

ЗАЧЕМ МЫ ТОРМОЗИМ «ПРОГРЕСС» ИЛИ ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

Д.О. Монахов,
Центр Келдыша, Москва

О.В. Монахов,
РОО "ТРИЗ-Петербург"

На основании жизненного цикла грузового космического корабля "Прогресс" проведен анализ работы подобных аппаратов с позиции ТРИЗ. Воспользовавшись ключевыми приемами и инструментами Теории, такими как идеальный конечный результат (ИКР), законы развития технических систем (ЗРТС), приемы разрешения противоречий и другими, указано на возможные пути совершенствования данной технической системы и сделан прогноз ее развития.

Грузовой космический корабль, повышение идеальности, законы развития технических систем, надежность.

Грузовой космический корабль "Прогресс" (рис. 1) – первый автоматический аппарат, обеспечивающий снабжение орбитальных станций грузами, топливом, всем необходимым для пребывания на станции космонавтов, – их длительного и эффективного функционирования.

За время эксплуатации с 1978 года было выполнено 42 пуска аппаратов "Прогресс" и 70 пусков аппаратов "Прогресс М". В год происходит, в среднем, 4 пуска. Корабль выводится на опорную орбиту. Там он включает двигатели сближения и через 2 суток стыкуется с орбитальной станцией для разгрузки. После выполнения своего предназначения "Прогресс" считается объектом, засоряющим околоземное пространство. На место полезного груза помещаются отходы, мусор и отработавшая аппаратура. После этого корабль отходит от станции, при помощи основного двигателя уменьшает свою скорость, снижается и сгорает в атмосфере над заданным районом Тихого океана.

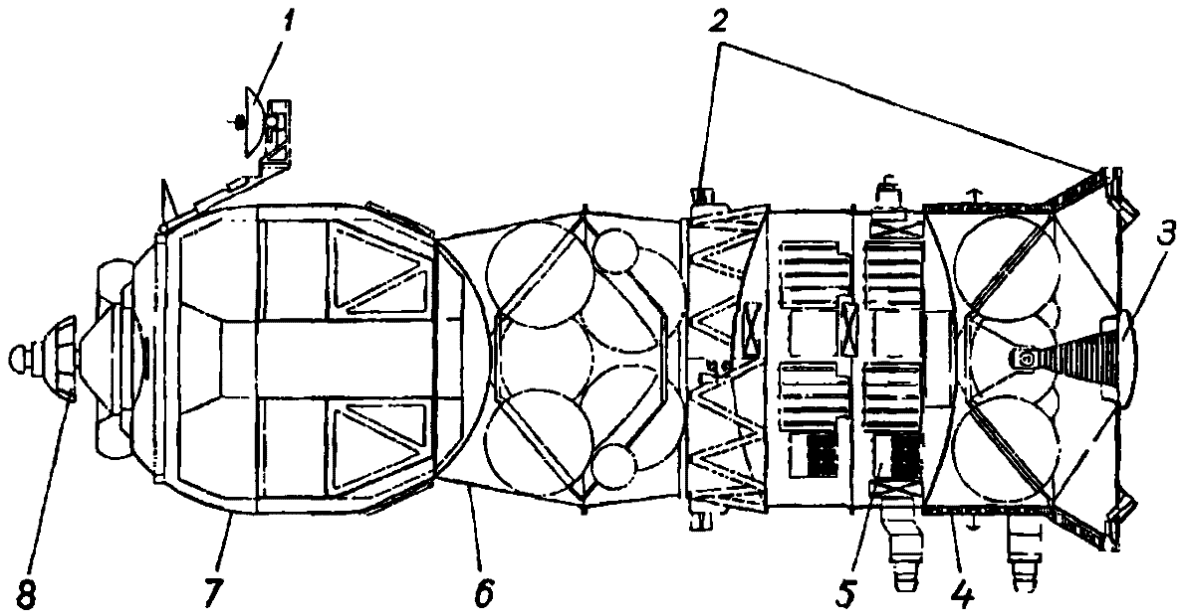


Рисунок 1. Грузовой космический корабль "Прогресс"

1 – антенна аппаратуры сближения системы "Курс"; 2 – двигатели причаливания и ориентации, 3 – сближающее-корректирующий двигатель; 4 – приборно-агрегатный отсек; 5 – аппаратура комплекса бортовых систем; 6 – отсек компонентов дозаправки; 7 – грузовой отсек; 8 – стыковочный агрегат с переходным люком.

