

## Три аспекта создания частично-многоразовых ракет-носителей

The three aspects of creating of the partially-reusable launch vehicles

doi 10.26310/2071-3010.2020.263.9.004

**И. В. Вагнер,**

магистр техники и технологии/летчик-космонавт,  
 Центр подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина,  
 Звездный городок  
 ✉ rk-voenmeh@yandex.ru

**I. V. Vagner**

master of engineering and technology/pilot-  
 cosmonaut, Yu. A. Gagarin research and test  
 cosmonaut training center

**А. А. Дмитриева,**

инженер-системотехник  
 ✉ rk-voenmeh@yandex.ru

**A. A. Dmitrieva,**

system engineer

**М. Н. Охочинский,**

доцент, кафедра «Ракетостроение», ученый  
 секретарь, член-корреспондент Российской  
 академии космонавтики им. К. Э. Циолковского  
 (РАКЦ), лауреат премии Правительства  
 Санкт-Петербурга в области образования  
 ✉ mno1955@yandex.ru

**M. N. Ohochinsky,**

associate professor, department «Rocketry»,  
 academic secretary, member-correspondent  
 of the Russian academy of cosmonautics  
 n. a. K. E. Tsiolkovsky (RACTs), laureate  
 of the St.-Petersburg government education prize

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург  
 Baltic state technical university «Voenmeh» named after D. F. Ustinov

Рассматриваются три основных аспекта создания частично-многоразовых ракет-носителей — концептуальный, технический, экономический. Предлагается возможный подход к оценке экономической целесообразности разработки транспортных космических систем повторного использования.

Three main aspects of creating partially-reusable launch vehicles are considered: conceptual, technical, and economic. A possible approach to assessing the economic feasibility of developing of reused space transport systems is proposed.

**Ключевые слова:** ракета-носитель, частично-многоразовая система, техническая возможность, экономическая целесообразность, суммарные затраты, программа запусков.

**Keywords:** launch vehicle, partially-reusable system, technical capability, economic feasibility, total costs, launch program.

2020 г. можно смело охарактеризовать как время ожесточенных дискуссий по поводу целесообразности создания и применения многоразовых транспортных космических систем (ТКС).

В преддверии Дня космонавтики генеральный директор госкорпорации «Роскосмос» Д. О. Rogozin высказался по поводу демпинга со стороны компании Илона Маска «SpaceX» (США). Он заметил, что рыночная стоимость пуска ракеты-носителя (РН) «...«Falcon 9» составляет около \$60 млн, но NASA платит за него в полтора, а иногда — в четыре раза больше...» [1]. В ответ Илон Маск написал в Твиттере, что ракеты разработки «SpaceX» «...многоразовые на 80%, а российские — на 0%» [1].

В последовавшем за этим большим интервью радио «Комсомольская правда» Д. О. Rogozin заявил, что реальные экономические показатели «SpaceX» неизвестны, поскольку их: «...тщательно скрывают, и понятно почему. «Falcon-9» в нынешней ее версии — это ракета тяжелого класса. При пуске с возвратом ступени половина топлива уходит на то, чтобы вернуть эту ступень на Землю. То есть, реально ракета, которая может вывести больше 20 тонн полезной нагрузки, вы-

водит примерно в два раза меньше... Тема до сих пор спорная, вызывает много вопросов, на которые Илон Маск ответы давать не собирается. В том числе и на наш вопрос, каков объем господдержки, фактически — дотации за каждый пуск «Falcon»?» [2].

Эксперты российской компании «Главкосмос», ставящей своими основными задачами продвижение достижений российской космической отрасли на мировом рынке, отметили, что многоразовые ракеты Маска позиционируются дешевле своей реальной стоимости, поскольку их полностью оплачивает заказчик — NASA или Минобороны США. Использование таких РН, подчеркнули эксперты, «...по состоянию дел на сегодня, с экономической точки зрения оправдывает себя только в случае наличия «якорного» заказчика пусковых услуг на внутреннем рынке (в случае SpaceX это NASA и ВВС США), готового заплатить максимальную или полную стоимость за матчасть ракеты-носителя, часть из которой потом будет повторно использована в рамках коммерческих пусковых услуг на внешнем рынке...» [1].

Эта довольно резкая полемика еще раз показывает, что вопрос создания многократно используемых

ТКС и оценки целесообразности их применения уже давно стоит на повестке дня и является острым и актуальным.

