

## **Управление жизнеобеспечением экипажей космических объектов: системный подход**

**Зарецкий Б.Ф. \*, Курмазенко Э.А. \*\*, Прошкин В.Ю. \*\*\***

*Научно - исследовательский и конструкторский институт химического  
машиностроения, НИИХиммаш, ул. Большая Новодмитровская, 14,  
Москва, 12 7015, Россия*

*\*e-mail: [bsarezky@mail.ru](mailto:bsarezky@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [e\\_kurmazenko@niichimmash.ru](mailto:e_kurmazenko@niichimmash.ru)*

*\*\*\*e-mail: [v\\_proshkin@mail.ru](mailto:v_proshkin@mail.ru)*

***Статья поступила 15.07.2020***

### **Аннотация**

Развитие пилотируемой космонавтики в сторону создания планетных баз делает особенно актуальной проблему разработки автоматизированной системы управления комплексом систем жизнеобеспечения (АСУ КСЖО) экипажа. Решение этой сложной задачи связано с поиском оптимальных решений при наличии множества противоречивых показателей. Применением системного подхода и формулированием группы глобальных критериев эффективности удалось существенно упростить методику решения задачи и предложить комплексный подход к построению АСУ КСЖО. Полученные результаты использованы при создании АСУ наземных испытательных стендов.

**Ключевые слова:** системный подход, управление, критерии эффективности, типовой стенд, имитационное моделирование

## Введение

Системы жизнеобеспечения (СЖО) экипажей космических объектов имеют в России многолетнюю историю создания и эксплуатации на околоземных орбитальных станциях. Сегодня используются на Международной космической станции или активно создаются для применения в ближайшем будущем российские [1-3] и зарубежные [1, 4-9] СЖО. Увеличение времени существования обитаемых космических станций, перспективы создания обитаемой базы на Луне и пилотируемого полета на Марс существенно усложняют задачу поддержания жизнедеятельности экипажа. Комплекс СЖО (КСЖО) для экипажа [1], как взаимосвязанная совокупность систем различного назначения и различной степени сложности, становится одним из главных элементов на борту космического объекта. КСЖО (рис. 1), в перспективе, кроме систем на запасах и систем на основе физико-химических процессов регенерации компонентов среды обитания, будет включать биологические (биотехнические) системы [10]. Все вышесказанное делает особенно актуальной проблему создания автоматизированной системы управления (АСУ) КСЖО, которая должна решаться на основе системного подхода.

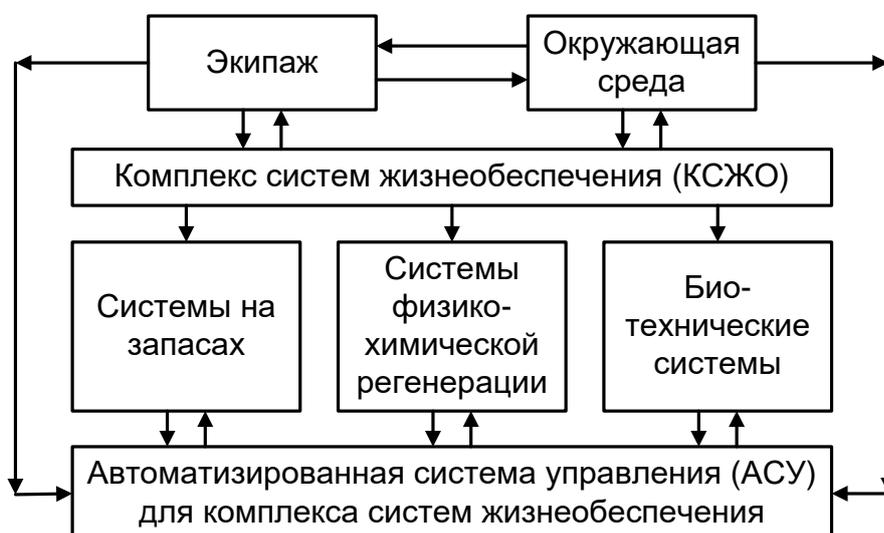


Рис. 1. КСЖО экипажа как объект управления.

### **Системный подход при создании АСУ КСЖО**

При системном подходе [11] АСУ КСЖО рассматривается в совокупности и взаимодействии всех составных частей АСУ и КСЖО как объекта управления. Обязательным является учет внешнего окружения: системы, работающие совместно с КСЖО (включая систему энергопитания, систему терморегулирования и т.д.), окружающая среда, гермоотсек космического объекта (как место расположения АСУ и КСЖО), экипаж как часть системы человек-машина (включая уровень подготовки экипажа) и как целевой объект для КСЖО и наземные службы сопровождения космического полета. При этом КСЖО (интегрированная СЖО) со своей сложной структурой – составная часть искусственной эколого-технической системы пилотируемого космического аппарата [1].

При создании АСУ КСЖО лицо принимающее решение (ЛПР) встречается с необходимостью на каждом этапе решать сложную задачу поиска оптимального решения при наличии множества противоречивых друг другу показателей эффективности и отсутствии математического описания большинства объектов КСЖО, т.е. решать сложную задачу многокритериальной оптимизации [12, 13].

Для решения указанной задачи множество показателей эффективности, принятое в СЖО пилотируемых космических аппаратов, разделяются на три группы так, чтобы показатели внутри одной группы не противоречили друг другу [14, 15]. Для каждой группы вводятся обобщённые глобальные критерии эффективности, по которым проводится оптимизация. Предлагается использовать три обобщённых

глобальных критерия эффективности: живучесть  $G$ , себестоимость  $C$  и комфортность  $F$ . Для каждого глобального критерия сформирована задача поиска технического решения, обеспечивающего его экстремум. При этом на остальные два критерия накладываются ограничения.

$$G = \sum_i g_i \rightarrow \max \left\{ \begin{array}{l} C \in R_c \\ F \in R_f \end{array} \right. , \quad (1)$$

$$C = \sum_j c_j \rightarrow \min \left\{ \begin{array}{l} G \in R_g \\ F \in R_f \end{array} \right. , \quad (2)$$

$$F = \sum_k f_k \rightarrow \max \left\{ \begin{array}{l} G \in R_g \\ C \in R_c \end{array} \right. , \quad (3)$$

где:  $g_i$ ,  $c_j$ ,  $f_k$  – соответственно, локальные (частные) показатели эффективности в составе глобальных критериев  $G$ ,  $C$ ,  $F$ ;  $R_g$ ,  $R_c$ ,  $R_f$  – области ограничений для локальных показателей в составе соответствующих глобальных критериев  $G$ ,  $C$ ,  $F$ .

В выражениях (1)-(3) глобальные критерии эффективности – это совокупность локальных показателей эффективности, объединяемая условной суммой (знак  $\Sigma$ ). При численном расчете (или оценке) глобальных критериев суммирование локальных показателей в их составе производится с соответствующим коэффициентом пересчета при каждом показателе, чтобы привести все локальные показатели к одинаковой размерности. При этом итоговая размерность показателей (после пересчета) определяется исходя из поставленных конкретных задач.