Имеются сторонники подобного порядка вещей. Поскольку в космосе в настоящее время находится в больших количествах космический мусор – обтекатели и детали третьих ступеней, отработавшие спутники – такой подход выглядит правильным с точки зрения космической экологии. Сейчас экономически целесообразно его уничтожать, а не перерабатывать.

По причине высокой стоимости¹ массы, доставленной в космос, каждый килограмм полезного груза должен давать максимальную отдачу, быть как можно идеальнее. Это идет в разрез с добровольным списанием аппарата, который проработал на орбите только 1 месяц.

Для приближения к идеалу, необходимо, чтобы все до единой части грузового корабля на протяжении всего времени работы выполняли полезные функции. Нельзя, чтобы прибор из системы управления только выдавал нужные сигналы, а потом выбрасывался. Это было бы возможно, если бы он был копеечным. Однако за долгие годы он так и остался существенной частью массы корабля. Любой вывод груза на орбиту должен приводить к его использованию и не приводить к появлению мусора.

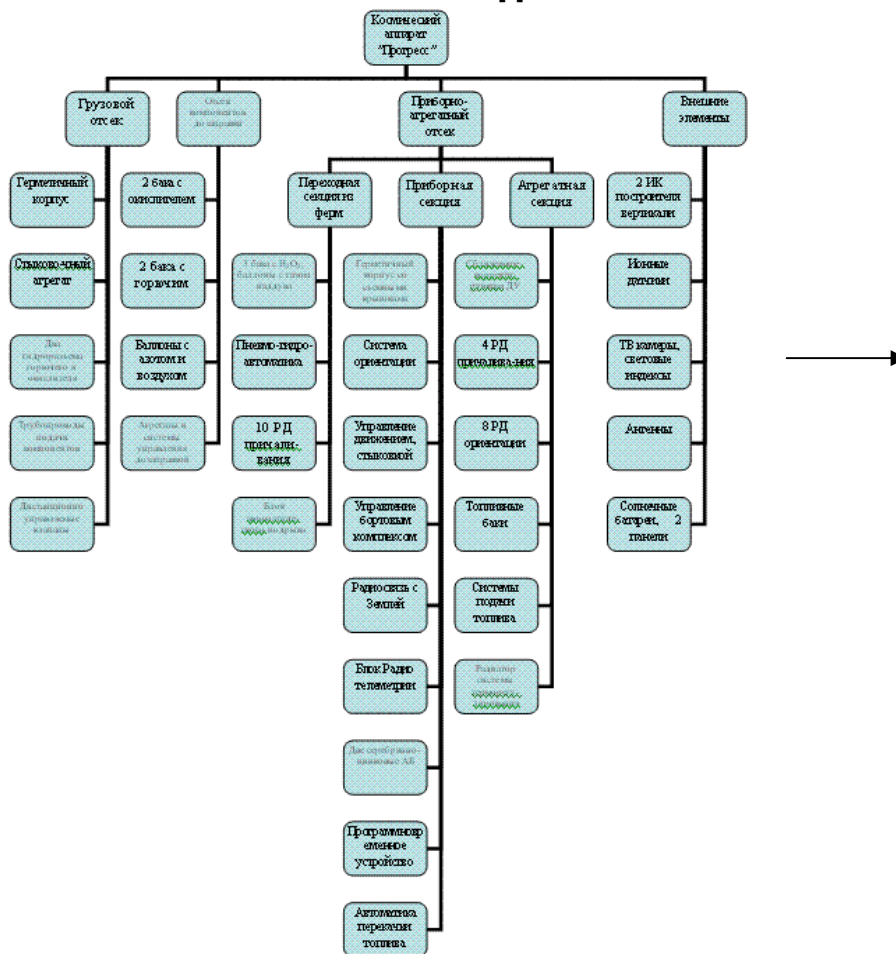
¹ Стоимость доставки 1 кг зависит от высоты орбиты, типа ракеты носителя, места старта и т. д. Для ГКК «Прогресс» от 14 тыс. долларов США.

Если посмотреть на развитие космической отрасли, то можно отметить следующее: из двух способов повышения идеальности, для космических систем в основном используется первый – снижение затрат. При этом, если имеет место повышение суммы функций, то как правило, за счет надсистемных ресурсов.

