

## **Вопросы эксплуатации регенерационных систем обеспечения газового состава Российского модуля Международной космической станции**

**Прошкин В. Ю.<sup>\*</sup>, Курмазенко Э. А., Кочетков А. А.<sup>\*\*</sup>, Гаврилов Л. И.**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт химического машиностроения, НИИхиммаш,  
ул. Большая Новодмитровская, 14, Москва, 127015, Россия*

*\*e-mail: vProshkin@mail.ru*

*\*\*e-mail: a\_kochetkov@niichimmash.ru*

### **Аннотация**

Рассматривается комплексный подход к эксплуатации регенерационных систем обеспечения газового состава. Подход включает пять составляющих: сбор информации, методики эксплуатации, идеология управления, ручные операции и подключение дополнительного оборудования. Каждая составляющая комплексного подхода проиллюстрирована примерами эксплуатации систем на борту Международной космической станции, главным образом, Российской системы генерации кислорода «Электрон-ВМ».

Описан коэффициент получения информации о параметрах системы и предложена модель сбора информации о ее работе.

### **Ключевые слова**

эксплуатация, комплексный подход, международная космическая станция, регенерационная система обеспечения газового состава, система генерации кислорода «электрон-вм», коэффициент получения информации, микропримеси

В Российском модуле Международной космической станции (МКС) эксплуатируются регенерационные системы обеспечения газового состава (РСОГС) экипажа [1]:

СГК – система генерации кислорода «Электрон-ВМ» (разработка «НИИхиммаш»);

СОА-УГ – система очистки атмосферы от углекислого газа «Воздух»;

СОА-МП – система очистки атмосферы от микропримесей (все очистные фильтры и адсорбционные аппараты в системе – разработка «НИИхиммаш»).

В будущем на борт МКС будут поставлены еще две РСОГС:

СКУГ – система концентрирования углекислого газа для его последующей переработки (сейчас разрабатывается «НИИхиммаш»);

СПУГ – система переработки углекислого газа по реакции Сабатье:  $4\text{H}_2$  (из СГК) +  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  (разработка «НИИхиммаш», в наземном варианте прошла все виды испытаний, но для ее применения на борту требуется наличие СКУГ).



Рис. 1. Взаимосвязи РСОГС.

Каждая РСОГС на борту (рис. 1) находится во взаимодействии с другими системами МКС и с экипажем, ее управление осуществляется бортовым компьютером (БЦВМ). Информация о параметрах РСОГС через систему телерадиометрической связи (ТРМ) идет на Землю в Центр управления полетами (ЦУП). Непосредственно к разработчикам конкретной РСОГС информация о ее работе на МКС может поступать через ряд промежуточных структур, что делает неизбежным искажение и ошибочное толкование информации. Поэтому для получения достоверной информации разработчики должны непосредственно контактировать с ЦУПом и, по возможности, с экипажем МКС, особенно при ручных операциях с РСОГС в нештатных ситуациях (НшС). Кроме того, необходимо иметь базу данных о характеристиках РСОГС, начиная с момента проектирования и изготовления

системы (сейчас подобные базы данных отсутствуют, а сведения о характеристиках РСОГС или теряются или, в лучшем случае, собираются фрагментарно и находятся в виде труднодоступной технической документации).

Сегодня при эксплуатации РСОГС экипажа на борту МКС [2] (рис. 2):

- каждая РСОГС эксплуатируется без учета связи с другими системами;
- на РСОГС влияют НшС и отклонения параметров в других системах и сбои БЦВМ;
- на каждом этапе разработки, изготовления и эксплуатации РСОГС присутствует влияние «человеческого фактора», т.е. возможны ошибочные решения и действия, что многократно происходило на практике;
- отработка РСОГС в наземных условиях имеет ограничения, связанные с невозможностью воспроизведения на Земле условий микрогравитации МКС, с малым числом одинаковых систем в отработке при проектировании и испытаниях и с отсутствием необходимого времени и средств для многолетних испытаний на Земле;
- информация о работе РСОГС поступает на Землю лишь частично, теряется при передаче и сборе, и при этом отсутствует обработка и своевременный анализ информации.

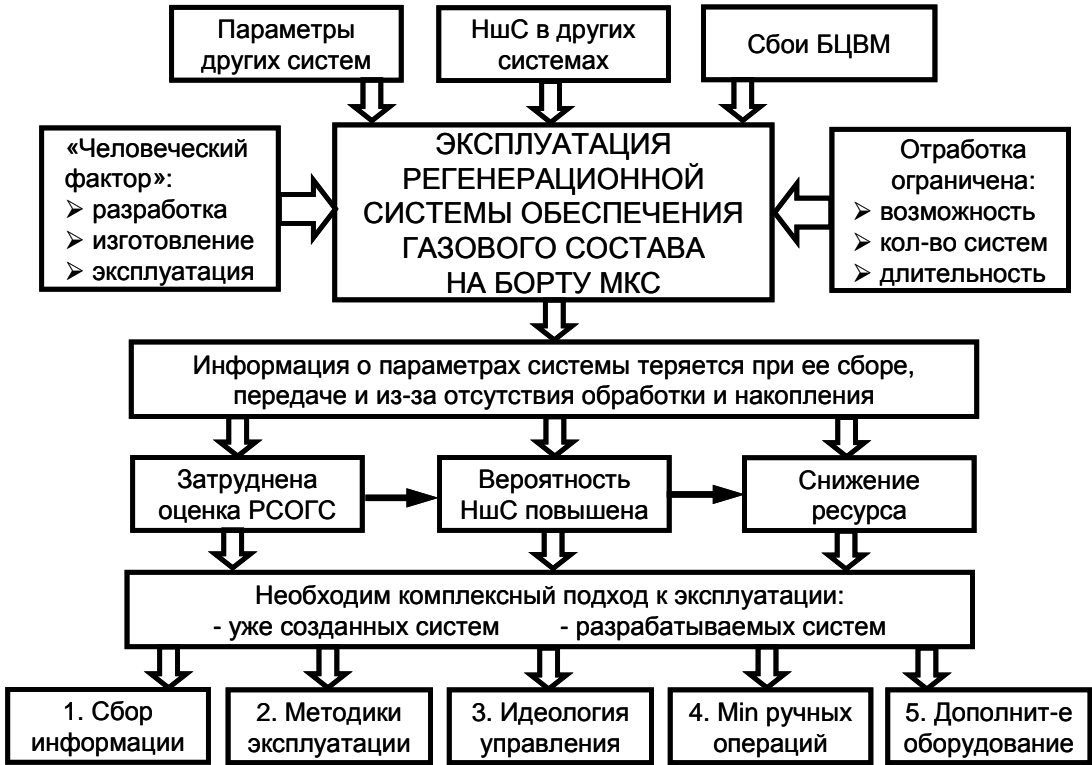


Рис. 2. Условия эксплуатации РСОГС и комплексный подход.

Все это затрудняет адекватную оценку состояния РСОГС, увеличивает вероятность возникновения НшС и приводит к более низкому ресурсу системы.

Поэтому предлагается комплексный подход к эксплуатации как уже созданных, так и разрабатываемых РСОГС, который включает в себя пять составляющих.