Процесс создания АСУ КСЖО целесообразно разделить на три этапа, со своим глобальным критерием эффективности на каждом из этапов:

Этап 1. Определение оптимальной структуры, обеспечивающей максимум

живучести.

Этап 2. Определение оптимального технического обеспечения по минимуму себестоимости.

Этап 3. Разработка программного обеспечения по максимуму комфортности для экипажа.

С учётом изложенного выше, окончательный вариант системного подхода для ЛПР будет выглядеть следующим образом (рис. 2):

1. Получив техническое задание на создание технического устройства любой сложности, ЛПР уточняет наличие связей с надсистемой верхнего уровня (космическим кораблем или планетной базой в случае создания АСУ КСЖО) и внешним окружением (по отношению к рассматриваемому устройству) [1].

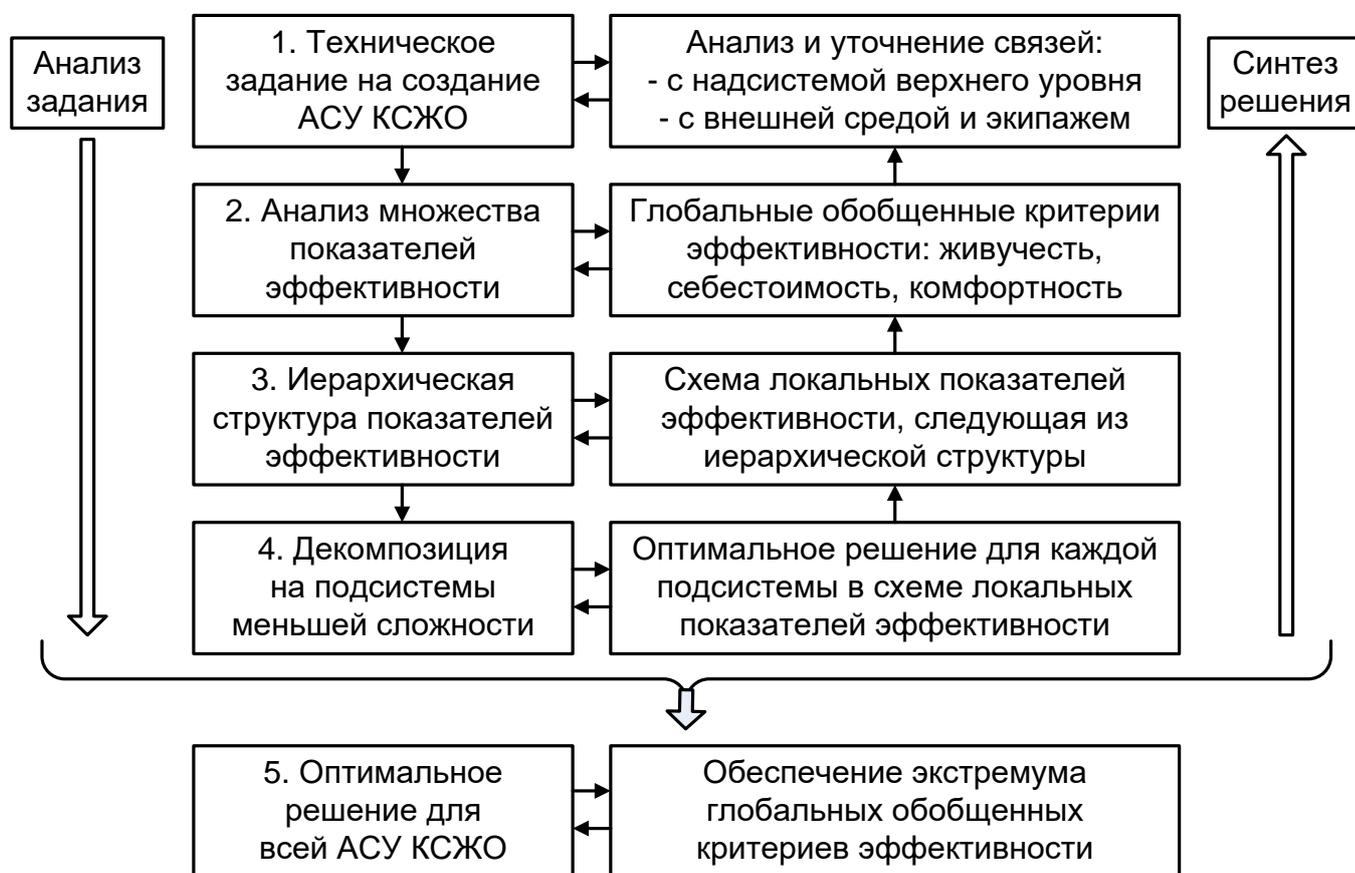


Рис. 2. Порядок создания АСУ КСЖО: системный подход.

2. ЛПР по изложенному алгоритму анализирует множество существующих показателей эффективности и строит на основе этого анализа глобальные обобщенные критерии эффективности. При создании АСУ КСЖО этими критериями будут живучесть  $G$ , себестоимость  $C$  и комфортность  $F$ .

3. Выстраивается иерархическая структура показателей (критериев) эффективности – от общих критериев к локальным показателям.

4. Проводится декомпозиция системы на подсистемы меньшей сложности. Для каждой подсистемы находится оптимальное решение в схеме локальных показателей, следующих из иерархической структуры.

5. Далее, следуя в обратном порядке снизу вверх, находится оптимальное решение для всей сложной системы. При этом главными остаются проблемы обеспечения экстремума глобальных обобщённых критериев эффективности.

### **Иерархическая структура критериев эффективности**

*Обобщенный глобальный критерий эффективности себестоимость  $C$*

Для АСУ КСЖО:

$$C_{АСУ} = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 . \quad (4)$$

Локальные показатели себестоимости в структуре глобального критерия:

$c_1$  – общие затраты ресурсов (деньги, труд, время, оборудование, материалы и др.) на создание изделия (проектирование, изготовление, испытания и т.д.);

$c_2$  – масса изделия, включая массу запасных частей и массу вспомогательного оборудования для обеспечения работы изделия;

$c_3$  – занимаемый изделием объём пилотируемого космического объекта;

$c_4$  – затраты энергии на борту при работе изделия;

$c_5$  – затраты времени экипажа космического объекта на эксплуатацию изделия.

Локальные показатели в выражении (4) входят с коэффициентами для пересчета размерности. В качестве размерности можно выбрать затраты в денежном выражении (включая стоимость доставки на орбиту [16]). Тогда для  $c_1$  –  $c_5$  соответствующими коэффициентами пересчета будут: стоимость затрат, стоимость массы, стоимость объема, стоимость энергии, стоимость времени экипажа.