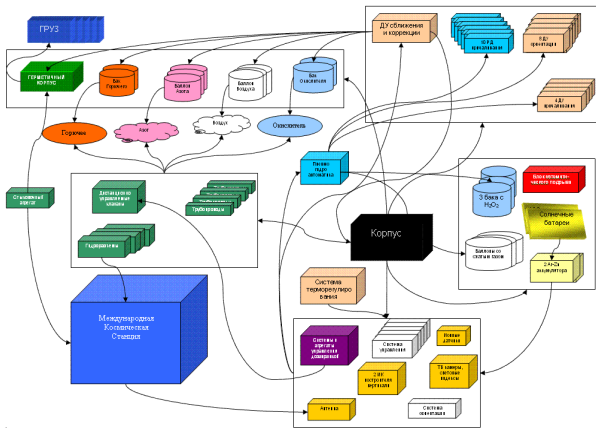
Для того, чтобы повысить идеальность под этим мы подразумеваем повышение выполнения функций – количества и качества - и/или снижение затрат (функция выполняется, а устройства нет) необходимо пойти одним из следующих путей:

- Сделать так, чтобы вспомогательные или вредные функции стали полезными
- Убрать носитель вредного действия
- Убрать объект вредного действия
- Изменение в над- (под-)системе делающее ненужным выполнение функции или ее автоматическое выполнение. (свёртывание и развертывание на другом уровне)

Компонентная модель



Функциональная модель



Функционально-идеальная модель

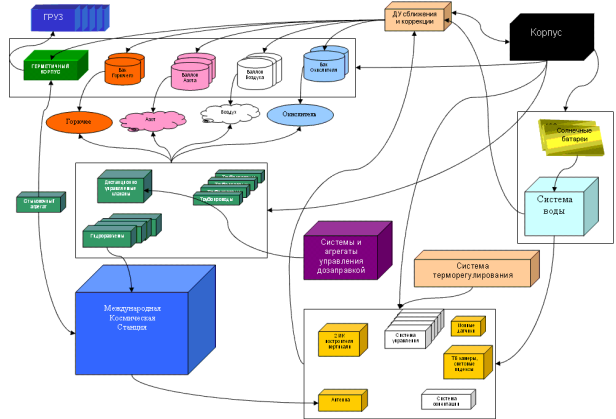


Рисунок 2. Последовательность моделирования

В рамках анализа (рис. 2) была составлена функциональная схема аппарата и проведено функционально-идеальное моделирование. Этот шаг – приближение к идеальному грузовому космическому кораблю (ГКК), который выполняет только те функции, для которых он создан: перемещать груз, удерживать груз, удерживать воздух, удерживать и перемещать мусор. В результате анализа получены следующие выводы: в аппарате имеются ресурсы для свертывания, и в рамках модели они выглядят реализуемо, однако дают лишь небольшое локальное преимущество, которое с учетом надсистемных ограничений пока неприемлемо. Дело в том, что для перехода на применение нового, следующего поколения серийной системы, работающей в космосе, необходимо накопление некоторой "критической массы" отсталости. Тогда сразу разрабатывается аппарат следующего поколения, учитывающий все нововведения, и успешно вытесняющий "старый". К сожалению, разрабатываемый Европейским космическим агентством грузовой корабль ATV является хоть и шагом вперед по размеру, но остается по концепции в старом поколении.

Характеристики грузовых кораблей

«Прогресс»	«ATV» (по данным проекта)
1. Максимальная масса – 7 тонн	1. Максимальная масса – 20.7 тонн
2. Полезный груз: 1.3 тонны – сухой груз 1 тонна – компоненты дозаправки до 1 тонны – топливо для корректирующего двигателя	2. Полезный груз: 5.5 + 0.84 тонн – сухой груз + вода 0.96 тонн – компоненты дозаправки до 4.7 тонн – топливо для корректирующего двигателя

3. Работа в составе орбитальной станции – 1-3 месяца	3. Работа в составе орбитальной станции – 6 месяцев
4. Полеты каждые 3-4 месяца	4. Полеты каждые 15 месяцев
5. 112 полетов с 1978 года	5. Первый полет запланирован на начало 2008 года
6. Стоимость корабля - \$24 млн. (+ 22 млн. запуск ракеты носителя)	6. Ожидаемая серийная стоимость корабля - \$140 млн.
7. Сухая масса – 3.7 тонн	7. Сухая масса – 8.7 тонн

Другой понятной тенденцией, накладывающей определенные ограничения, является предпочтительное применение для вспомогательных систем отработанных технологий. Это можно объяснить с точки зрения закона опережающего развития рабочего органа. Именно в рабочем органе заключаются ключевые противоречия, которые тормозят развитие системы. Кроме того, он в реальном выражении дороже, чем второстепенные системы. Поэтому если в рассмотрение идеальности ввести фактор надежности, становится понятно, как переход к более функциональной или менее затратной системе может снизить общую идеальность. Попытки улучшить второстепенные системы могут либо дать небольшой плюс по идеальности, либо, из-за ограничений по надежности, сильно ухудшить качество системы.