1). Максимально возможный сбор информации о работе РСОГС, ее автоматизированная обработка и создание базы данных, что позволит

- дать более полную оценку параметров РСОГС и ее комплектующих;
- прогнозировать техническое состояние РСОГС при работе;
- распознать и локализовать НшС на раннем этапе их развития.

2). Изменение методик эксплуатации РСОГС, которые должны учитывать:

- влияние параметров других систем и НшС в них на работу РСОГС;
- влияние параметров РСОГС и НшС в ней на работу других систем.

3). Изменение идеологии управления РСОГС, с целью

- минимизировать влияние НшС с бортовым компьютером (БЦВМ) на РСОГС;
- изменять алгоритм управления при эксплуатации РСОГС.

4). Максимально сократить ручные операции экипажа с РСОГС, чтобы

- снизить затраты времени экипажа;
- минимизировать влияние «человеческого фактора».

5). Подключение к РСОГС дополнительного оборудования, которое

- даст возможность устранять отказы и НшС с РСОГС;
- повысит уровень безопасности при эксплуатации РСОГС;
- дополнительно увеличит ресурс работы РСОГС.

Далее рассмотрена каждая из составляющих комплексного подхода.

## **1. Сбор информации о работе РСОГС**

Для каждой РСОГС в конкретных условиях ее эксплуатации (на борту МКС или в любых других условиях) можно оценить, какая часть информации о параметрах системы доходит до своего конечного уровня (коэффициент получения информации), на котором происходит принятие решения о тех или иных действиях с РСОГС. Соответственно, другая часть информации теряется на всех этапах ее передачи, сбора и обработки. Для этого построена модель сбора информации о работе РСОГС (рис. 3).

При работе РСОГС выдаются характерные группы сигналов, являющиеся носителями информации о входных, выходных и внутренних параметрах системы:

- подача электрического питания (дискретный сигнал);
- положение рабочих органов (дискретный сигнал);
- пороговые датчики (дискретный сигнал);

- непрерывное измерение величины (аналоговый сигнал).

Каждый из указанных сигналов оценивается коэффициентами  $K_1, K_2, K_1^*, K_2^*$ .

$K_1$  – коэффициент, характеризующий получение общего сигнала о параметре системы (получение текущего значения параметра системы). Он определяется значимым временем, в течение которого доступна информация о сигнале из всего времени работы системы.

$K_2$  – коэффициент характеризующий получение только аварийного сигнала о значении параметра системы.

$K_1^*, K_2^*$  - коэффициенты, характеризующие фиксацию и обработку сигнала соответственно по параметрам  $K_1$  и  $K_2$ .

Коэффициенты  $K_1, K_2, K_1^*, K_2^*$  нормированы от 0 до 1. Значения  $K_1, K_2$  равны 0 при полном отсутствии получения сигнала и равны 1 при получении сигнала для любого момента времени работы РСОГС. Значения  $K_1^*, K_2^*$  равны 0 при полном отсутствии фиксации и обработки сигнала и равны 1 при автоматической фиксации и обработке сигнала.



Рис. 3. Модель сбора информации о работе РСОГС.

Коэффициент получение информации об  $i$  <sup>ом</sup> параметре РСОГС ( $K_i$ ) принимает значение от 0 до 1 и в общем виде вычисляется как:

$$K_i = \frac{K_1 K_1^* + 0,1 \cdot K_2 K_2^*}{1 + 0,1 \cdot K_2 K_2^*} \quad (1)$$

Если для какого-либо параметра РСОГС аварийный сигнал не выдается, то для него коэффициенты  $K_2$  и  $K_2^*$  равны 0. Тогда для данного параметра коэффициент получения информации о параметре по выражению (1) сведется к виду:  $K_i = K_1 K_1^*$ .

Если какой-либо параметр РСОГС характеризуется дискретным сигналом, который подключен к управлению РСОГС в любой момент времени работы (например, подача электрического питания или аварийный датчик), то для него все коэффициенты  $K_1, K_2, K_1^*, K_2^*$  равны 1 и коэффициент получения информации о параметре по выражению (1):  $K_i = 1$ .

РСОГС, которая характеризуется суммарным числом  $N$  сигналов о своих параметрах, имеет общий коэффициент получения информации о своих параметрах ( $K_\Sigma$ ):

$$K_\Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i K_i) \quad \text{при условии:} \quad \sum_{i=1}^N A_i = N \quad (2)$$

Где  $A_i$  – весовой коэффициент вклада получения информации для  $i$  <sup>го</sup> параметра в общий коэффициент получения информации о параметрах РСОГС.

Если считать, что все параметры, характеризующие работу РСОГС являются равноценными (имеют одинаковые весовые коэффициенты  $A_i$ ), тогда из условия выражения (2) получим, что  $A_i = 1$  для всех  $N$  сигналов о параметрах, и выражение (2) сведется к виду:

$$K_\Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \quad \text{при условии:} \quad A_i = 1 \quad \text{для} \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Таким образом, рассчитанный коэффициент получения информации о параметрах РСОГС ( $K_\Sigma$ ) характеризует ту часть информации о работе РСОГС, которая доходит до конечного уровня принятия решения. Соответственно, величина  $1 - K_\Sigma$  характеризует потери информации о параметрах РСОГС на всех этапах (рис. 3).

\* \* \*

Примером потери информации о параметрах РСОГС является НшС с СГК «Электрон-ВМ», имевшая место на борту МКС в 2004 г.

В системе «Электрон-ВМ» получение кислорода для дыхания экипажа идет методом электролиза воды в проточном электролизере со щелочным электролитом (раствор щелочи КОН в воде, массовой концентрацией 25%), с последующим разделением газожидкостной смеси в статических разделителях и каталитической очисткой производимого кислорода. Получаемый кислород полностью соответствует всем требованиям на медицинский кислород, используемый для дыхания человека.

В состав СГК «Электрон-ВМ» входят (рис 15):

- технологический блок (ТБ) – реализует все технологические процессы, масса 160 кг;
- блок согласования сигналов и команд (БССК) – электронный посредник между ТБ и БЦВМ, масса 3 кг;

- комплект соединительных электрических кабелей между ТБ и БССК, масса 1 кг.

НшС с системой «Электрон-ВМ» развивалась следующим образом:

- по причине «человеческого фактора» произошла ошибка в обновленной версии компьютерной программы БЦВМ, реализующий алгоритм управления СГК «Электрон-ВМ»;

- с БЦВМ началась выдача нештатной команды на исполнительные органы ТБ (периодическое нештатное открытие клапана подпитки, через который в ТБ поступает порция воды на электролиз, без его последующего закрытия);

- НшС не была обнаружена из-за потери информации о работе СГК «Электрон-ВМ» (нет данных о состоянии «открыт» - «закрыт» для клапана подпитки водой), связанной, главным образом, со спецификой передачи ТРМ с борта МКС в ЦУП и, частично, с плохо налаженными контактами между ЦУПом и разработчиками системы «Электрон-ВМ»;

- работа системы «Электрон-ВМ» в данной НшС продолжалась в течение 43 суток;

- за указанный период входящая в состав ТБ буферная емкость несколько раз целиком наполнялась водой, что делало невозможным слив электролита из циркуляционного контура в буферную емкость после штатного отключения ТБ;

- после отключения ТБ, при штатной продувке азотом циркуляционного контура несколько раз происходил выброс жидкого электролита в газовые трубопроводы на борту;

- НшС была обнаружена только после потери проходимости газовых трубопроводов (кислородного и водородного) и отказа газоанализаторов электролизных газов.

