с опытными данными. Таким образом, соответствие требованиям назначения системы подтверждается. Если неравенства не выполняются, следует провести проверку по формулам:

$$X_{o_в} = \frac{\mu_B}{x_B} \in r; \quad (8)$$

$$X_{o_н} = \frac{\mu_H}{x_H} \in r, \quad (9)$$

где $X_{o_в}$ — верхняя граница параметра, не удовлетворяющая неравенству $x_B \geq \mu_B$; $X_{o_н}$ — нижняя граница параметра, не удовлетворяющая неравенству $x_H \leq \mu_H$; r — величина отклонения значения параметра от нижней или верхней границы доверительного интервала.

Уровень отклонения $X_{o_в}$, $X_{o_н}$ определяется величиной суммарной погрешности измерения оцениваемого параметра. При этом для большинства СЧ СЖО ПКА интервал отклонения значения тех или иных параметров от номинального значения, с учетом погрешности измерения, свидетельствует об ухудшении функциональности, но не о полной ее потере. Поэтому в качестве критерия оценивания функциональности целесообразно рассматривать аппроксимированный тренд изменения уровней отклонения параметров от требуемых (заданных) значений в допустимом диапазоне (определяется экспертным методом исходя из особенностей конкретного агрегата, прибора, системы).

Таким образом, выражение для определения комплексного показателя функциональности СЖО на этапе наземных испытаний выглядит следующим образом:

$$K_{\Phi} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K \sqrt[j]{\prod_{j=1}^J \left(\sqrt[i]{\prod_{i=1}^I (1 - (\max(X_{o_в}, X_{o_н}))} \right)} \right)}, \quad (10)$$

где I — количество параметров прибора, агрегата в соответствующей СЧ СЖО; J — количество приборов, агрегатов СЧ СЖО; K — количество СЧ СЖО; k — степень корня, соответствующего количеству СЧ СЖО; i — степень корня, соответствующего количеству параметров; j — степень корня, соответствующего количеству приборов.

В качестве критерия оценивания комплексного показателя функциональности на этапе наземной отработки используется $K_{\Phi} \rightarrow 1$ при допустимом уровне отклонения r .

Комплексный показатель функциональной надежности. Функциональная надежность СЖО ПКА определяется способностью

системы обеспечивать при протекании физико-химических процессов функциональную устойчивость с учетом функциональных отказов. К единичным показателям функциональной надежности СЖО ПКА можно отнести вероятность обеспечения функциональной отказоустойчивости P_1 и вероятность успешного протекания физико-химических процессов P_2 .

Комплексный показатель функциональной надежности СЖО ПКА имеет вид

$$K_n = \sqrt[2]{P_1 P_2}. \quad (11)$$

Для оценки вероятности обеспечения функциональной отказоустойчивости с учетом функциональных отказов можно использовать метод интегральных уравнений, позволяющий учитывать любые распределения времени безотказной работы. Например, при показательном распределении наработки до отказа основного и резервного элементов, имеющих интенсивность отказов λ_1 и λ_2 соответственно в невосстанавливаемой системе с холодным резервом, функциональную устойчивость (вероятность обеспечения функций назначения) в течение времени t рассчитывают по формуле

$$p(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}), \quad (12)$$

где λ_1 — интенсивность отказов основного элемента; λ_2 — интенсивность отказов резервного элемента.

Интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t) = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (13)$$

На этапах автономных и комплексных испытаний для оценки вероятности безотказного протекания физико-химических процессов в течение установленного срока используется точечная оценка (по результатам серии измерений основных показателей назначения), рассчитываемая по соотношению [9]

$$P_2 = \sqrt[i]{\prod_i \left(\frac{m}{n}\right)}, \quad (14)$$

где m — количество измерений, удовлетворяющих условию $\mu_n \leq \mu \leq \mu_b$ (μ — показатель назначения, определяющийся экспертным методом, μ_n , μ_b — нижняя и верхняя границы диапазона изменения параметра μ , определяемые по формулам (6) и (7)); n — количество измерений в серии; i — количество показателей назначения.