Локальные показатели  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – постоянные составляющие глобального критерия себестоимость,  $c_4$ ,  $c_5$  – переменные составляющие, связанные со временем эксплуатации изделия. В процессе эксплуатации изделия удельные величины показателей  $c_4$  и  $c_5$  могут оставаться приблизительно постоянными, но могут и изменяться: как снижаться (например, при создании более оптимального режима эксплуатации или с приобретением опыта), так и возрастать (например, с увеличением числа нештатных ситуаций при выработке ресурса или подключением дополнительного оборудования для обеспечения работы системы).

Для КСЖО в целом в выражение (4) войдут дополнительные показатели:

$$C_{\text{КСЖО}} = cm_1 + cm_2 + cm_3 + c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5. \quad (5)$$

Этими показателями будут:

$cm_1$  – степень замкнутости КСЖО [3, 17];

$cm_2$  – целевая функция термомассовой оптимизации КСЖО [1];

$cm_3$  – показатель автономности КСЖО (грузооборота с Землей).

Для оценки денежных затрат коэффициентами пересчета для  $cm_1$  –  $cm_3$  будет

экономия денежных средств, при более высоких значениях указанных показателей.

В иерархической структуре глобального критерия себестоимость  $C$  для КСЖО, показатели  $cm_1 - cm_3$  – показатели первого ранга, а  $c_1 - c_5$  – второго ранга. Ранг показателя эффективности – это его интегральные свойства в характеристике системы и показатели первого ранга можно рассматривать как локальные критерии.

### *Обобщенный глобальный критерий эффективности живучести $G$*

В иерархической структуре глобального критерия живучесть показателем первого ранга будет ресурс (срок службы) системы, который включает:

- время хранения системы с момента изготовления до включения в работу;
- время работы системы (наработка);
- количество включений-отключений системы в процессе работы;
- суммарное время эксплуатации системы – наработка системы и перерывы между периодами работы;
- суммарное время годности системы – хранение, наработка и перерывы между периодами работы.

Показателями второго ранга для живучести будут:

- надёжность;
- наработка до отказа (устранение отказа возможно заменой отказавшего элемента или проведением специальных мероприятий по устранению влияния отказа на дальнейшую работоспособность);
- ремонтпригодность.

Показатели третьего ранга для живучести связаны с устойчивостью системы:

– к определенному техническими условиями на систему диапазону параметров внутри самой системы;

– к определенному техническими условиями на систему диапазону внешних воздействий: температура, влажность, давление, вибрации, химическое воздействие, перегрузки при выводе на орбиту, и т.д.;

– к выходу (при нештатной ситуации или нештатных условиях эксплуатации) внутренних параметров системы и внешних воздействий на систему за диапазон, определенный техническими условиями: величина отклонения и длительность воздействия.

*Обобщённый глобальный критерий: комфортность  $F$*

В иерархической структуре глобального критерия комфортность показателем первого ранга будет область параметров среды обитания экипажа (рис. 3).

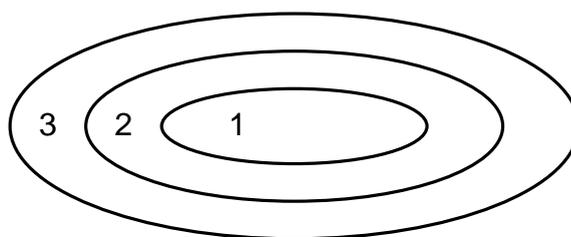


Рис. 3. Параметры состояния среды обитания экипажа космического объекта:  
1 – область комфорта, 2 – область выживания, 3 – область аварии.

Приведенная на рис. 3 область – это многомерная область диапазона величин параметров в многомерном пространстве значений параметров среды обитания.

Длительность пребывания экипажа на лунной [18] и планетной базе будет значительно более продолжительной, чем на орбитальной космической станции.

Поэтому для таких баз параметры среды обитания должны в максимальной степени соответствовать области комфорта (область 1 на рис. 3), а сама область комфорта будет иметь меньший диапазон изменения параметров.

Показателями второго ранга для глобального критерия комфортность будут:

– параметры атмосферы в среде обитания экипажа:

\* химический состав,

\* температура,

\* давление,

\* влажность,

\* содержание газовых микропримесей, жидкой аэрозоли и твердой пыли

(состав и количество, как по каждому компоненту, так и суммарно),

\* скорость движения атмосферы (скорость «ветра»);

– параметры потребляемой воды;

– параметры потребляемых продуктов питания (состав и разнообразие);

– средства санитарно-гигиенического обеспечения экипажа;

– удаление (включая переработку) продуктов метаболизма экипажа;

– информационное обеспечение деятельности экипажа.

Рассмотренная иерархическая структура показателей эффективности позволяет ЛПП работать с показателями более низкого ранга для упрощения решения возникшей частной задачи. При этом следует проверять, не нарушает ли полученное решение принцип экстремальности его по глобальным критериям эффективности.

Важным является соотношение рейтингов (иерархия) применительно к глобальным критериям эффективности в СЖО различного типа, рассмотренное в работе [19]. Оценку иерархии для глобальных критериев эффективности целесообразно проводить на каждом этапе решения задачи многокритериальной оптимизации.

Для СЖО пилотируемых космических аппаратов одна из первых попыток оптимизации связана с созданием систем обеспечения теплового режима (СОТР), где в качестве общего критерия эффективности взята суммарная масса СОТР и части энергетической установки, пропорциональной расходуемой на СОТР энергии [20]. Далее, такой критерий стал рассматриваться с учетом надежности [21] и применительно к СЖО в целом [22]. Также предложено в качестве глобального критерия для КСЖО (интегрированной СЖО) использовать целевую функцию термомассовой оптимизации (оптимизация по массовым и термодинамическим показателям с учетом условий и взаимосвязей на борту космического аппарата) [1]. Все эти критерии эффективности, предлагаемые как глобальные, войдут в состав рассмотренных выше локальных показателей в составе глобального критерия себестоимость.

### **Реализация АСУ КСЖО в наземном испытательном стенде**

Теоретическая база создания АСУ КСЖО и, как пример, АСУ КСЖО для обеспечения газового состава атмосферы рассмотрена в работах [14, 15, 23].

КСЖО (и отдельные системы в его составе) отрабатывается и испытывается на наземном стенде. Целесообразно, чтобы испытательный стенд наряду с КСЖО

позволял проводить отработку и АСУ для КСЖО, включая взаимодействие связки АСУ – КСЖО. При этом основа АСУ КСЖО – распределенная система управления, объединенная в единую сеть (рис. 4). Далее созданный испытательный стенд может использоваться при сопровождении эксплуатации КСЖО и соответствующей ему АСУ на пилотируемом космическом аппарате.

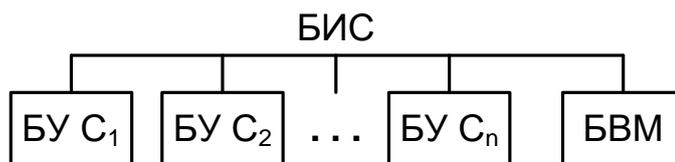


Рис. 4. Распределенная структура АСУ КСЖО

БВМ – бортовой компьютер управления КСЖО; БИС – бортовая информационная сеть; БУ С<sub>1</sub> ... БУ С<sub>n</sub> – локальные блоки управления систем С<sub>1</sub> ... С<sub>n</sub> в составе КСЖО.