На наш взгляд, целесообразно выделить три главных аспекта создания таких ТКС, которые условно можно обозначить, как «концептуальный», «технический» и «экономический».

### Концептуальный аспект

Под концептуальным аспектом следует понимать общую убежденность в том, что неоднократное использование элементов ТКС способно дать экономический эффект, существенно снизив стоимость их эксплуатации. Иначе говоря, развитие таких систем должно идти по пути создания «ракет многократного использования», как в 1975 г. и была озаглавлена первая отечественная книжная публикация на эту тему [3].

На наш взгляд, более точным является термин «ракета-носитель частично-многократного использования», введенный в работе [4]: «... средство выведения, служащее для доставки полезной нагрузки на околоземную орбиту, в структуру которого входят конструктивные элементы, предназначенные для неоднократного (как минимум — двукратного) целевого использования». Подразумевается, что при этом выполняются вполне определенные условия:

- структурные элементы РН должны быть приспособлены для повторного использования конструктивно;
- возвращаемые элементы должны быть доставлены на Землю в состоянии, допускающем повторное использование.

Формированию концепции частично-многократных РН способствовало и то, что в короткий срок с момента начала космической эры интенсивное соперничество ведущих космических держав привело к достаточно высокому конструктивному совершенству одноразовых РН. А это, в свою очередь, резко уменьшило возможности снижения пусковых затрат путем модернизации традиционных конструкций. И здесь аналогии с транспортными средствами земного назначения привели к идее уменьшения затрат путем неоднократного применения РН в целом (или отдельных структурных элементов ее конструкции), ведь их стоимость — главная составляющая стоимости всего запуска.

К середине 1960-х гг. полностью сформировалась концепция создания таких средств выведения, сформулированная следующим образом [5]: «...многократное использование космических аппаратов станет обычным в пилотируемых системах космического транспорта. ...С уверенностью можно сказать, что стоимость перевозки космического груза составит не более 20 долларов за 1 кг, то есть мы будем иметь экономически выгодные системы перевозок в космическом пространстве...». С этого момента работы в области создания многократных средств выведения, оставаясь по большей части чисто теоретическими изысканиями, велись по двум основным направлениям [3]:

- оценка возможности возвращения на Землю ступени РН с помощью установки на них несущих

аэродинамических поверхностей и воздушно-реактивных двигателей и последующей посадки по «самолетной схеме»;

- оценка возможностей пуска РН малой грузоподъемности с борта транспортных самолетов-носителей.

Главную сложность в реализации уже сформированной концепции представляли уникальные режимы эксплуатации ракетно-космической техники, что касается и средств выведения, и космических летательных аппаратов. Достаточно упомянуть высокие перегрузки, нагрев и вибрацию при выведении и возвращении с орбиты, а при космическом полете — вакуум, радиационное воздействие и знакопеременные температурные нагрузки. Высокие коэффициенты запаса прочности, вполне допустимые в наземных транспортных средствах, в системах космического назначения приводили к резкому снижению конструктивного совершенства, делая такие объекты практически неприменимыми по их целевому назначению.

Поэтому достаточно долго концепция частично-многократных ТКС оставалась лишь теорией, которая, возможно, будет реализована в будущем.

### Технический аспект

О техническом аспекте создания частично-многократных систем, именно о технической возможности реализовать проработанные теоретические идеи, стало возможно говорить с начала 1970-х гг.

Во-первых, к этому времени удалось поднять относительную массу полезного груза, выводимого РН традиционной одноразовой схемы, с 2 до 4%. Здесь сыграли свою роль работы по совершенствованию конструкции жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), что привело к определенному росту удельного импульса. Можно сказать, появился своеобразный резерв массы конструкции РН, который можно было использовать для возвращаемых и в связи с этим обладавших большей массой элементов конструкции, не снижая ранее достигнутой грузоподъемности.

Во-вторых, в результате накопленного опыта появилась возможность создания элементов конструкции РН с повышенным ресурсом, в частности, наиболее дорогостоящих (двигательных установок, несущих конструкций и т. п.).