Двинемся теперь в ином направлении. Одним из недостатков функционально-идеального моделирования является возможность свернуть элемент, который содержит в себе ресурс для развития системы в целом. Не будем отбрасывать слабо функциональные элементы, а наоборот, постараемся превратить их в полезный груз, сохранив за ними их вспомогательные функции. В таком случае ИКР можно сформулировать следующим образом: корабль сам меняется (меняет физические, химические, электромагнитные, геометрические свойства) так, что становится возможным его дальнейшее применение на орбите. В частности, корабль сам разбирается и сам соединяется на орбите в нужную конструкцию. Такое свойство можно назвать интеллектуальной конструкцией, умной компоновкой, хотя большинству из присутствующих будет понятней одно слово – трансформе.

Для преодоления психологической инерции и определения целей трансформации, усугубим ситуацию и рассмотрим 100 аппаратов "Прогресс" оставшихся на орбите, несмотря на сложности с сохранением на заданной высоте, и возможные манипуляции с ними. Какие ресурсы у нас есть?

Солнечные батареи одного аппарата имеют площадь 12 м². Для 100 аппаратов имеем суммарную площадь 1200 м². Для сравнения, площадь

солнечных батарей международной космической станции (МКС) составляет 842 м². Напрашивается идея снять солнечные батареи с "Прогресса" и установить на орбитальной станции. Здесь стоит отметить, что для этого потребуется установить на ГКК более долговечные солнечные батареи, менее склонные к деградации и имеющие более высокий КПД (~30% для арсенид-галлиевых батарей против 12% для кремниевых).

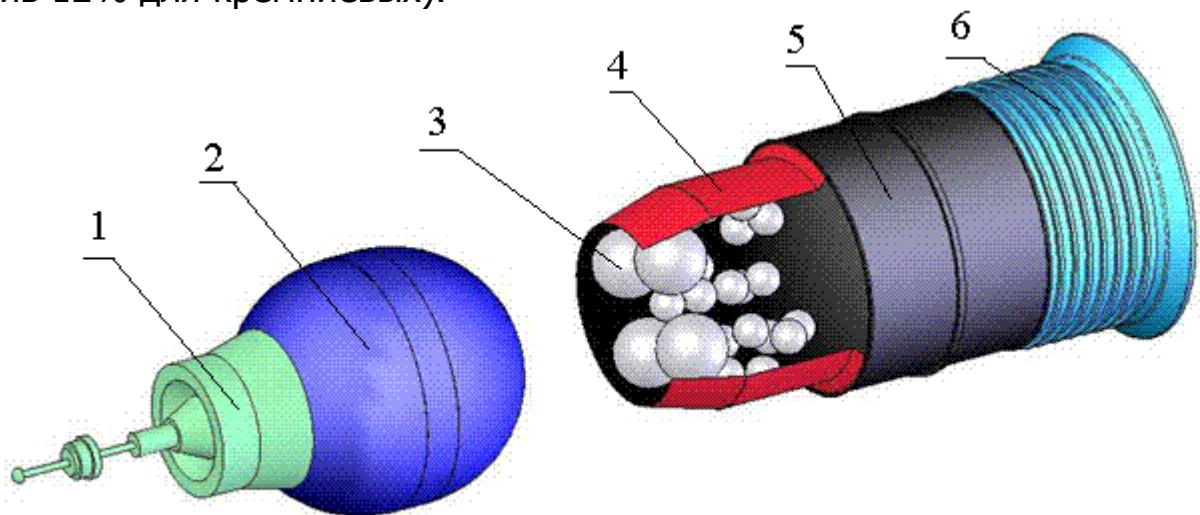


Рисунок 3. Расположение баков и баллонов в аппарате

1 – стыковочный агрегат, 2 – герметичный отсек, 3 – баки и баллоны из-под компонентов дозаправки, 4 – отсек компонентов дозаправки, 5 – приборный отсек, 6 – агрегатный отсек.