В качестве критериев оценивания комплексного показателя функциональной надежности СЖО ПКА при P_1 и $P_2 \rightarrow 1$ используются следующие уровни отклонения:

при $0,995 \leq K_n < 1$ — первый уровень отклонения (допустимый);

при $0,99 \leq K_n < 0,995$ — второй уровень отклонения (предельно допустимый);

при $0,95 \leq K_n < 0,99$ — третий уровень отклонения (опасный);

при $0,9 \leq K_n < 0,95$ — четвертый уровень отклонения (недопустимый).

Комплексный показатель функциональной безопасности. Функциональная безопасность СЖО ПКА определяется способностью не переходить в течение назначенного срока службы в состояние, приводящее к нештатной, аварийной или опасной ситуации (угроза жизни экипажа, повреждение СЖО или сопрягаемых систем). Количественные показатели безопасности подразделяются на детерминированные и вероятностные. Детерминированные показатели обычно выражаются физическими величинами или отношением этих величин, при этом они не отражают вероятностную природу процессов эксплуатации и обслуживания систем, обычно имеют ограниченную область применения и носят частный характер. Вероятностные показатели могут определяться расчетным, имитационным (моделирующим) или экспериментальным путем. Основные показатели безопасности, а также выражения для их вычисления [10] представлены в табл. 5.

Таблица 5

Основные показатели безопасности и выражения для их вычисления

Показатели безопасности	Формулы для вычисления
<p>Параметр потока опасных отказов — отношение среднего числа появлений опасных состояний за произвольно малую его наработку к значению этой наработки</p>	$\omega_0 = \sum_{i=0}^N \frac{m_0(t, t + \Delta t)}{N(t) \Delta t},$ <p>где $m_0(t, t + \Delta t)$ — число опасных отказов в интервале времени $(t, t + \Delta t)$; $N(t)$ — количество объектов, находящихся под наблюдением в момент времени t</p>
<p>Средняя наработка на опасный отказ</p>	$T_H = \frac{\sum_{i=0}^N t_i}{m_0},$ <p>где t_i — наработка i-го изделия за время наблюдений</p>

Показатели безопасности	Формулы для вычисления
Среднее время нахождения в опасном состоянии	$T_o = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m t_{вi},$ <p>где $t_{вi}$ — время устранения i-го опасного отказа</p>
Вероятность возникновения опасной ситуации — для подсистем с резервом времени	$P_{бс}(t_3) = 1 - F(t_3) + \int_0^{t_3} \int_0^{t_{доп}} P(t_3 - \tau, t_{доп}) dF(t_{вi}) dF(\tau),$ <p>где $P_{бс}$ — вероятность безопасной системы; t_3 — заданное время работы; τ — резервное время</p>

Единичные показатели функциональной безопасности на этапах разработки определяются по результатам имитационного моделирования и экспериментальной отработки.

В качестве комплексного показателя безопасности (по аналогии с коэффициентом готовности из теории надежности) используется коэффициент безопасности, определяющий вероятность того, что система окажется в безопасном состоянии в произвольный момент времени:

$$K_6 = \frac{T_n}{T_n + T_o}. \quad (15)$$

При анализе функциональной безопасности системы иногда используют коэффициент опасности K_o , дополнительный к коэффициенту безопасности, для обеспечения чувствительности к изменению T_n и T_o при $T_n \ll T_o$:

$$K_o = \frac{T_o}{T_n}. \quad (16)$$

В качестве критериев оценивания показателей функциональной безопасности используется параметр потока опасных отказов ω_o , $T_o \rightarrow \min$, $T_n \rightarrow \max$, $P_{бс}(t_3) \rightarrow 1$.