Как результат, появилась именно техническая возможность, в течение десяти лет реализованная в создании, испытании и введении в долговременную эксплуатацию первого многократного транспортного космического корабля (МТКК) «Space Shuttle» (США). Подчеркнем, основная идея применения МТКК заключалась в существенном уменьшении стоимости вывода на орбиту килограмма полезной нагрузки (далее — показатель СВКПН) неоднократным использованием наиболее дорогостоящих структурных элементов средства выведения.

Однако планировавшиеся результаты достигнуты не были: проектировщики изначально ориентировались на финансовые оценки, недостаточно точные из-за отсутствия адекватных моделей стоимости многократных средств выведения.

Уже первые годы эксплуатации МТКК (начиная с 1981 г.) показали, что запланированное снижение показателя СВКПН может быть достигнуто только в случае, если суммарное число запусков корабля составит не менее 30-40 в год, при его полной загрузке (до 24 т). В год это составило бы около 800 т высокотехнологичного полезного груза, доставляемого на орбиту, что было исключено при существовавшем тогда (и, кстати, сегодня) уровне развития космических исследований. Реальные показатели оказались несоизмеримо ниже — всего 1200 т за 30 лет эксплуатации МТКК при суммарных затратах в \$199 млрд (в ценах 2010 г.) [6].

В итоге общее число проведенных запусков МТКК составило лишь треть от заявленного изначально (что само по себе было существенно меньше упомянутых 30-40 ежегодных полетов). А две катастрофы 1986 и 2003 гг., в которых погибло 14 человек, существенно увеличили полную стоимость проекта из-за необходимых доработок и доводочных испытаний. И, как результат, показатель СВКПН при использовании МТКК практически не снизился, а программа «Space Shuttle» была свернута.

Таким образом, итогом этого длительного проекта стало создание и эксплуатация космического пилотируемого аппарата, не обладавшего необходимой надежностью и отличавшегося рядом принципиальных недостатков [7]:

- стоимость полного цикла операций по приведению в работоспособное состояние повторно используемых элементов системы выведения (помимо орбитального корабля), в частности, твердотопливных ускорителей, составляла не менее половины стоимости изготовления нового изделия;
- ЖРД основной двигательной установки орбитального корабля после каждого полета проходили длительный цикл испытаний и ремонтно-восстановительных работ; при этом требовался дополнительный резерв двигателей для их замены в случае невозможности обеспечения требуемого ресурса (поэтому для 5 введенных в эксплуатацию МТКК было изготовлено по 10 таких резервных установок);
- топливный бак, содержащий весь запас топлива, необходимого для выхода на орбиту, и посадочные шасси орбитального корабля являлись одноразовыми конструкциями;
- элементы наружной теплозащиты МТКК после каждого полета требовали длительного восстановления.

Таким образом, эффективность МТКК за три десятилетия его эксплуатации подтверждена не была, скорее, появились вполне обоснованные сомнения в экономической целесообразности многоразовых ТКС.

Другой «частично-многоразовой» разработкой является реализуемая с 2005 г. программа корпорации Илона Маска «SpaceX». Выполняемый корпорацией проект РН «Falcon-9» ориентирован на:

- создание РН с возвращаемой на Землю изначально первой, а затем и второй ступенями;
- запуски РН, в состав которых будут входить ракетные блоки (ступени), уже использованные в полетах и возвращенные на Землю, причем запуски неоднократные;
- существенное снижения показателя СВКПН — как результат постоянной доработки конструкции частично-многоразовых РН;
- полную отработку конструкции частично-многоразовых РН с максимально возможным числом повторно применяемых элементов.

В реализованном на сегодняшний день варианте РН «Falcon-9» ее частично-многоразовая первая ступень совершает управляемую посадку, выполняя при этом неоднократное включение/выключение двигателей основной ДУ (включает 9 ЖРД «Merlin 1D», использующих в качестве компонентов топлива жидкий кислород и керосин). Это требует достаточного запаса топлива, остающегося в баках ступени после окончания ее работы в составе средства выведения и отделения.

В настоящее время отработаны и штатно используются два варианта возвращения первой ступени на Землю:

- посадка производится в акватории Мирового океана на специально созданную посадочную морскую платформу размером 90×50 м;
- посадка производится на сушу в непосредственной близости от производственного комплекса SpaceX на мысе Канаверал (Флорида), на площадку, оборудованную для этого на территории базы ВВС США.