Герметичный грузовой отсек, как и два десятка баков и баллонов (рис. 3) можно использовать как емкость для хранения жидкости или газа. 100 грузовых отсеков объемом по 6.6 м³ дадут 660 м³ полезного объема. Следствием этой идеи является тот факт, что отстыковываться от орбитальной станцией ГКК уже не надо. В этом случае нужен не агрегат стыковки-расстыки, а другой, позволяющий сразу по прилете капитально "присоединиться" к орбитальной станции.

В дополнение к приварке ГКК к станции можно сказать, что продолжительность совместного полета аппарата и МКС увеличивается. Так, для европейского грузовика ATV этот срок составляет уже 6 месяцев. При этом обитаемый объем составляет уже 45 м³, что является существенной прибавкой к станции.

Размеры достаточно велики и позволяют проводить в нем работы по демонтажу/разбору грузовика, его обслуживанию. Баки-баллоны должны быть в этом отсеке, чтобы с ними было удобно работать, и их там быть не должно, для того чтобы там был груз. Если заранее предусмотреть их съем, то осуществимо их дальнейшее применение.

Негерметичный корпус можно использовать для создания силовых конструкций. Скрепляя корпуса под углом 14.2° , из 50 секций получим тор диаметром 75 метров. Он напоминает нечто придуманное еще К. Циолковским и Ф. Цандером.

Можно поступать иначе, разрезая корпус на элементы, которые могут соединяться в другую конструкцию. В перспективе корпус сам распадается на части – вспомните про устройство самоуничтожения – части сами присоединяются к станции, развивая ее, или создавая новую конструкцию.

Идея получения кольцевых фрагментов наиболее наглядна, реально же нужно воспользоваться более “продвинутыми” геометрическими эффектами.

Взрывчатое вещество можно использовать для проведения экспериментов в космосе, связанных с механикой, прочностью. Из 100 блоков взрывчатого вещества может быть изготовлено изделие для исследования разнообразных явлений, связанных со взрывом. Также взрывчатое вещество может применяться для коррекции траектории летящих на станцию крупных обломков².

В результате проведенного анализа появился **обобщенный вывод**: *необходимо, чтобы весь ГКК, включая детали корпуса, грузовой отсек и прочее, также являлся полезным грузом. Чтобы 100% выводимого на орбиту веса там оставалось и использовалось.*

Такое отношение к ГКК потребует серьезного пересмотра всей сегодняшней концепции. Что собственно и необходимо для формулирования требований к кораблю нового поколения.

Это значит, что аппарат должен быть изготовлен из нужного на орбите материала, иметь требуемую форму, свойства. В космосе есть потребность в замене выходящих из строя приборах, элементах конструкции для орбитальных “поделок”, источниках энергии, компонентах топлива для двигателей. Возможный вариант – использование для конструктивных элементов вместо металла полезных грузов: продуктов питания, компонентов твердого топлива и т.п.³

Главной помехой для сегодняшних разработчиков кораблей станет психологическая инерция. В настоящее время ГКК – монолитная конструкция, неделимая на элементарные части. Для начала предложим в качестве первого и очевидного шага на пути к идеальности – повышение степени динамичности. Несмотря на то, что аппарат состоит

² Станция достаточно часто вынуждена корректировать орбиту, поскольку за год набирается несколько объектов мусора грозящих столкновением.

³ В научно технической фантастике вполне распространенное дело. Читайте Г.Альтов «Создан для бури»

из большого числа составных частей, он имеет низкую степень динамичности. Применяв прием дробление, а также приняв меры по согласованию этих отдельных частей – их можно разбирать и собирать в другом сочетании.

Что если заранее проектировать весь комплекс таким образом, чтобы те или иные элементы грузовика занимали в будущей станции определенную нишу, выполняли полезные функции. В основном это могут быть конструкции корпуса, емкости, двигатели, – детали, способные непосредственно представлять собой соответствующие конструкции станции. Все это позволит снизить стоимость развертывания объектов на орбите. Подобный модульный принцип – закономерная тенденция развития техники.

Одним из примеров применения модулей является персональный компьютер. Он строится из отдельных узлов с полной взаимозаменяемостью. Только после появления так называемой “открытой архитектуры” компьютер стал таким распространенным.