Первый шаг к созданию стенда для отработки КСЖО и его АСУ – стенд для отдельной системы в составе КСЖО с соответствующим модулем АСУ (рис. 5). Стенд должен быть универсальным и адаптированным (с минимумом изменений) для отработки и сопровождения эксплуатации любой СЖО (на основе физико-химических процессов регенерации) из состава КСЖО [24].

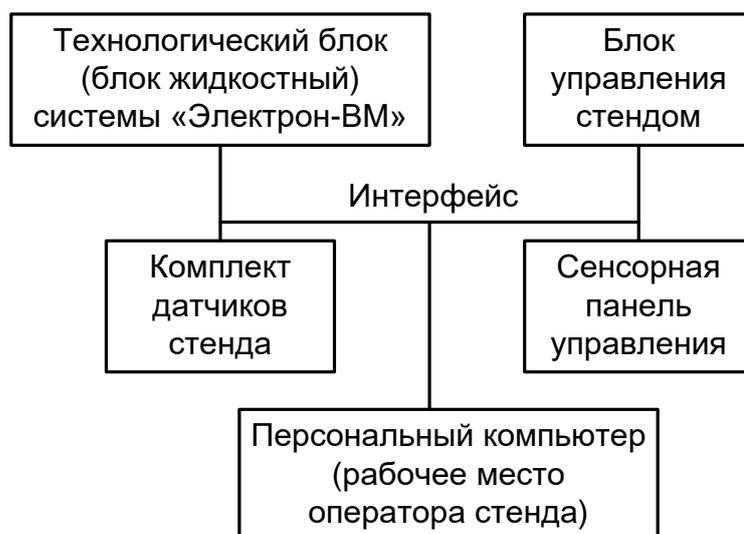


Рис. 5. Принципиальная структурная схема типового стенда.

Такой типовой стенд (рис. 6) был создан АО «НИИхиммаш» для исследований и отработки системы генерации кислорода (СГК) «Электрон-ВМ» [25], которая основана на получении кислорода методом электролиза воды. СГК «Электрон-ВМ» разработана и изготавливается АО «НИИхиммаш», работает на Международной космической станции (МКС) с 2000 г. и состоит из взаимозаменяемых блоков:

– блок жидкостный (БЖ) – технологический блок (ТБ), в котором реализованы все технологические процессы (на МКС работало 8 ТБ, включая работающий сегодня, а сам ТБ прошел ряд модернизаций по результатам эксплуатации);

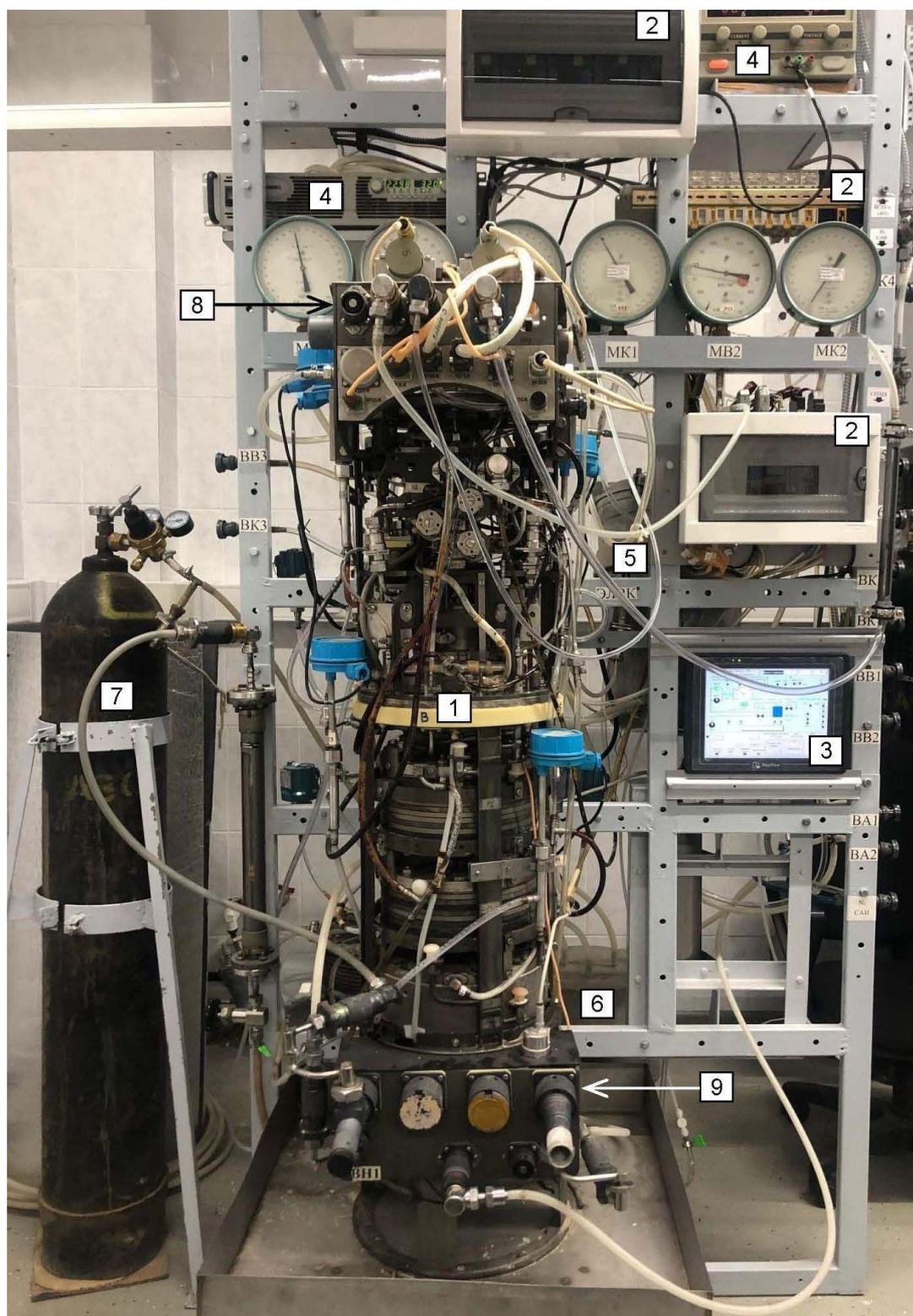


Рис. 6. Типовой стенд применительно к SGK «Электрон-ВМ»

1 – ТБ со снятой капсулой и дополнительными датчиками; 2 – блок управления и автоматика стенда; 3 – сенсорная панель; 4 – источники электрического питания для автоматки, датчиков и исполнительных элементов (справа) и для электролизера в составе ТБ (слева); 5 – штатная емкость 22 литра для подпитки водой ТБ (на заднем плане за рамой); 6 – имитатор капсулы ТБ (на заднем плане за рамой); 7 – баллон с азотом (имитатор штатного блока продувки азотом); 8 – выход из ТБ электролизных

газов (кислород и водород) и подача воды на подпитку; 9 – вход-выход в ТБ теплоносителя внешней системы терморегулирования для отвода выделяющегося тепла.