В результате возникшей и вовремя не локализованной НшС:

- в СГК «Электрон-ВМ» снят с эксплуатации ТБ № 007;

- в комплексе РСОГС борта выведен из строя комплект газоанализаторов;

- на МКС пришлось проложить новую линию для сброса за борт электролизного водорода и задействовать резервное сопло сброса, т.к. старая линия была полностью заблокирована кристаллами электролита, включая забивку кристаллами безмоментного сопла сброса водорода, расположенного на внешней поверхности корпуса МКС (рис. 4).

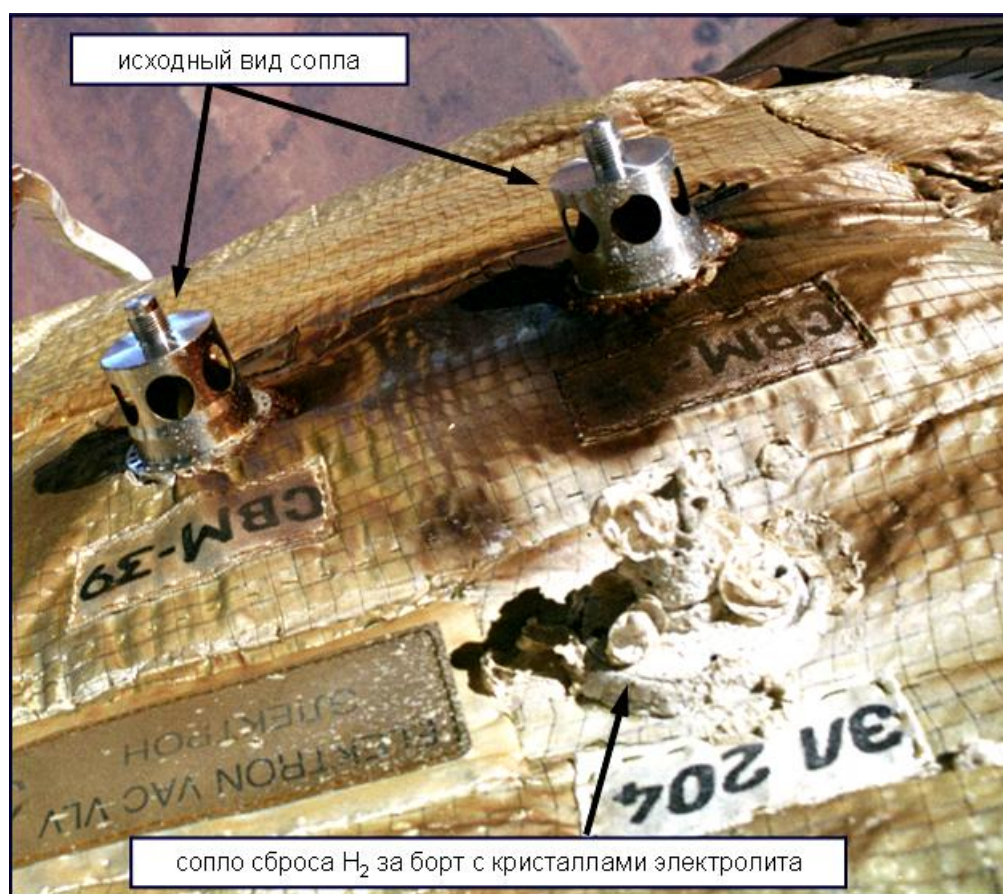
Для СГК «Электрон-ВМ» на всех этапах передачи, сбора и обработки информации был проведен анализ информационных потоков и определен коэффициент получения информации о параметрах системы по описанной методике.

Сигналы о параметрах СГК «Электрон-ВМ» (как собственные, так и внешние по отношению к системе, но прямо связанные с ее работой) разбиты на 2 группы (таблица 1):

- сигналы, которые всегда однозначно определены тем, что система включена и работает (для них коэффициент получения информации  $K_i = 1$ );

- характерные сигналы, которые при работе системы могут менять свои значения.

Результаты анализа показали, что большинство информации о параметрах системы (которая уже сейчас реально выдается на борту МКС) теряется и не влияет на принятие решений. В таблице 2 представлен коэффициент получения информации о параметрах системы «Электрон-ВМ» для различных этапов модернизации получения и обработки информации. Вся выполненная на сегодня модернизация связана, главным образом, с мероприятиями организационного характера по получению и обработке информации. Сейчас организационный ресурс полностью исчерпан и дальнейшее увеличение коэффициента получения информации возможно по двум направлениям (таблица 2):



*Рис. 4. Безмоментное сопло сброса за борт МКС водорода из СГК «Электрон-ВМ» (расположенное на внешней поверхности МКС), покрытое кристаллами электролита.*

*Таблица 1. Сигналы о параметрах системы «Электрон-ВМ»*

Сигналы о параметрах системы «Электрон-ВМ»	Все сигналы о параметрах	Однозначно определены при работе	Характерные - изменяются при работе
--	--------------------------	----------------------------------	-------------------------------------



Всего сигналов*	32 (31)	13	19 (18)
Подача электрического питания	3	3	-
Положение рабочих органов	9	6	3
Дискретные датчики	7	4	3
Непрерывное измерение величины	13 (12)	-	13 (12)
* В ходе эксплуатации на МКС в ТБ системы «Электрон-ВМ» добавлен один датчик			

*Таблица 2. Коэффициент получения информации о параметрах СГК «Электрон-ВМ»*

Этапы модернизации получения и обработки информации о параметрах системы «Электрон-ВМ»	Коэффициент получения информации о параметрах системы: $K_{\Sigma} \times 100 \%$	
	Все сигналы	Характерные сигналы
В начале эксплуатации	44 %	6 %
1-й этап модернизации	51 %	16 %
Сейчас (01.11.2012 г.)	56 %	27 %
При автоматической обработке на Земле получаемой сейчас информации	62 %	37 %
При полном сборе и передаче информации на борту МКС, без автоматической обработки	76 %	59 %
При полном сборе и передаче информации на борту МКС, с автоматической обработкой	92 %	86 %

- создание специальных алгоритмов и программ для автоматизированной обработки на Земле получаемой информации;

- модернизация системы сбора информации на борту МКС и ее передачи на Землю (создание специальных алгоритмов и программ для БЦВМ борта, накапливающих информацию о системе и организация сброса этой информации на Землю по ТРМ).

Для увеличения коэффициента получения информации о параметрах системы «Электрон-ВМ» до величины больше, чем дана в таблице 2, кроме указанных мероприятий, требуется доработка электрической части системы «Электрон-ВМ».

\* \* \*

Предлагается схема информационного обеспечения эксплуатации РСОГС на борту (рис. 5), которая характеризуется рядом коэффициентов, нормированных от 0 до 1.