Отдельные узлы и агрегаты грузовика и станции должны подходить друг к другу (согласование) и являться взаимозаменяемыми модулями. Поскольку на аппарате все будет построено из набора нескольких базовых одинаковых модулей⁴, его надежность возрастет, так как создать один раз надежный, совершенный модуль и использовать его везде проще, чем каждый раз биться за надежность нового объекта. Учет этого на раннем этапе проектирования космических конструкций позволит в дальнейшем экономить значительные средства.

Если будет использовано применение самого ГКК, как 100% прилетевшего груза, то возможно более выгодно станет не стыковаться к станции, а залететь в герметизируемый отсек (ангар), в котором потом будут произведены все работы с кораблем.

Теперь по поводу утилизации мусора с корабля. Для его вывоза нужен контейнер. Контейнер – мертвый груз. по ИКР необходимо, чтобы 100% того, что выбрасывается, являлось мусором. То есть, чтобы мусор удерживал сам себя, тормозился и сгорал в атмосфере.

Особенность орбитальных объектов – все, что туда доставляется, должно выполнять свою основную целевую функцию от начала и до конца и быть способно к дополнительным функциям. То есть имеющийся в настоящее время цикл далек от идеала. Идеал в нашем случае – это система, которая не дает отходов, либо использует отходы так, что они образуют собственный цикл, оборот, поток.

⁴ Как серьезно достижение, существенно облегчающее ремонт, подавалось СМИ применение на американском аппарате «Хаббл» гаек одного типоразмера.

Для определения требований к ГКК следующего поколения важно будет посмотреть, ориентируясь на надсистему, на потребности космонавтики.

По мере наращивания потенциала МКС может использоваться, в том числе, в качестве:

- транспортного узла для размещения, сборки, подготовки и отправки по назначению полезных грузов и транспортных средств;
- служебного комплекса, обеспечивающего обслуживание, ремонт, пополнение и переоборудование полезных грузов и транспортных средств;
- сборочного комплекса, обеспечивающего сборку и отладку крупногабаритных космических конструкций и систем.

МКС изначально приписывалась функция сборочного комплекса, узла размещения, системы переоборудования. То есть, уже сейчас есть возможность начать отработку подобных действий на МКС. Первые шаги по внедрению технологий, которые ждут нас в уже не столь отдаленном будущем, нужно начинать сейчас. Это вдвойне справедливо в отношении кораблей "Прогресс", которые в большом количестве к нашим услугам. Для поддержания аппаратов на орбите предлагаем использовать энергию Солнца.

Обратимся к проекту "солнечной энергетической установки для производства ракетного топлива и кислорода из воды в космических условиях". В нем указывается, что "газообразные компоненты ракетного топлива, вырабатываемые в солнечной энергоустановке даже при высоком давлении, имеют небольшую плотность. Для накопления и хранения газообразного топлива необходимы баллоны большого объема, которые занимают много места и имеют значительную массу. Поэтому Солнечная Водяная Двигательная Установка (СВДУ) может эффективно работать только в импульсном режиме"⁵.

⁵ Известия Академии Наук. Энергетика. №1, 2006 г. стр. 70

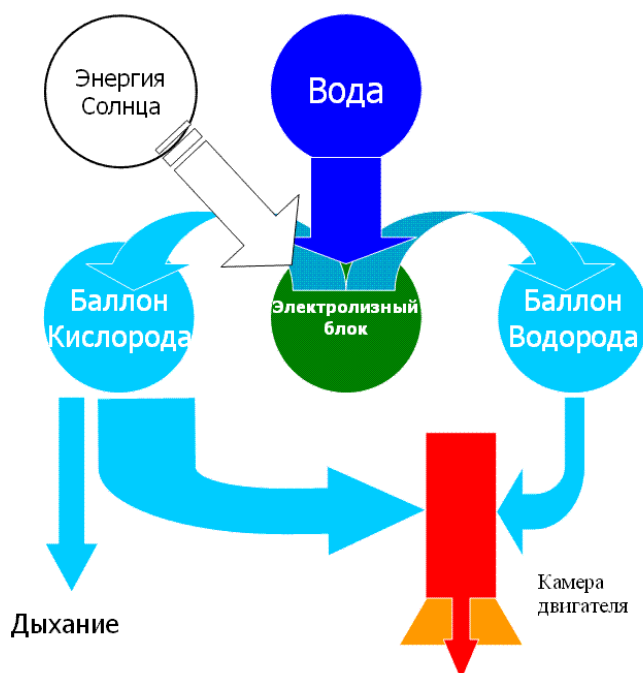


Рисунок 4. Принцип работы Солнечной Водяной Двигательной Установки

Импульсность нам не помеха, а вот накопление газов как раз и возможно в баках «Прогрессов».