Если система функционально опасна, то требуется проводить анализ для выявления и устранения причин низких значений соответствующих показателей и затем выполнять ее повторную оценку. В случае, когда невозможно или нецелесообразно дорабатывать СЖО (СЧ СЖО) ПКА в отношении соответствующих показателей, следует проводить мероприятия, в результате которых будет минимизирован

риск возникновения нештатной, аварийной или опасной ситуации, и, насколько возможно, предотвращены последствия.

Комплексный показатель стоимости. Этот показатель представляет собой суммарную стоимость соответствующих этапов разработки СЖО (СЧ СЖО) ПКА, представленных в табл. 6.

Таблица 6

Единичные показатели стоимости СЖО (СЧ СЖО) ПКА

Этап разработки	Показатель стоимости
Проектирование	Разработки технологического проекта (ТП), рабочей конструкторской документации (РКД), эксплуатационной документации (ЭД)
	Изготовления опытных образцов, включая оснастку
	Испытаний опытных образцов
	...
Наземная отработка	Изготовления и испытания опытных образцов
	Испытаний опытных образцов
	Корректировки РКД по результатам испытаний
	...

Комплексный показатель стоимости

$$K_c = \min \left(\sum_{i=1}^n C_i \right), \quad (17)$$

где C_i — численное значение i -го показателя; n — количество показателей.

В качестве критерия оценивания показателя стоимости принят $K_c \rightarrow \min$.

Обобщенный комплексный показатель функциональной эффективности СЖО (СЧ СЖО) ПКА. Для определения этого показателя необходимо учитывать характер взаимовлияния, а также степень значимости частных комплексных показателей. В основе каждого из них лежат собственные единичные показатели, итоговая композиция которых влияет на изменение конкретного комплексного показателя, не оказывая линейного влияния на другие. Если допустить, что взаимосвязь частных комплексных показателей подчиняется нелинейной зависимости, и учитывать необходимость их ранжирования, то в качестве обобщенного комплексного показателя функциональной эффективности СЖО ПКА можно использовать средневзвешенный геометрический показатель, численное значение которого определяется следующим образом:

$$K_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n (K_i)^{\alpha_i}, \quad (18)$$

где K_i — частный комплексный показатель функциональной эффективности СЖО; α_i — коэффициент весомости частного показателя функциональной эффективности СЖО; n — число частных комплексных показателей функциональной эффективности СЖО.

При вычислении обобщенного комплексного показателя функциональной эффективности СЖО ПКА требуется учитывать необходимость обеспечения однородности шкал при измерении частных комплексных показателей. Для этого можно использовать относительно простой способ минимаксной нормализации в интервале $[0, 1]$. Ранжирование по значимости частных комплексных показателей обеспечивается с помощью коэффициентов весомости, рассчитанных на основе принципов квалиметрии, с использованием ряда предпочтительных чисел R10. На этапе проектирования частные комплексные показатели сложно ранжировать по значимости, поскольку каждый из них оказывает равнозначное влияние на функциональную эффективность СЖО ПКА, а значит, целесообразно наделить их свойством эквистатности. На этапе наземной отработки частные комплексные показатели функциональности, функциональной надежности и функциональной безопасности являются более весомыми по сравнению с показателями стоимости, так как зачастую наиболее функционально эффективная система включает большое количество новых разработок (или модернизаций). Кроме того, система нуждается в серьезной наземной отработке, что значительно повышает ее стоимость, так как требуются соответствующая подготовка производства, разработка и изготовление уникального наземного оборудования, технологических процессов и т. д. С учетом вышеизложенного в табл. 7 представлены значения коэффициентов весомости комплексных показателей функциональной эффективности СЖО ПКА.