– блок согласования сигналов и команд (БССК) – электронный посредник между ТБ и центральным бортовым компьютером, управляющим СГК;

– комплект соединительных электрических кабелей между ТБ и БССК.

На стенде оперативное управление осуществляется блоком управления с соответствующим набором устройств связи с объектом. Количество каналов связи рассчитано на штатный комплект датчиков системы плюс дополнительные датчики контроля технического состояния. Для подсоединения дополнительных датчиков в установленном на стенде ТБ системы «Электрон-ВМ» снята капсула. Сегодня на стенде 34 дополнительных электронных датчика (кроме штатных датчиков ТБ). Показания датчиков выводятся на компьютер оператора стенда, в том числе и в виде графиков изменения параметров во времени. Для проведения работ без включения автоматики, в составе стенде предусмотрены манометры для контроля давления.

Управление стендом (и установленном на нем ТБ системы «Электрон-ВМ») может идти как в автоматическом, так и в ручном режиме.

При управлении в автоматическом режиме оператор выдает только команды «включить» и «отключить», а выдача команд на исполнительные элементы и контроль величин параметров выполняет АСУ согласно заложенному алгоритму. Если величина контролируемого параметра достигнет определенного предела или сработает аварийный дискретный (пороговый) датчик, то идет автоматическое отключение с указанием причины отключения (аварийного параметра, из-за

которого произошло отключение). При работе стенда оператор на мнемосхеме на мониторе компьютера видит состояние исполнительных элементов, аварийных датчиков и ряд наиболее важных параметров. Если необходимо, оператор может вызвать на монитор другие экраны, с подробной информацией о контролируемых параметрах и динамикой их изменения с момента включения.

При управлении в ручном режиме выдача команд на исполнительные элементы и производится самим оператором, который может выдавать их в любом порядке, вне зависимости от заложенного алгоритма управления.

Оператор, обычно, выдает команды с персонального компьютера в составе стенда (рис. 7). Сбой компьютера или потеря им связи со стендом (и в автоматическом, и в ручном режиме управления) на работу стенда не влияет, т.к. стендом управляет блок управления.

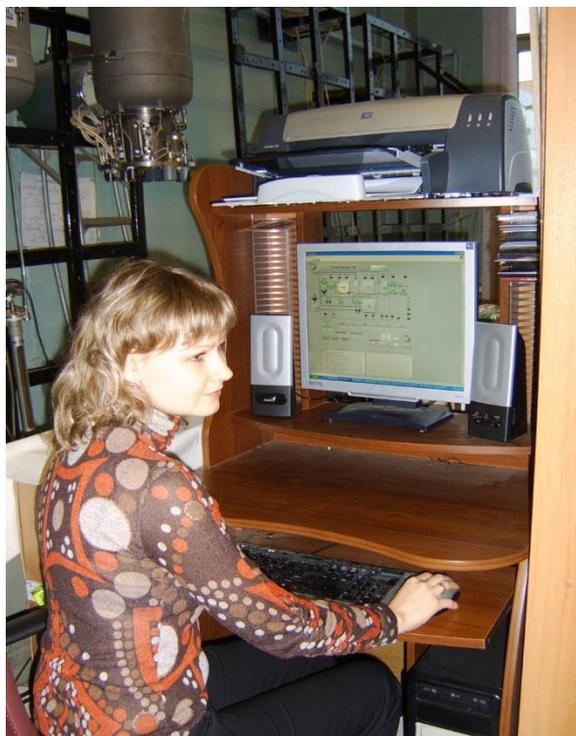


Рис. 7. Рабочее место оператора стенда

Выдача оператором команд в автоматическом или ручном режиме управления также возможна с промышленной сенсорной панели в составе стенда (Рис. 8). Для этого оператор набирает на панели личный код доступа (с помощью скрытых кнопок в углах панели), нажимает кнопку «Контроль с панели» и выбирает режим «Ручной» или «Автомат» (после этого блокируется выдача команд с компьютера). На мнемосхеме панели оператор видит состояние исполнительных элементов, аварийных датчиков и ряд наиболее важных параметров (эта же информация дублируется на мнемосхеме на мониторе компьютера). Если необходимо, оператор может кнопкой «Состояние» вызвать на панель другие экраны с дополнительной информацией о параметрах, хотя в меньшем объеме, чем при работе с компьютера.

Для передачи управления обратно – от сенсорной панели на компьютер, необходимо нажать большую белую клавишу в центре экрана с мнемосхемой.