Текущее управление РСОГС характеризуется коэффициентом достаточности контроля  $K_{Д}$ , коэффициентом получения информации  $K_{ПОЛ}$  и коэффициентом обработки информации  $K_{ОБР}$ . Три указанных коэффициента определяют коэффициент наблюдаемости

системы  $K_H$ , как функцию от их произведения. Методика определения  $K_D$  в настоящее время находится в процессе обсуждения. Коэффициент  $K_{ПОЛ}$  – это совокупность рассмотренных выше коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , а коэффициент  $K_{ОБР}$  – совокупность коэффициентов  $K_1^*$  и  $K_2^*$ . Тогда частичная (без учета  $K_D$ ) или полная (если принять  $K_D = 1$ ) наблюдаемость РСОГС, характеризующейся  $N$  сигналами есть произведение  $K_{ПОЛ}$  и  $K_{ОБР}$ , определяемое коэффициентом  $K_Σ$  по выражениям (1) и (2):

$$K_H|_{\text{при } K_D=1} = K_{ПОЛ}K_{ОБР} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( A_i \left( \frac{K_1 K_1^* + 0,1 \cdot K_2 K_2^*}{1 + 0,1 \cdot K_2 K_2^*} \right)_i \right) \quad \text{при условии: } \sum_{i=1}^N A_i = N \quad (4)$$

Если к наблюдаемости РСОГС прибавить экспертных оценки и базу данных о параметрах системы, которые характеризуются соответствующими коэффициентами  $K_Э$  и  $K_{БД}$ , можно получить прогноз технического состояния системы с коэффициентом  $K_{ПР}$ . На основании прогноза оцениваются параметры РСОГС, появляется возможность раннего распознавания возможных НшС и выдаются рекомендации о текущем управлении системой. Коэффициент прогноза технического состояния РСОГС вычисляется как сумма:

$$K_{ПР} = A_Э K_Э + A_H K_H + A_{БД} K_{БД} \quad \text{при условии: } A_Э + A_H + A_{БД} = 1 \quad (5)$$

Где  $A_Э$ ,  $A_{ПР}$ ,  $A_{БД}$  – весовые коэффициенты вклада каждой составляющей.

Исходя из опыта эксплуатации РСОГС, можно оценочно принять следующие значения весовых коэффициентов:  $A_Э = 0,2$ ,  $A_H = 0,6$ ,  $A_{БД} = 0,2$ . Тогда коэффициент прогноза технического состояния РСОГС примет вид:

$$K_{ПР} = 0,2 \cdot K_Э + 0,6 \cdot K_H + 0,2 \cdot K_{БД} \quad (6)$$

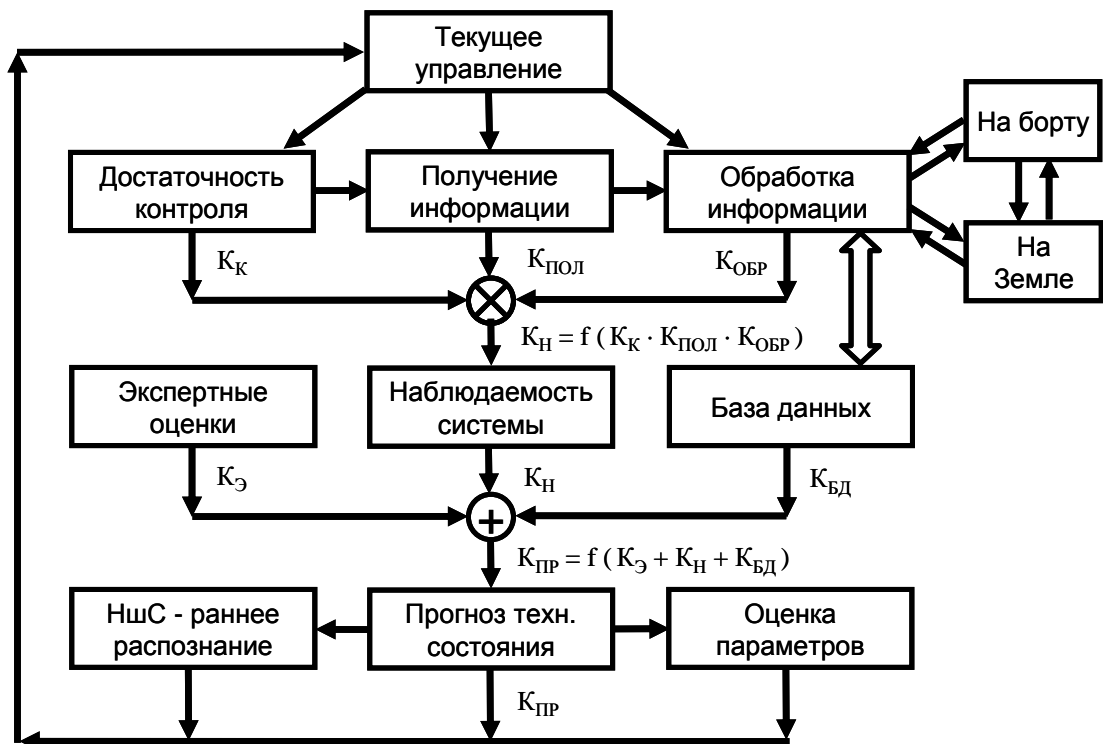


Рис. 5. Предлагаемая схема информационного обеспечения РСОГС на борту.

## 2. Методики эксплуатации РСОГС

На сегодня задача создания оптимизированных методик эксплуатации РСОГС на борту МКС не решена. Взаимное влияние различных систем, главным образом, при отклонении их параметров от допустимого штатного диапазона, мало учитывается (особенно на стадии проектирования и наземных испытаний). Поэтому, для постановки задачи оптимизации необходимо рассматривать каждую РСОГС не отдельно от всех других систем, а только в составе взаимодействующего между собой комплекса систем борта космической станции, взаимосвязанного с экипажем и с наземными службами.

Как пример постановки задачи оптимизации рассмотрим удаление микропримесей (МП) на МКС и систему очистки атмосферы от микропримесей (СОА-МП), которая работает на борту с 2000 г. по настоящее время (рис. 6). СОА-МП - это комплект аппаратов, расположенных по ходу потока очищаемого воздуха в следующей последовательности:

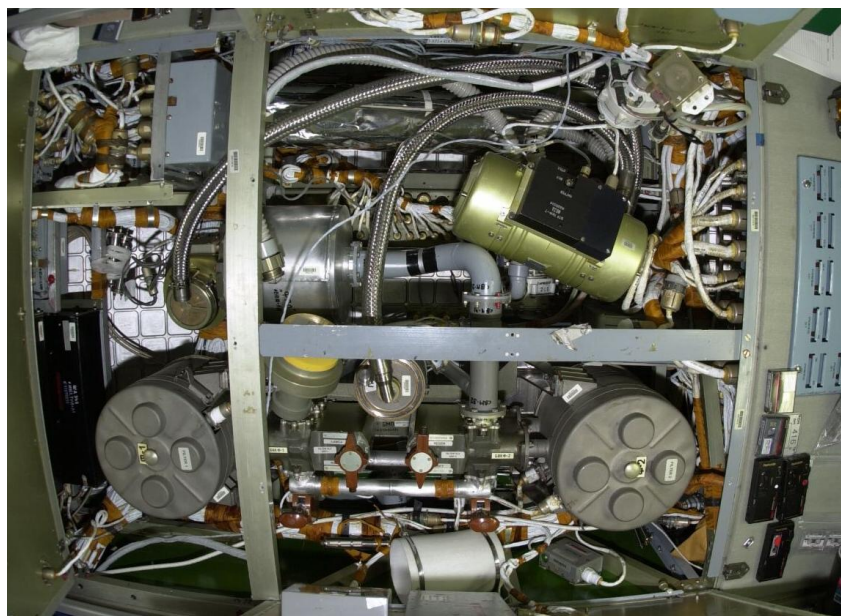


Рис. 6. Система очистки атмосферы от микропримесей на МКС (общий вид).