Для этого на орбиту необходимо доставлять дополнительную воду и электрохимический генератор и получать водород и кислород. Солнечные батареи, как мы помним, уже есть. Да, мы вводим в систему новый элемент, но он сразу начинает выполнять 2 функции – аккумуляция солнечной энергии и резервный источник кислорода для дыхания. Водород и кислород используются для питания основной двигательной установки.

Возможна также организация поставки вторичной воды, как продукта жизнедеятельности членов экипажа. Сейчас вода очищается и используется для технических целей. Здесь же принципиально возможна и утилизация углекислого газа, других органических отходов, как исходных компонентов для синтеза органического горючего. Технология реализуемая без проблем, было бы достаточное количество сырья.

При наличии запасов воды, необходимо разработать способ крепления герметичного отсека и баков/баллонов грузовика на МКС, а также разъемов стыковки всех емкостей к соответствующим трактам СВДУ. Теперь газ будет накапливаться в баках, баллонах и герметичном грузовом отсеке⁶. Воду возить технологичнее и проще, чем компоненты

⁶ В условиях околоземного пространства газообразное кислород-водородное топливо в герметичных баках может храниться без потерь неограниченное время. Температурный режим космоса также способствует их сжижению.

топлива. Более того, вода в замороженном виде может транспортироваться без применения прочных баков.

Полученная двигательная установка, используемая для коррекции орбиты станции и улучшения жизнеобеспечения, станет существенным шагом по повышению ее автономности и позволит со временем отказаться от применения тяжелых аккумуляторных батарей. А между тем они составляют немалую долю в объеме поставок грузов на орбиту.

Таким образом, на корабле "Прогресс" есть возможность провести летные испытания СВДУ. При этом задействуются штатные солнечные батареи и баллоны аппарата после откачки их содержимого на МКС. Также возможно создание модификации грузового корабля с заменой нынешней двигательной установки на СВДУ.

Освободившееся место из-под баков и баллонов в отсеке компонентов дозаправки может быть заполнено мусором для его вывоза упрощенным образом в негерметичном отсеке (рис. 5). Герметичный отсек, солнечные батареи и прочее используется на орбитальной станции.

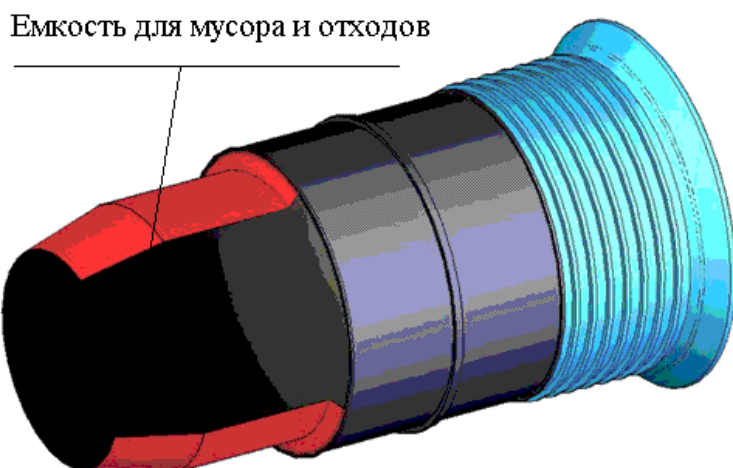


Рисунок 5. Возможная схема размещения в спускаемом аппарате мусора

При анализе работы ГКК "Прогресс" выяснилось, что его двигательная установка в отличие от ракеты-носителя, и система управления и ориентации начинают работать только по достижении носителем низкой орбиты. Из этого следует, что необходимо располагать это оборудование в космосе и не возить постоянно с собой. На орбиту же запускать только трансформируемый контейнер с грузом. За счет того, что груз теперь составляет большую часть от полезной нагрузки ракеты (груз + контейнер, а не груз + "Прогресс")⁷, будет достигнута

⁷ Для сравнения: "Прогресс", который доставляет на МКС 2.3 т полезного груза, требует 4.7 т на все остальное. При этом масса приборно-агрегатного отсека составляет 2.8 т. Если он будет базироваться в космосе, то "мертвый" груз снизится до максимум 1.9 т, что соответствует суммарной массе грузового отсека и отсека компонентов дозаправки.