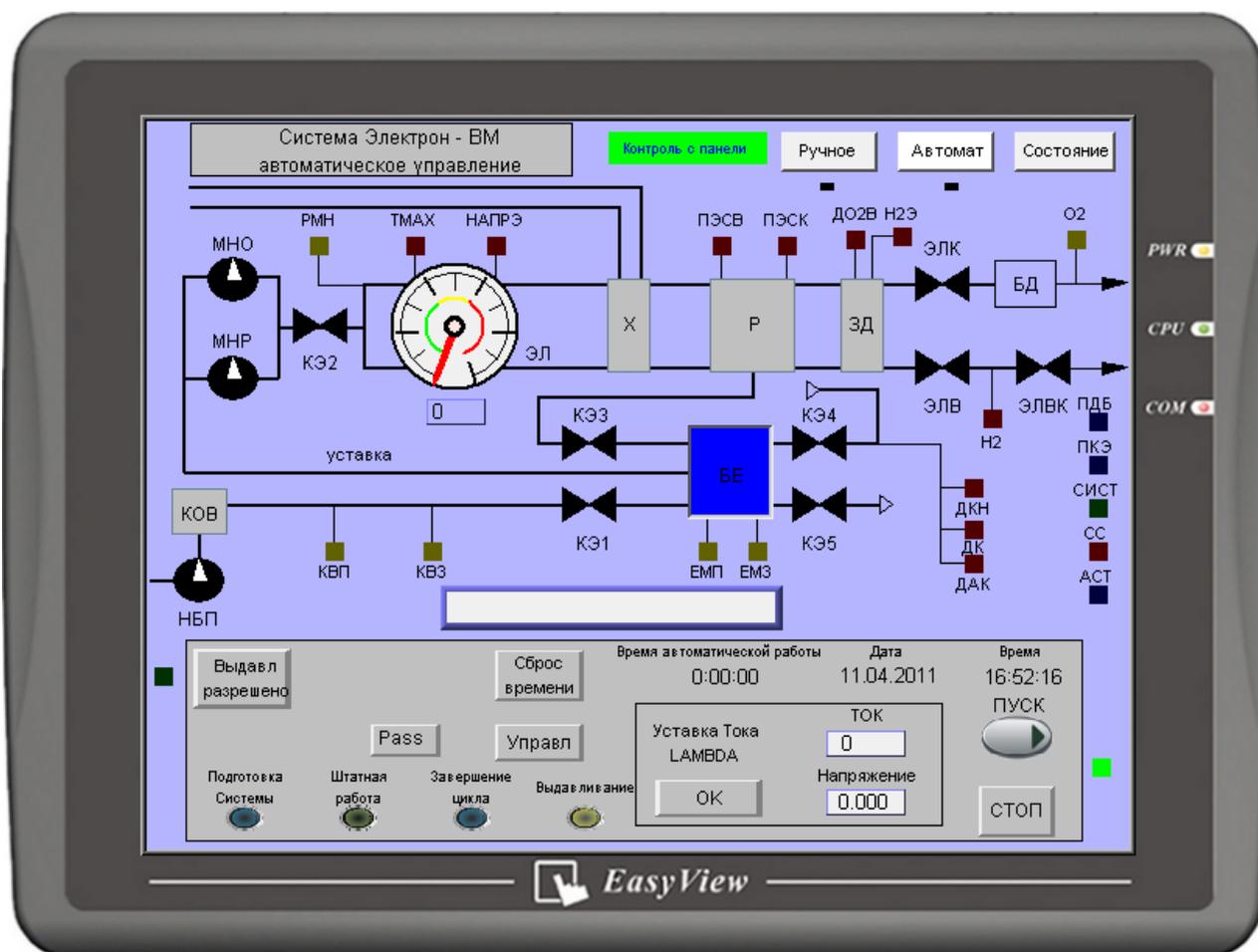


Рис. 8. Сенсорная панель в составе стенда

Описанный стенд прошел ряд модернизаций, связанных с установкой дополнительных датчиков и модернизацией ТБ системы «Электрон-ВМ» и активно эксплуатируется до настоящего времени. На основании полученного опыта и разработанного подхода к созданию АСУ для КСЖО, АО «НИИхиммаш» было полностью разработано, изготовлено и успешно эксплуатируется до настоящего времени следующее оборудование вместе с соответствующими АСУ:

– Стенд в АО «НИИхиммаш» сопровождения эксплуатации СГК «Электрон-ВМ», предназначенный для предварительной отработки запланированных на борту МКС работ со штатной системой, моделирования потенциальных нештатных

ситуаций (НШС) и т.д. Стенд также используется для проверки работоспособности после изготовления и проведения плановых регламентных работ как отдельных штатных блоков (ТБ и БССК) системы, так и СГК «Электрон-ВМ» в целом.

– Два стенда-тренажера в Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина: системы «Электрон-ВМ» и системы удаления микропримесей из атмосферы МКС. Стенды предназначены для отработки навыков взаимодействия космонавтов со штатными системами на борту МКС, включая действия при НШС.

– Макет-тренажер системы «Электрон-ВМ» в составе созданного в АО «НИИхиммаш» единого аппаратно-программного комплекса обслуживания экипажем СЖО в международном проекте «Марс-500», проведенном в Институте медико-биологических проблем РАН [26]. После завершения проекта макет-тренажер передан на кафедру 607 (сегодня – кафедра 614) Московского авиационного института, где сейчас используется для подготовки специалистов по СЖО космических аппаратов.

АО «НИИхиммаш» сегодня создает СЖО для МКС:

– Система регенерации воды из урины (СРВ-У) [27] – извлечение воды из урины экипажа многоступенчатой вакуумной дистилляцией. Создано три близких по конструкции СРВ-У: на борту МКС (работает с 2018 г.), для планируемого нового модуля МЛМ на МКС и для испытаний на Земле.

– Система переработки диоксида углерода (СПДУ), включающая в себя два самостоятельных блока (отдельные системы) – блок концентрирования диоксида углерода (БКДУ) и блок гидрирования диоксида углерода (БГДУ). БКДУ – очистка атмосферы от  $\text{CO}_2$  сорбцией на регенерируемом поглотителе с концентрированием

CO<sub>2</sub> для дальнейшей переработки. БГДУ [28] – переработка концентрированного CO<sub>2</sub> из БКДУ с электролизным водородом (из СГК «Электрон-ВМ») по реакции Сабатье ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) и дальнейшая конденсация паров воды для ее использования. Создано по два близких по конструкции технологических блока БКДУ и БГДУ, которые проходят отработку на Земле с перспективой на МКС.

При активном содействии от АО «НИИхиммаш» сторонними исполнителями созданы следующие АСУ для указанных систем и их испытательных стендов:

- три пульта управления для трех СРВ-У;
- АСУ испытательного стенда технологического блока БКДУ (не имеет самостоятельной АСУ и управляется автоматикой стенда);
- АСУ испытательного стенда связки: технологический блок БГДУ (не имеет самостоятельной АСУ и управляется автоматикой стенда) – СГК «Электрон-ВМ»;
- АСУ испытательного стенда связки технологических блоков БКДУ – БГДУ вместе с самостоятельными АСУ каждого из блоков.

### **Пример имитационного моделирования работы АСУ**

В рамках разработанного подхода к созданию АСУ КСЖО было проведено имитационное моделирование на примере управления по поддержанию в атмосфере пилотируемого объекта парциального давления кислорода [15] в условиях проекта «Марс-500» [26]. Структурная схема управления представлена на рис. 9.

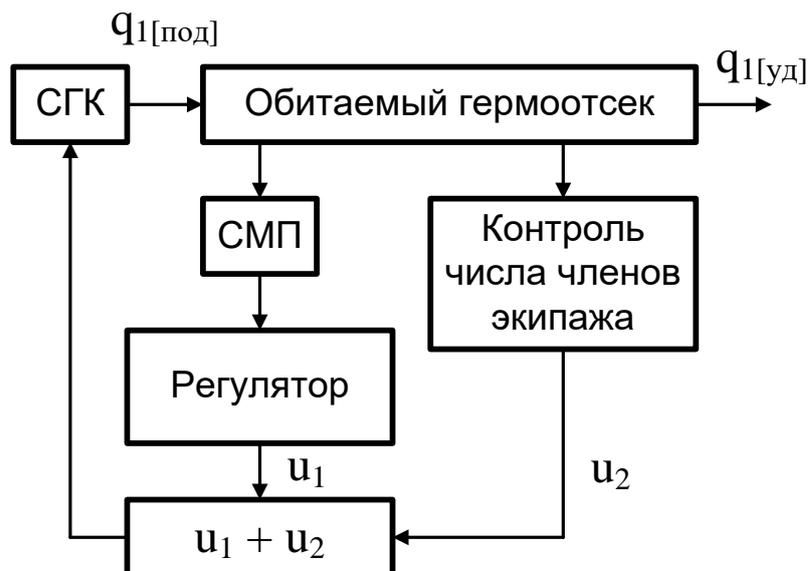


Рис. 9. Структурная схема управления (обозначения см. в тексте).