ФОА – фильтр предварительной очистки, накопительный адсорбер с активированным углем, осуществляет удаление тяжелых углеводородов;

ЗПЛ – два параллельных адсорбера с активированным углем, регенерируемые методом термовакуумной десорбции, для сорбции легко- и средне- сорбируемых примесей;

ПКФ – низкотемпературный каталитический фильтр (20-24 °С), в котором на слое палладиевого катализатора окисляются окись углерода и водород;

ПКФ-Т (на МКС с 2003 г.) – высокотемпературный каталитический фильтр (~ 220 °С), через него идет часть газового потока для окисления метана на палладиевом катализаторе.

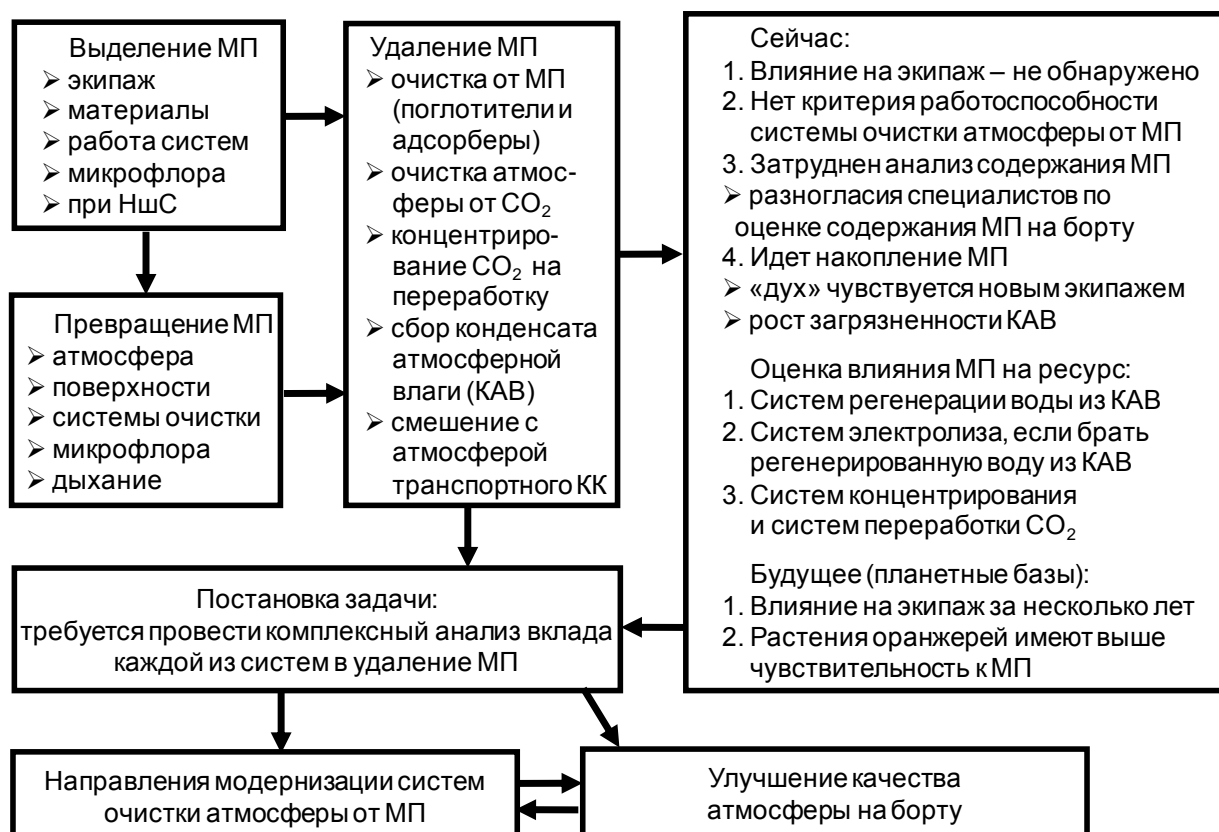
Указанные аппараты (кроме ПКФ-Т) отработали на борту почти 4 ресурса (таблица 3).

Таблица 3. Нарботка аппаратов СОА-МП на борту МКС с 2000 г.

Аппарат	Ресурс	Нарботка	Примечание
ФОА	1095 суток	4320 суток	Замена 06.09.2012 г.
ЗПЛ (2 штуки)	1095 суток, 54 регенерации	4394 суток 241 / 240 регенераций	На 18.11.2012 г. работают без замены
ПКФ	1095 суток	4320 суток	Замена 06.09.2012 г.
ПКФ-Т	240 суток	171 сутки	4 включения с 2003 г.

Выделение МП на борту МКС и их последующие химические превращения не поддаются однозначному и исчерпывающему описанию. С другой стороны, кроме СОА-МП удаление МП частично происходит при работе других систем МКС (рис. 7), в том числе и при работе аналогичных по функциям систем в американском модуле МКС:

- удаление МП за борт с CO<sub>2</sub> в системе очистки атмосферы от углекислого газа;
- удаление МП с конденсатом атмосферной влаги (КАВ) при его сборе и регенерации;
- удаление МП при смешении атмосферы МКС с атмосферой пилотируемых кораблей (особенно при полетах корабля «Спейс Шаттл» с большим объемом обитаемого отсека);
- удаление МП с CO<sub>2</sub> в системе концентрирования углекислого газа (американская система периодически работает с 2010 г., российская - планируется к поставке на МКС).



*Рис. 7. Микропримеси на борту МКС и задача оптимизации очистки атмосферы.*

При эксплуатации СОА-МП на борту МКС отсутствуют какие-либо четкие критерии оценки работоспособности данной системы, т.к. анализ содержания МП крайне затруднен и вызывает разногласия специалистов. Для постановки задачи оптимизации очистки атмосферы от МП требуется оценить влияние МП на другие системы и экипаж (особенно длительное влияние) и дать анализ вклада каждой из систем в удаление МП.