Таблица 7

Значения коэффициентов весомости комплексных показателей функциональной эффективности СЖО ПКА

Этап разработки	Обобщенный комплексный показатель функциональной эффективности СЖО
Проектирование	$K_{\Sigma} = \frac{K_{\Phi}^{0,250} K_{\text{H}}^{0,250} K_{\text{Б}}^{0,250}}{K_{\text{С}}^{0,250}}$
Наземная отработка	$K_{\Sigma} = \frac{K_{\Phi}^{0,301} K_{\text{H}}^{0,301} K_{\text{Б}}^{0,301}}{K_{\text{С}}^{0,096}}$

В качестве критерия оценивания обобщенного комплексного показателя функциональной эффективности используется $K_s \rightarrow \max$.

Заключение. В настоящее время оценке функциональной эффективности СЖО ПКА уделяется недостаточное внимание в связи с отсутствием подхода к определению и формализации соответствующих показателей и критериев. Существующие способы выделения показателей и критериев функциональной эффективности СЖО ПКА являются недостаточно обоснованными, слабо формализованными, учитывают не все ключевые показатели, характерные для СЖО ПКА, а также их взаимовлияние и весомость на этапах разработки. Поэтому предложен более эффективный подход к выделению и формализации комплексных показателей функциональной эффективности СЖО ПКА, а также определению критериев их оценивания с учетом особенностей жизненного цикла. Выделены комплексные показатели функциональности, функциональной безопасности, функциональной надежности, стоимости, а также комплексный показатель функциональной эффективности, обеспечивающие возможность проведения комплексной оценки функциональной эффективности СЖО (СЧ СЖО) ПКА на этапах разработки.

Рассмотренный подход позволяет:

на стадии предпроектной работы проводить предварительную оценку функциональной эффективности вновь разрабатываемых СЖО (СЧ СЖО) для определения оптимальных технических характеристик и последующего их учета в соответствующих технических заданиях;

на этапе проектирования выполнять сравнительный анализ функциональной эффективности конкурирующих СЧ СЖО (предлагаемых различными производителями) с учетом структурной иерархии для определения лучшего варианта;

снизить риски и интенсифицировать процесс разработки СЖО ПКА путем определения оптимальной конфигурации системы на ранних этапах проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Потемкин А.Л., Глебов И.В. О классификации регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов по уровням сложности. *Космическая техника и технология*, 2022, № 2 (37), с. 17–26.
- [2] Романов С.Ю., Гузенберг А.С., Рябкин А.М. Концепция комплекса систем жизнеобеспечения экипажей межпланетных экспедиций. *Космическая техника и технология*, 2017, № 3 (18), с. 80–97.
- [3] Зарецкий Б.Ф., Курмазенко Э.А., Прошкин В.Ю. Управление жизнеобеспечением экипажей космических объектов: системный подход. *Труды МАИ*, 2020, вып. № 113. DOI: 10.34759/trd-2020-113-13
- [4] Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А. Глобальные критерии эффективности и их иерархия при анализе систем жизнеобеспечения для экипажей космических станций. *Труды МАИ*, 2018, вып. № 98.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90167&eng=N>

- [5] Глебов И.В., Потемкин А.Л., Глебова О.И. О количественной оценке эргономических показателей систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2227>
- [6] Лисситса А., Бабичева Т. *Анализ оболочки данных (DEA) — современная методика определения эффективности производства: дискуссионный материал № 50*. Халле, Институт развития сельского хозяйства Центральной и восточной Европы им. Лейбница (IAMO), 2003, с. 38.
- [7] Порунов А.Н. Оценка сравнительной эффективности государственного менеджмента экологической безопасности в регионе методом DEA-анализа (на примере Приволжского федерального округа). *Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Экономика и экологический менеджмент*, 2016, № 1, с. 104–111. DOI: 10.17586/2310-1172-2016-9-1-104-111
- [8] Яблонский К.П. *Оценка эффективности деятельности медицинских организаций: Дис. ... канд. экон. наук*: Специальность 08.00.05. Санкт-Петербург, 2019, 451 с.
- [9] Глебов И.В., Митрюхин А.Д. О функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1987>.
- [10] ГОСТ Р 58630–2020. *Системы и комплексы космические. Безопасность эксплуатации. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2020.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Потемкин А.Л. Оценка функциональной эффективности при проектировании систем пилотируемого космического аппарата для длительных автономных полетов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-4-2270>