Математическое описание гермоотсека:

$$p_1(\tau) = p_1(0) + \frac{P}{V} \int_0^{\tau} [q_{1[под]}(\tau) - q_{1[уд]}(\tau)] d\tau, \quad (6)$$

где:  $p_1(0)$ ,  $p_1(\tau)$ ,  $P$  – соответственно, начальное и текущее (во времени  $\tau$ ) парциальные давления кислорода и общее давление в атмосфере гермоотсека, по измерению системы мониторинга параметров (СМП);  $V$  – объем гермоотсека;  $q_{1[под]}(\tau)$ ,  $q_{1[уд]}(\tau)$  – соответственно, текущие объемные расходы поступающего (производительность СГК) и потребляемого экипажем кислорода;  $\tau$  – время.

Управление по рассогласованию (пропорционально-интегральный регулятор):

$$u_1(\tau) = K_1^{\Pi} \cdot [p_{1[зад]} - p_1(\tau)] \cdot \frac{V}{P} + K_1^I \cdot \frac{V}{P} \cdot \int_0^{\tau} [p_{1[зад]} - p_1(\tau)] d\tau, \quad (7)$$

где:  $u_1(\tau)$  – управляющий сигнал по рассогласованию для производительности СГК;  $p_{1[зад]}$  – заданное парциальное давление кислорода в гермоотсеке;  $K_1^{\Pi}$ ,  $K_1^I$  –

соответственно, коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющей регулятора.

Управление по возмущению:

$$u_2(\tau) = n(\tau) \cdot q_{[\text{чел}]}, \quad (8)$$

где:  $u_2(\tau)$  – управляющий сигнал по возмущению для производительности СГК;  $n(\tau)$  – численность экипажа в текущий момент времени  $\tau$ ;  $q_{[\text{чел}]}$  – среднее потребление кислорода одним членом экипажа.

Имитационное моделирование проводилось в среде LabVIEW. Имитировалась ситуация выхода на поверхность Марса трех космонавтов из шести (согласно проекту «Марс-500»), со снижением потребления кислорода в гермоотсеке на 50% на период выхода. При этом отклонения парциального давления кислорода не происходило. Лицевая панель имитационной модели показана на рис. 10. В верхней части панели представлен график изменения производительности СГК в период имитации выхода, в нижней – парциальное давление кислорода в гермоотсеке.

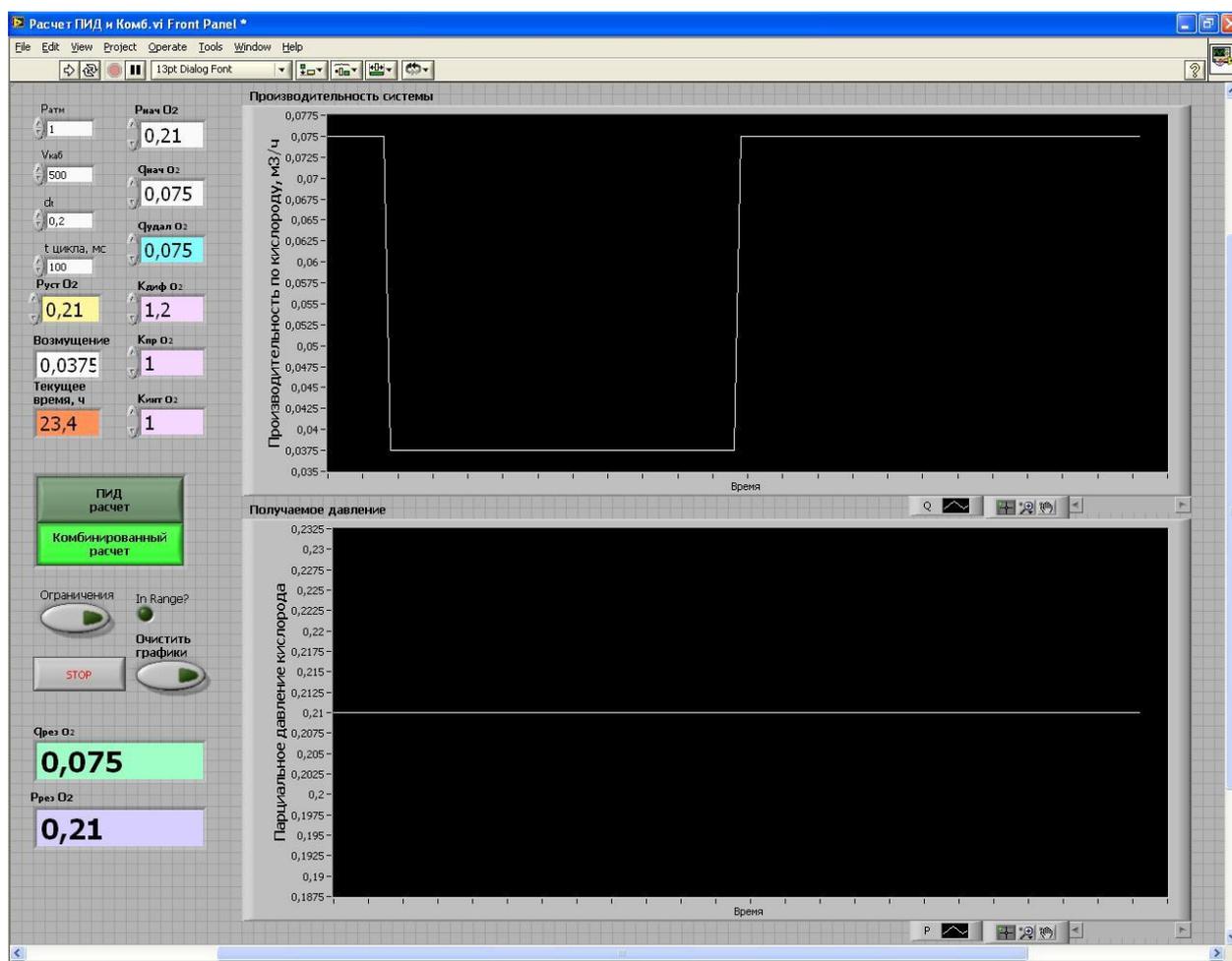


Рис. 10. Панель имитационной модели в среде LabVIEW

## Заключение

Анализ проблемы создания АСУ для КСЖО и системный подход к решению указанной задачи, изложенные в данной работе (вместе с рядом других работ [14, 15, 23]), дают методику создания АСУ КСЖО пилотируемого космического объекта (планетной базы). Такая методика рассмотрена, в первую очередь, для создания АСУ систем обеспечения газового состава (СОГС) атмосферы. Это связано с тем, что СОГС всегда рассматривают в тесной взаимосвязи с параметрами атмосферы гермоотсека (внешняя среда для систем) и экипажем (источник или конечный потребитель продуктов для систем). Полученные результаты сегодня реализованы,

главным образом, при создании АСУ ряда наземных стендов и, в определенных частях, при создании АСУ штатных СЖО для МКС. Кроме того, разработанные математические модели КСЖО и отдельных систем в его составе, вместе с соответствующими АСУ, позволяют моделировать работу как уже существующих сегодня, так и разрабатываемых новых систем.