\* \* \*

Другим примером отсутствия оптимизации при взаимодействии различных систем на борту МКС является рассмотренная выше СГК «Электрон-ВМ». На МКС долгое время отсутствовал контроль содержания свободного газа в воде при ее подаче из системы водообеспечения на электролиз в ТБ системы «Электрон-ВМ», т.к. считали «по умолчанию»,

что вода соответствует норме. Позже выяснилось, что подаваемая вода может содержать газ, вплоть до 50% по объему (рис. 8, 12). Если для подпитки использовалась российская вода системы «Родник», то содержащийся газ являлся воздухом, а если использовалась вода электрохимического генератора (топливных элементов) американского корабля «Спейс Шаттл», то содержащийся газ являлся водородом. Это приводило к ряду НшС при работе системы «Электрон-ВМ» на МКС [3-5], основными из которых были:

- газ вызывал многочисленные сбои работы шестеренных насосов, обеспечивающих циркуляцию электролита в ТБ и, как следствие, частые отключения СГК;

- водород, попавший в кислородную линию ТБ, вызвал сильный разогрев и оплавление внутри блока дожигания (который входит в состав ТБ) при каталитической очистке электролизного кислорода (рис. 9).



Рис. 8. МКС 21.10.2005 г. Газ в воде для СГК «Электрон-ВМ» (объем емкости 22 л).

НшС послужили причиной вывода из эксплуатации на борту ТБ № 006 (в 2004 г.) и № 008 (в 2006 г.) системы «Электрон-ВМ». Регулярный контроль содержания свободного газа в воде и его сепарация был налажен на МКС только со 2-й половины 2006 г. (см. раздел 4).



Рис. 9. *Оплавление стекловолкна в блоке дожигания ТБ 008 (фото после спуска на Землю).*

### 3. Идеология управления РСОГС

Сегодня на борту МКС управление РСОГС осуществляется от централизованной системы управления – БЦВМ. Это приводит к тому, что любое вмешательство в деятельность БЦВМ, сбои и НшС в ней существенно влияют на работу РСОГС.

Так при эксплуатации СГК «Электрон-ВМ» с ТБ № 009 на МКС в 2006-2011 гг. из 211 отключений 110 связаны с системой управления (рис. 10 – позиции А.2, А.3.1, Б.1 и Б.3).

Всего отключений системы «Электрон-ВМ» с ТБ № 009		211
→ А.	Штатные автоматические отключения (по команде)	172
→ А.1.	Плановые	69
→ А.2.	Вмешательство в деятельность системы управления	88
→ А.3.	По рекомендации ЦУП	15
→ А.3.1.	Сбой системы управления	7
→ А.3.2.	Сбой других систем (кроме системы управления)	4
→ А.3.3.	Ошибочная рекомендация	1
→ А.3.4.	Нештатная ситуация в ТБ	3
→ А.3.4.1.	Ранее аварийного отключения (реальный отказ в ТБ)	2
→ А.3.4.2.	Реальная НшС в ТБ (без аварийного отключения)	1
→ Б.	Аварийные автоматические отключения (по аварийному сигналу)	38
→ Б.1.	Сбой системы управления	5
→ Б.2.	Сбой других систем (кроме системы управления)	5
→ Б.3.	Ложный сигнал системы управления	10
→ Б.4.	Необоснованный сигнал (допустимое отклонение принято за отказ)	6
→ Б.5.	Реальный отказ из-за ошибок экипажа	5
→ Б.6.	Реальный отказ в ТБ	7
→ В.	В ручном режиме (при тестировании)	1

Рис.10. *Отключения при работе СГК «Электрон-ВМ» с ТБ № 009 на борту МКС.*

Опыт эксплуатации РСОГС на борту МКС также показал, что изменения, вносимые в управление системой при ее работе, являются неизбежными и обусловлены:

- исправлением ошибок программы и другим вмешательством в работу БЦВМ;
- совершенствованием самого алгоритма управления РСОГС;
- доработкой и модернизацией РСОГС;
- устранением нештатных ситуаций;
- подключением дополнительного оборудования к РСОГС;
- повышением уровня безопасности при работе РСОГС, за счет усиления контроля;
- в перспективе – совершенствованием системы сбора информации о РСОГС.

Но при вмешательстве в работу системы управления (в работу БЦВМ) возникает опасность появления ошибки, как в самом алгоритме управления, так и в его программной реализации (см. в разделе 1 о НшС с СГК «Электрон-ВМ»).

Таким образом, является необходимым новый подход к управлению РСОГС (рис. 11):

- БЦВМ осуществляет централизованное управление высшего уровня;
- автономный программируемый блок управления (АБУ) для текущего управления;
- выбор управления (АБУ или БЦВМ) – резервирование от НшС системы управления;
- обязательное УСО – устройство сбора и обработки информации о РСОГС.

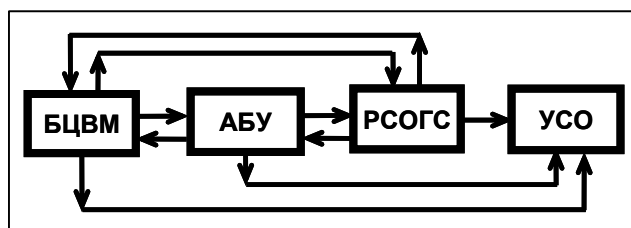


Рис. 11. Перспективное управление РСОГС (пояснение обозначений – в тексте).

#### 4. Ручные операции с РСОГС.

Ручные операции экипажа с РСОГС на борту неизбежны из-за экспериментального характера самих систем и возникающих НшС при их эксплуатации. Кроме того, возможно появление штатных ручных операций, которые ранее не были предусмотрены регламентом.

Пример появления штатной ручной операции с 2006 г. – подготовка воды для СГК «Электрон-ВМ» с целью удаления содержащегося в ней газа (см. раздел 2). В данном случае экипажу приходится осуществлять перекачку воды из одной емкости в другую через специальный сепаратор газа. Необходимо следить за газом в сепараторе и накопившийся газ стравливать в атмосферу, что в условиях микрогравитации является проблематичным из-за отсутствия единого газового пузыря в жидкости (рис. 12). Это вызывает ряд проблем:





МКС 05.09.2007 г. Вода электрохимического генератора «Спейс Шаттла». Газ – водород !



МКС 01.08.2007 г. Вода из системы «Родник»



МКС 05.09.2007 г. Вода без газа (трудно отличить от чистого газа)

Рис. 12. Подготовка воды для СГК «Электрон-ВМ» на МКС. Вода в сепараторе газа.