С момента начала летных испытаний РН «Falcon-9» (первый пуск — 4 июня 2010 г.) по 20 июля 2020 г. выполнено уже 89 запусков носителя, в ряде случаев — в режиме одноразового средства выведения, в других — с различными вариантами возвращения первой ступени, в ряде случаев используемой повторно (см. табл. 1).

Таким образом, в настоящий момент идет опытная эксплуатация РН «Falcon-9» с частично-многоразовой первой ступенью, и в каждом полете, помимо решения

Таблица 1

Статистика пусков РН «Falcon-9» с 4 июня 2010 г. к 20 июля 2020 г.

№	Возвращение первой ступени	Число запусков (в том числе всего с попыткой возвращения/из них неудачные)
1	Полностью аварийные	1
2	Возвращение ступени не предусматривалось	24
3	Приводнение	7/1
4	Посадка на наземную платформу	14/1
5	Посадка на морскую платформу	43/7
Итого: пусков с попыткой возвращением первой ступени		64/9
Полное число пусков		89

задачи доставки полезной нагрузки на целевую орбиту, проводятся испытания различных систем средства выведения (включая попытки спасения головного отсека-теля). И это, в принципе, дает информацию для анализа технических перспектив носителя и целесообразности дальнейшего применения таких систем.

Добавим, что, помимо реально существующей РН «Falkon-9», сегодня публикуются многочисленные описания проектов многоразовых ТКС (по большей части находящихся на самой начальной стадии разработки, не доходящей даже до уровня технического предложения; см., например, [11, 12]). Благодаря постоянной дискуссии в средствах массовой информации о необходимости создания таких систем создается ощущение, что перед нами — магистральный путь развития ракетно-космической техники, ведь примеры удачной технической реализации вроде бы налицо. Поэтому на первый план выходит третий из упомянутых нами аспектов — экономический.

### Экономический аспект

Говорить об экономической стороне вопроса, в принципе, необходимо было с самого начала формирования концепции или, в крайнем случае, при переходе к ее технической реализации. Но получилось так, что именно этот аспект к настоящему времени оказался наименее исследованным.

В упомянутой нами отечественной монографии, подготовленной на основе зарубежных, в основном — американских публикациях, приводится график затрат на один полет многоразовой ТКС в зависимости от числа таких полетов в течение года [3]. График построен американскими специалистами в период обоснования необходимости постройки МТКК «Space Shuttle». Из графика следует, что средние эксплуатационные расходы должны существенно упасть при удвоении числа полетов (заметим, что дополнительные расходы на подготовку повторного запуска были приняты неизменными от пуска к пуску). Характер приведенной кривой показывает, что исследователи использовали здесь степенную зависимость параметра от числа повторных использований МТКК. При этом информации, на основании каких данных выбирается показатель степени и насколько результат соотносится с реальностью, в [3] и, надо понимать, в использованных автором источниках не приведено. Поэтому полученный график следует считать прогнозом, самым оптимистичным вариантом развития событий. Вариантом, который, как показала практика, не оправдался.

Отечественные публикации последних лет также содержат аналитические зависимости, увязывающие стоимость пуска многоразовых ТКС с числом таких пусков, однако и здесь исследователи вынуждены опираться на информацию, которая является недостаточно достоверной.

Так, например, в работе [13] авторы включают в модель показателя СВКПН такие параметры, как:

- количество пусков ( $n$ );
- коэффициент, учитывающий стоимость послеполетного обслуживания двигательной установки первой ступени ( $b$ ).

Полученные авторами графики демонстрируют значительное снижение стоимости с ростом числа пусков с повторным использованием первой ступени; при этом подразумевается, что коэффициент  $b$  опирается на статистические данные (которые, вероятно, могут быть получены с началом эксплуатации подобных систем).

В работе [14] анализируется влияние ресурса возвращаемой двигательной установки первой ступени на стоимость выведения полезного груза, причем в оценочных формулах также используется статистика послеполетного обслуживания многоразовой двигательной установки.

В работе [15] приводится модель суммарной себестоимости программы запусков полезных грузов на орбиту, где в качестве базовых исходных данных используются стоимости ступеней и их возвращения на Землю, причем результат стоит в обратной пропорциональной зависимости от числа пусков  $n$ .