Потемкин Артур Львович — начальник сектора, аспирант ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. e-mail: artur.potemkin3@rsce.ru

Assessment of functional efficiency in the design of manned spacecraft systems for long-term autonomous flights

© A.L. Potyomkin

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,
Korolyov, Moscow region, 141070, Russia

The issues of quantitative assessment of functional efficiency, which are solved at the development stage, are considered on the example of life support systems, which are one of the key ones in a manned spacecraft. The definition of the functional efficiency of the life support systems of the manned spacecraft is given. Formalized private complex indicators of functional efficiency are singled out, such as an indicator of functionality, functional safety, functional reliability, cost, as well as a generalized complex indicator of the functional efficiency of life support systems. An approach based on the principles of qualimetry and the Data Envelopment Analysis method of data shell analysis is proposed for the formalization of partial complex indicators and a generalized complex indicator of the functional efficiency of the life support systems of the spacecraft, taking into account the "weight" of these indicators. This approach makes it possible to intensify the process of development of life support systems for spacecraft by determining the optimal configuration of the system at the early stages of design.

Keywords: regeneration life support systems, functional efficiency, complex indicator of efficiency

REFERENCES

- [1] Potyomkin A.L., Glebov I.V. On complexity-level based classification of regenerative life support systems for manned spacecraft. *Space Engineering and Technology*, 2022, no. 2 (37), pp. 17–26.
- [2] Romanov S.Y., Guzenberg A.S., Ryabkin A.M. Crew life support system concept for interplanetary missions. *Space Engineering and Technology*, 2017, no. 3 (18), pp. 80–97.
- [3] Zaretsky B.F., Kurmazenko E.A., Proshkin V.Y. Spacecraft crew life support control: systems approach. *Trudy MAI (MAI Proceedings)*. 2020, no. 113, DOI: 10.34759/trd-2020-113-13.
- [4] Proshkin V.Y., Kurmazenko E.A. Global criteria of efficiency and their hierarchy for life support systems for space stations crews. *Trudy MAI (MAI Proceedings)*, 2018, no. 98. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90167&eng=Y>
- [5] Glebov I.V., Potyomkin A.L., Glebova O.I. On quantitative assessment of the ergonomic indicators of life support systems of the manned spacecraft. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2227>.
- [6] Lissitsa A., Babicheva T. *Data Envelopment Analysis (DEA) — modern procedure for determining production efficiency: Material for discussion No. 50*. Halle, Leibniz Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe (IAMO), 2003, p. 38.
- [7] Porunov A.N. Otsenka sravnitel'noy effektivnosti gosudarstvennogo menedzhmenta ekologicheskoy bezopasnosti v regione metodom DEA-analiza (na primere Privolzhskogo federal'nogo okruga) [The comparative effectiveness of public management environmental security in the region by DEA-analysis

- (for example Volga federal district)]. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Economics and Environmental Management"*, 2016, no. 1, pp. 104–111. DOI: 10.17586/2310-1172-2016-9-1-104-111
- [8] Yablonsky K.P. *Otsenka effektivnosti deyatel'nosti meditsinskikh organizatsiy: Dis. ... kand. ekon. nauk* [Evaluation of the effectiveness of medical organizations: Dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences]. Specialty 08.00.05. St. Petersburg, 2019, 451 p.
- [9] Glebov I.V., Mitryukhin A.D. On the functional reliability of the regenerative life support systems for manned spacecraft. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1987>
- [10] GOST P 58630–2020. Space systems and complexes. Operation safety. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2020.

Potjomkin A.L., Chief of section, post-graduate student at RSC Energia.
e-mail: artur.potemkin3@rsce.ru