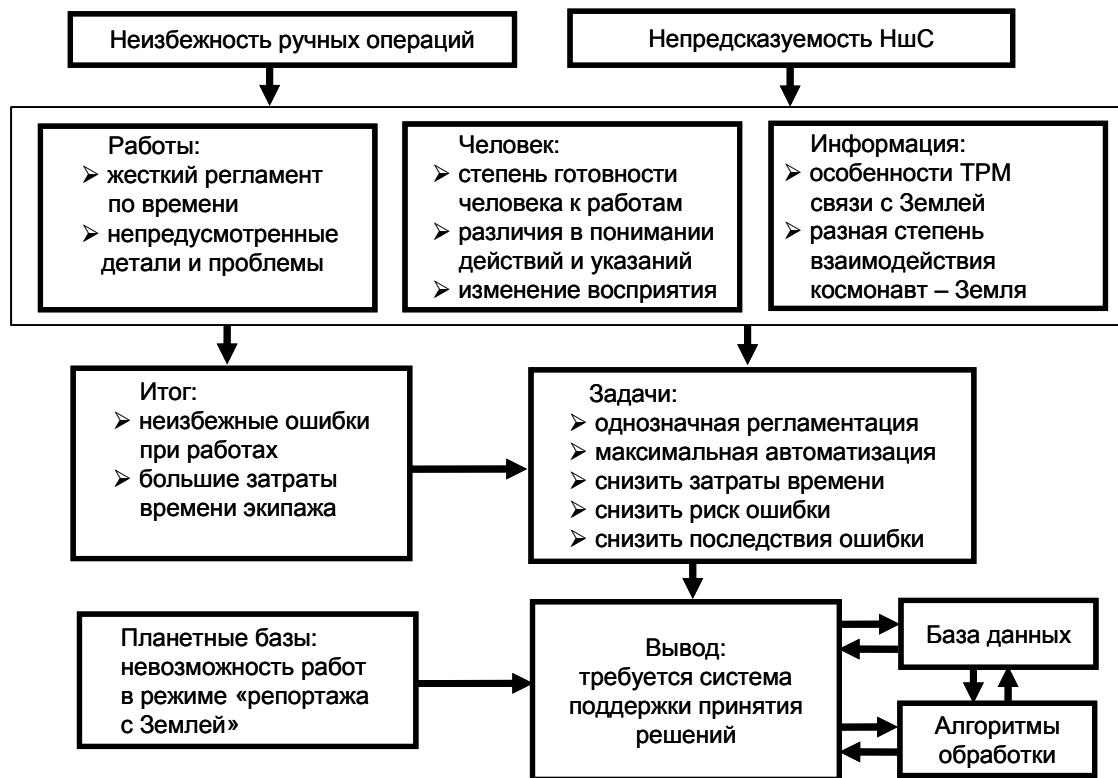


Рис. 13. Ручные операции при работах с РСОГС на борту.

- большие и регулярные (каждые несколько дней) затраты времени экипажа;

- по виду трудно отличить чистый газ от чистой жидкости внутри аппарата;
- при работе сепаратора велика вероятность проскока газа с жидкостью;
- требуется специальный опыт и навыки экипажа при проведении работ;

Для частичного решения указанных проблем в конце 2006 г. на борту МКС экипажем снят 9-и минутный учебный фильм по подготовке воды для СГК «Электрон-ВМ».

При проведении любых ручных операций на борту следует учесть три составляющие: непосредственно сами работы, действия человека и информационное обеспечение работ. Общий подход к ручным операциям и возникающие при этом задачи показаны на рис. 13. Вывод: необходимо создание на борту в помощь экипажу системы поддержки принятия решений с соответствующей базой данных и алгоритмами обработки информации.

### 5. Дополнительное оборудование для РСОГС

Реальные условия эксплуатации РСОГС на борту могут существенно отличаться от тех условий, которые были заложены при создании и отработке систем, особенно учитывая ограниченные возможности наземной отработки и экспериментальный характер систем. Поэтому подключение дополнительного (не штатного) оборудования к РСОГС позволяет за счет небольших массовых затрат получать существенные выгоды при эксплуатации (рис. 14).

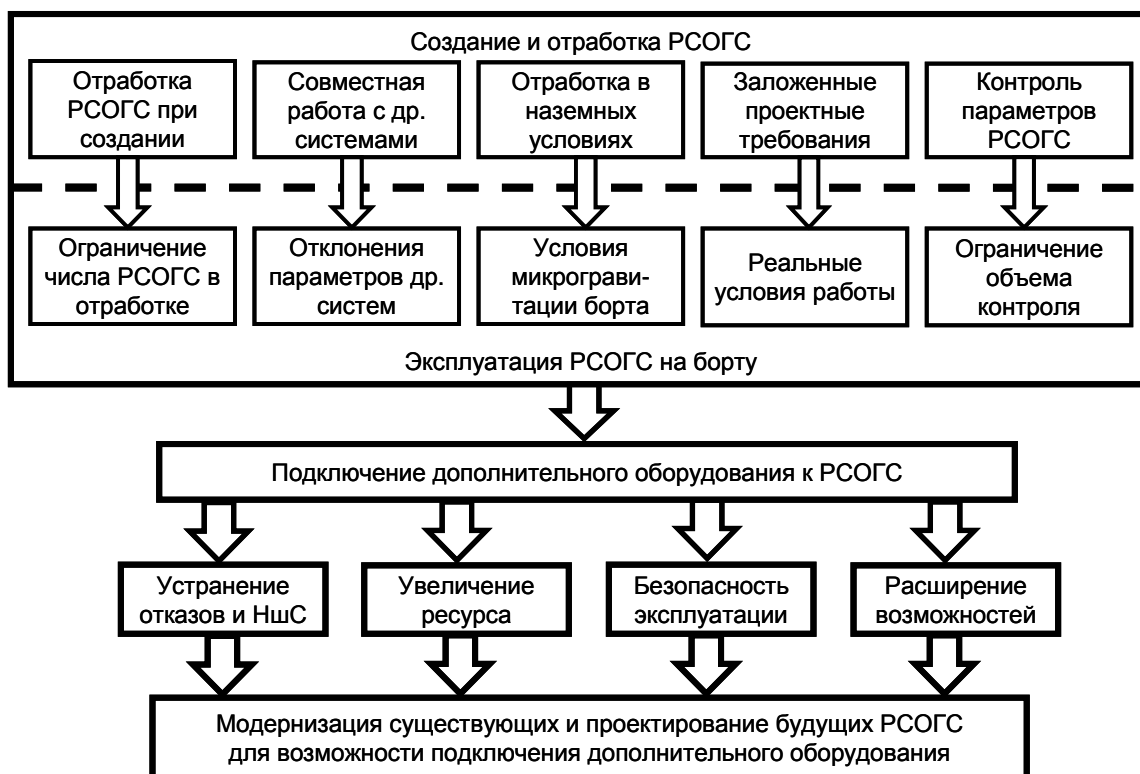


Рис. 14. Необходимость и значимость дополнительного оборудования для РСОГС.

Показательным примером является эксплуатация системы «Электрон-ВМ» с ТБ № 009 на борту МКС в период 2006-2011 гг. Доставленный с Земли дополнительный внешний клапан подпитки водой, взамен отказавшего в самом начале эксплуатации клапана в составе ТБ, позволил полностью восстановить работу ТБ в штатном режиме. Общий вес доставленного дополнительного оборудования за весь период эксплуатации ТБ № 009 составил всего 10,3 кг (таблица 4).

*Таблица 4. Доставленное оборудование для ТБ № 009 СГК «Электрон-ВМ» на МКС.*

Оборудование	Вес	Назначение	Результат	Дальнейшее использование
Внешний клапан подпитки водой	1,4 кг	Подача воды в ТБ после отказа клапана в составе ТБ	Обеспечение подачи воды в период работы ТБ	На борту в ЗИПе
Внешний блок циркуляции	5,9 кг	Циркуляция электролита после отказа основного и резервного насосов	Дополнительная наработка ТБ 56,5 суток (145,7 кг O <sub>2</sub> )	На борту в ЗИПе
Внешние аэрозольные фильтры для O <sub>2</sub> и H <sub>2</sub> линий	2 шт. по 1,5 кг каждый	Повышение безопасности работы ТБ при его работе за ресурсом	Дополнительная наработка ТБ 18,2 суток (48,6 кг O <sub>2</sub> )	Первый – вывод из эксплуатации, второй – работа на МКС с ТБ № 011

Таким образом, возможность подключения дополнительного оборудования к РСОГС должна закладываться при проектировании новых и модернизации существующих систем.