почти двукратная экономия. Естественно такой выигрыш не остается незамеченным и более детально разрабатывается специалистами.

Возможным средством реализации этого подхода является проект "Паром". Он представляет собой часть системы, включающей орбитальные средства, космический корабль и другие аппараты, которые предлагаются для реализации Лунной программы. В 2006 году этот проект был отклонен Роскосмосом и практически не финансировался. Дело в том, что введение дополнительной операции промежуточной стыковки приводит к дополнительным затратам массы и снижению функциональной надежности. С другой стороны, вырастут и затраты на дозаправку самого буксира "Паром". Но сама схема перспективная, и разрешение названных выше противоречий сможет привести к ее успешной реализации. Разрешение вышеуказанных противоречий выходит за рамки настоящей статьи и будет описано авторами позже и в других публикациях.

Полученные в работе идеи сведены в таблицу 1:

Таблица 1 Грузовой космический корабль «Прогресс»

Идеи и концепции	Реализуемость	Экономичность
Применять съемные солнечные батареи, аккумуляторы	высокая	бесплатная « доставка»
Применять взрывчатое вещество для целей исследований или изменения траекторий космических объектов (т.е. как источник энергии)	высокая	бесплатная « доставка»
Применять взрывчатое вещество для изменения конструкции космических объектов (т.е. трансформации)	высокая	бесплатная « доставка»
Модульный принцип узлов ГКК и станции	высокая	бесплатная «доставка» затраты на разработку
Выполнить герметичную секцию и баки съемными и заполнять их продуктами разложения воды за счет энергии Солнца	принципиально осуществимо	приемлемые затраты
Использовать для элементов конструкции будущие компоненты твердого топлива,	принципиально осуществимо	приемлемые затраты

продуктов питания, полезных грузов		
Для сброса мусора использовать часть корабля, остающуюся после разгрузки и отстыковки герметичного корпуса и баков	принципиально осуществимо	приемлемые затраты
Разнесение в пространстве той подсистемы, что удерживает груз, и той, которая его перемещает. Двигатель, систему управления и все, что не связано с удержанием груза базировать в космосе	проблематична	высокие расходы на проектирование, опытные образцы

Причиной того, что ГКК "Прогресс" без радикальных изменений эксплуатируется почти 30 лет, является тот факт, что затраты на его эксплуатацию в цикле работы надсистемы (орбитальная станция, груз, экология) составляют малую долю от затрат на другие элементы надсистемы. Стоимость запуска всей ракеты-носителя вместе с ГКК стоит обычно на порядок меньше выводимого ею груза. Поэтому, учитывая безотказную работу, нет стимула для серьезного изменения существующей системы.

Описанные выше способы совершенствования грузовых систем найдут свое применение только когда затраты на них станут более ощутимыми. Это произойдет после повышения грузопотока на орбиту, который может быть связан с Лунной или Марсианской программой, либо созданием более крупных орбитальных станций, увеличения количества туристов, появления космических производств.

Подводя итог сказанному выше, можно сделать следующий прогноз развития грузовых космических кораблей:

1. Переход на проект "Паром" произойдет, как только появятся грузопотоки, соответствующие его эффективному использованию. К этому моменту должна быть исчерпаны ресурсы по повышению грузоподъемности ГКК на основе существующего принципа действия.

2. Будут опробованы экспериментальные СВДУ и применены на орбитальной станции.

3. Будут опробована технология сборки конструкций в космосе.

4. Все более разнообразные сборочные операции с космическими кораблями и аппаратами будет проводиться в космосе, вплоть до сборки корабля-станции на Марс.

5. Диапазон грузов, который поставляется на орбиту– источники энергии, топливо, технические газы, воздух, аккумуляторы энергии, пищу и воду дополнится экспериментальными установками, позволяющими осуществлять технологии космической трансформации.

6. Будут совершенствоваться способы доставки воды на орбиту в массовых количествах. Поставка воды станет дешевле.

Литература

1. Гуцин В.Н. Основы устройства космических аппаратов. Москва, "Машиностроение", 2003 год. 272 стр.

2. Селюцкий А.Б. Правила игры без правил. Техника-Молодежь-Творчество. Петрозаводск, 1989г. 280 стр.

3. Известия Академии Наук. Энергетика. №1, Москва, 2006 г. 180 стр.

4. Космонавтика: Энциклопедия. Гл. ред. Глушко В.П. Москва, Советская Энциклопедия, 1985. 528 стр.