Современные (в последние 12 лет) зарубежные исследования по созданию АСУ для КСЖО представлены всего двумя направлениями.

– В Японии рассматривается иерархия систем управления при планировании и контроле оборота материальных ресурсов для жизнеобеспечения на обитаемом космическом (и не только) объекте [29, 30]. Эти работы больше относятся к области логистики, чем к АСУ для КСЖО или отдельной СЖО.

– В США в рамках работ NASA по развитию СЖО для будущих космических полетов рассматриваются и вопросы управления [31]. Предполагается строить АСУ для КСЖО на следующих принципах: иерархическая модульная интегрированная архитектура (на цифровой основе, аналогичная Интернету), система искусственного интеллекта (на основе байесовских сетей), обнаружение и изоляция отказов систем (как задача для искусственного интеллекта).

В работе [32] приведен обзор всех исследований по созданию АСУ КСЖО начиная с 1960-х годов по настоящее время, при этом использовались все те же самые принципы, что и в сегодняшних разработках NASA. Констатируется, что поставленная задача не была решена (несмотря на общие достижения в области автоматизации) по следующим причинам: малое количество изделий СЖО (на борту, в наземных комплексах и в проектах), высокая частота отказов систем,

обслуживание СЖО на борту затруднено (а обеспечение их нормальной работы требует больших усилий экипажа). Кроме того, основные технологические процессы в КСЖО недостаточно интегрированы и управляются индивидуально.

Таким образом, проблема создания АСУ КСЖО является мало разработанной областью и любые исследования в данном направлении имеют большое значение. Это особенно важно при создании сложных и многофункциональных КСЖО, необходимых для длительных автономных космических полетов (к Марсу, астероидам и далее) и для обитаемых космических объектов со сроком службы в несколько десятков лет (сегодня МКС обитаема уже 20 лет).

### **Библиографический список**

1. 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.
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, 10-14 July 2016, ICES-2016-28, pp. 10.
3. Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В. Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей долговременных космических станций // Космическая техника и технологии. 2015. № 1. С. 67 - 80.
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. Balistreri S.F., Bryant Z.S. International Space Station (ISS) Environmental Control and Life Support (ECLS) System Overview of Events: 2018-2019 // 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts, USA, 7-11 July 2019, ICES-2019-373, pp. 9.

6. Carter L., Williamson J., Brow C.A., Bazley J., Gazda D., Schaezler R., Thomas F., Molina S. Status of ISS Water Management and Recovery // 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts, USA, 7-11 July 2019, ICES-2019-36, pp. 17.

7. Anderson M.S., Macatangay A.V., McKinley M.K., Sargusingh M.J., Shaw L.A., Perry J.L., Schneider W.F., Toomarian N., Gatens R.L. NASA Environmental Control and Life Support Technology Development and Maturation for Exploration: 2018 to 2019 Overview // 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts, USA, 7-11 July 2019, ICES-2019-297, pp. 16.

8. 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.

9. Sakai Y., Oka T., Waseda S., Arai T., Suehiro T., Ito T., Shima A., Sakurai M. Development status of air revitalization system in JAXA closed ECLSS for future crew

module // 48th International Conference on Environmental Systems, Albuquerque, New Mexico, USA, 8-12 July 2018, ICES-2018-146, pp. 7.

10. Escobar C.M., Nabity 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. 18.

11. Флейшман Б.С. Основы системологии. - М.: Радио и связь, 1982. - 368 с.

12. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: математические аспекты. - М.: Наука, 1989. - 128 с.

13. Строгонова Л.Б., Столярчук В.А., Макарова С.М., Васин Ю.А. Лунная база, проблемы обитаемости // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41586>

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

15. 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.

16. Jones H.W. The Recent Large Reduction in Space Launch Cost // 48th International Conference on Environmental Systems, Albuquerque, New Mexico, USA, 8-12 July 2018, ICES-2018-081, pp. 10.

17. Андрейчук П.О., Бобе Л.С. Критерии оценки эффективности работы и совершенствования регенерационных систем жизнеобеспечения // Космический

форум 2011, посвященный 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина: сборник материалов (Московская обл., Звездный городок, 18-21 октября 2011). - М.: ИМБП РАН, 2011. С. 128.

18. Короткова Т.И. Многокритериальный алгоритм принятия решения в системе обеспечения информационной безопасности объектов гражданской авиации // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63279>

19. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А. Глобальные критерии эффективности и их иерархия при анализе систем жизнеобеспечения для экипажей космических станций // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90167>

20. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. - М. Машиностроение, 1980. - 232 с.

21. Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В. Совместная оптимизация массоэнергетических характеристик систем терморегулирования космических аппаратов и приборного комплекса при обеспечении требуемой надежности // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 1. С. 5 - 14.

22. Кудрявцева Н.С. Анализ показателей надежности и эквивалентной массы систем жизнеобеспечения для полетов в дальний космос // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 3. С. 5 - 12.

23. Зарецкий Б.Ф., Гузенберг А.С., Шангин И.А. Жизнеобеспечение экипажа пилотируемого космического объекта, проблемы управления // Космическая техника и технологии. 2019. № 3. С. 109 - 120.

24. Zaretskiy B.F., Gavrilov L.I., Kurmazenko E.A. Crew Life Support System for Interplanetary Vehicles // 39th International Conference on Environmental Systems,

Savannah, Georgia, USA, 13-16 July 2009, SAE Technical Paper, 2009-01-2440, pp. 5.

25. 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.

26. Kurmazenko E., Khabarovskiy N., Kamaletdinova G., Demin E., Morukov B. Life Support System Virtual Simulators for Mars-500 Ground-Based Experiment // Biomedical Science, Engineering and Technology, Edited by D.N. Ghista, InTech, Croatia, 2012, vol. 22, pp. 535-558.

27. 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=29453>

28. Коган И.Л. Расчетно-экспериментальный анализ работы реактора гидрирования диоксида углерода // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58748>

29. Miyajima H., Abe K., Hirosaki T., Ishikawa Y. Development of Advanced Life Support Systems Control Software Integrating Operators' Empirical Knowledge // 38th International Conference on Environmental Systems, San Francisco, CA, USA, 29 June – 2 July 2008, SAE Technical Paper Series, 2008-01-1973, pp. 9.

30. Nakane M., Ishikawa Y., Miyajima, H. Dynamic Transition to Fallback Operation of Material Circulation Control in Advanced Life Support System using Hierarchical Autonomous Control Method // 45th International Conference on Environmental Systems, Bellevue, Washington, USA, 12-16 July 2015, ICES-2015-16, pp. 6.

31. Stapleton T., Heldmann M., Torres M., Bowers J., Corallo R. Environmental Control and Life Support for Deep Space Travel // 48th International Conference on Environmental Systems, Albuquerque, New Mexico, USA, 8-12 July 2018, ICES-2018-343, pp. 11.

32. Jones H.W. Controls and Automation Research in Space Life Support // 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts, USA, 7-11 July 2019, ICES-2019-12, pp. 12.