### **Заключение**

Рассмотренный комплексный подход к эксплуатации РСОГС:

- снижает количество нештатных ситуаций и увеличивает безопасность эксплуатации;
- увеличивает ресурс и более полно проявляет потенциальные возможности систем;
- определяет направления дальнейшей модернизации РСОГС.

Предлагаемый комплексный подход применен на борту МКС при эксплуатации СГК «Электрон-ВМ» с ТБ № 009. Комплексный подход позволил сделать прогноз о том, что потенциальный ресурс ТБ может составить 3 года [1, 6] (на момент прогноза наработка ТБ № 009 достигла 490 суток, при ресурсе 365 суток и массе 160 кг). В итоге, ТБ № 009 системы «Электрон-ВМ» в 2006-2011 гг. наработал до отказа 1265 суток ( $\approx 3,5$  года), выработав 3232

кг кислорода [7] (рис. 15). Ранее максимальная наработка ТБ системы «Электрон-ВМ» на борту МКС составляла 456 суток для ТБ № 005 в 2002-2005 гг.

Как выводы можно определить задачи ближайшего будущего при разработке РСОГС:

- комплексный подход к эксплуатации РСОГС необходимо закладывать уже на стадии их проектирования;

- создание РСОГС для будущих обитаемых планетных баз возможно только с учетом комплексного подхода к эксплуатации систем.

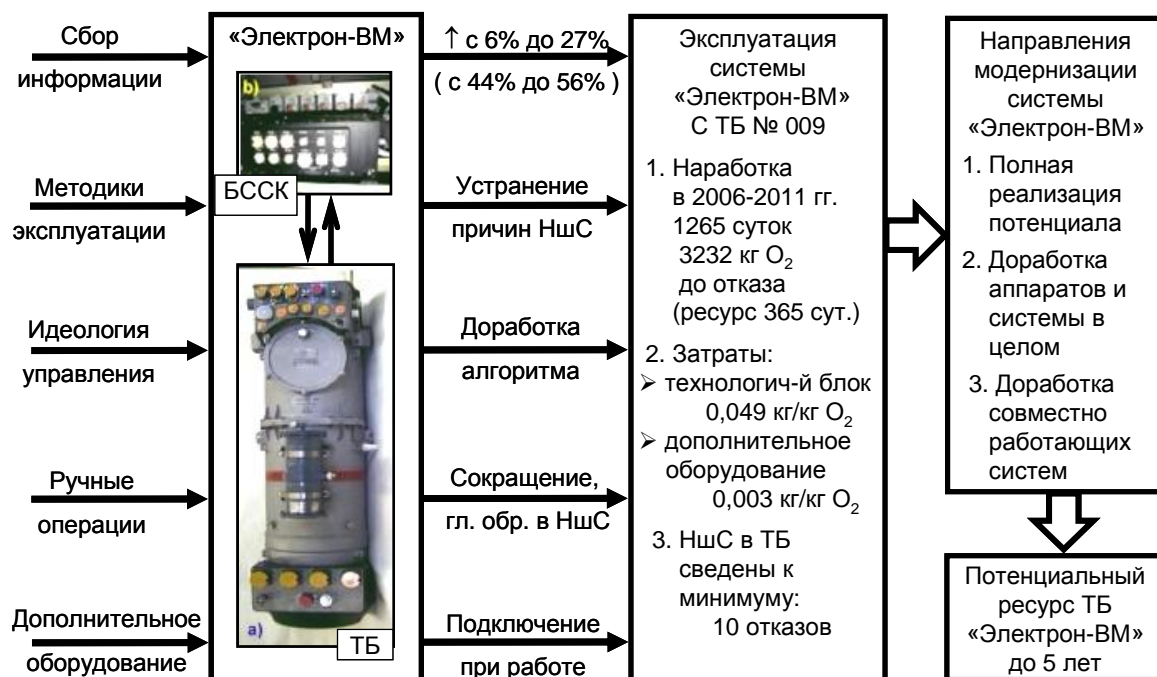


Рис. 15. Комплексный подход к эксплуатации СГК «Электрон-ВМ» с ТБ № 009.

### Библиографический список

1. Гаврилов Л.И., Курмазенко Э.А., Томашпольский М.Ю., Кочетков А.А., Прошкин В.Ю. Перспективы создания регенерационных систем обеспечения газового состава для межпланетных полетов. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2008. Т. 42. № 6/1 дополнительный. С. 67-69.
2. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А. Результаты функционирования системы генерации кислорода «Электрон-ВМ» на борту МКС: обобщенный анализ причин нештатных ситуаций. // Системный анализ, управление и навигация. 13-я Международная научная конференция (Евпатория, Крым, Украина). 29 июня – 6 июля 2008. Тезисы докладов. М.: МАИ-ПРИНТ. 2008. С. 271-272.
3. Kurmazenko E.A., Samsonov N.M., Gavrilov L.I., Farafonov N.S., Belavencev Ju.E., Pavlova N.V., Proshkin V.Ju., Romanov S.Ju., Geleznyakov A.G., Ryabkin A.M., Lyubimov G.A., Kirushin

O.V. Off-normal Situations Related to the Operation of the Electron-VM Oxygen Generation System aboard the International Space Station. // 35th International Conference on Environmental Systems and 8th European Symposium on Space Environmental Control Systems (Rome, Italy). July 11-14, 2005. SAE Publication. № 2005-01-2803. P. 1-7.

4. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А. Анализ работы системы генерации кислорода «Электрон-ВМ» № 006 и № 008 на борту МКС. // Пилотируемые полеты в космос. 7-я Международная научно-практическая конференция (Звездный городок, Московская обл.). 14-15 ноября 2007. Сб. тезисов. Московская обл., Звездный городок: РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина. 2007. С. 163-164.

5. Kurmazenko E., Gavrilov L., Tomashpolskiy M., Kochetkov A., Proshkin V. Oxygen Generation System: Results of the Operation On-Board ISS and the Development Tendencies for Interplanetary Spaceflight. // Proceedings of 60th International Astronautical Congress (Daejeon, Republic of Korea). October 12-16, 2009. Paper IAC-09-A1.6.8 (ID:2760). P. 1-10.

6. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Павлова Н.В., Телегин А.А., Рябкин А.М., Кирюшин О.В., Любимов Г.А. Системы генерации кислорода на основе электролиза воды: результаты эксплуатации на Международной космической станции и перспективы развития. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2008. Т. 42. № 6/1 дополнительный. С. 70-71.

7. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А. Эксплуатация российской системы генерации кислорода «Электрон-ВМ» с технологическим блоком № 009 на борту Международной космической станции. // Космический форум 2011, посвященный 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (Московская обл., Звездный городок – Москва). 18-21 октября 2011. Сб. материалов. М.: ИМБП РАН. 2011. С. 210.