Конечно, эти модели вполне применимы, но только когда есть подтвержденные данные по реальной стоимости элементов конструкции ТКС, стоимости операций по подготовке к пуску, возвращению и послеполетному обслуживанию и, главное, собраны статистические данные, которые подтверждали бы предложенные модели. Увы, такие данные пока недоступны, а статистика ограничивается лишь упомянутой ранее серией пусков РН «Falkon-9», которую пока нельзя считать достаточно представительной.

Это подтверждает, например, В. Ю. Ключников, автор работы, посвященной формированию облика будущей многоразовой ТКС, который пишет [16]: «...финансовые аналитики отталкивались от стоимости запуска космического аппарата на одноразовой РН в \$61,2 млн, прибыли в 40% и себестоимости пуска около \$36,7 млн. В расчетах использованы заявления И. Маска о том, что стоимость первой ступени составляет 75% стоимости ракеты при кратности повторного использования равной 15 полетам. Корректность приведенных результатов анализа ограничена неопределенностями в стоимости межполетного обслуживания многоразового ракетного блока, а также тем, что проблема обеспечения экономически эффективного мелкосерийного производства многоразовых изделий остается нерешенной».

Поэтому процитированное в самом начале нашей статьи высказывание Д. О. Рогозина четко отражает современную ситуацию с возможностью (точнее, с невозможностью) точной оценки экономической целесообразности использования частично-многоразовых РН.

### Возможный подход к оценке целесообразности создания частично-многоразовых РН

Целесообразность создания частично-многоразовых РН, как нам представляется, можно оценить, рассмотрев затраты именно на повторное использование элементов конструкции. При этом во внимание должна приниматься программа пусков, которая будет реализовываться с помощью создаваемой ТКС, а также следующие важные характеристики РН [7]:

- а) планируемое число повторных применений частично-многоразовых элементов РН;
- б) планируемые затраты, рассматриваемые, например, по следующим группам:
  - обработка технических решений, обеспечивающих «многоразовость»;
  - величина запаса топлива, который необходим для управляемой мягкой посадки возвращаемой ступени (подчеркнем, что для РН в целом этот запас в принципе является пассивной массой, снижающей энергетическое совершенство носителя);
  - доставка вернувшейся конструкции к месту послеполетного обслуживания;
  - технологический процесс проверок ступеней, их систем и агрегатов и потребных восстановительных операций;
  - собственно выполнение повторного пуска.

Итак, оценим полные затраты на выведение полезной нагрузки с помощью частично-многоразовой РН как суммарную стоимость всех операций, необходимых для повторного запуска ранее использованного элемента носителя, и затрат на подготовку и осуществление пуска укомплектованной РН в целом. Иначе говоря, учтем следующие спасательные, ремонтно-восстановительные и подготовительные мероприятия [4, 7, 17, 18]:

- связанные непосредственно с возвращением и посадкой на Землю отработавших ступеней (элементов конструкции) РН;
- транспортные (перевозка спасенных элементов от места посадки к месту проведения ремонтно-восстановительных и подготовительных работ);
- контрольные (выявление возможных дефектов);
- ремонтно-восстановительные;

- контрольно-испытательные;
- дополнительные ремонтно-восстановительные (касается всех элементов конструкции, не прошедших успешно контрольный этап);
- окончательный монтаж и доставки РН на стартовую позицию;
- предстартовая подготовка (цикл, совпадающий почти полностью с аналогичным циклом для одноразовой РН).

В данной схеме все указанные мероприятия, предшествующие последнему (предстартовой подготовке), необходимы для обеспечения заданного уровня надежности частично-многоразовой РН, причем уровня, не меньшего, чем у одноразового носителя. И, естественно, появляются дополнительные затраты, которые и надо оценивать и сравнивать с затратами на производство новой (одноразовой) РН.

Оценку дополнительных затрат можно выполнить, ориентируясь на стоимость всех дополнительных работ, связанных с необходимостью неоднократного использования элементов конструкции ТКС и поэтому повышающих стоимость выполнения всей программы пусков. Здесь целесообразно провести декомпозицию всех указанных выше дополнительных мероприятий до так называемого «уровня элементарных операций», стоимость которых может быть оценена как стоимость проведения конкретных работ. Такая стоимость будет включать вполне традиционные статьи расходов:

- затраты на оборудование (и производственное, и испытательное);
- затраты на материалы (в том числе расходные) и комплектующие;
- затраты транспортные;

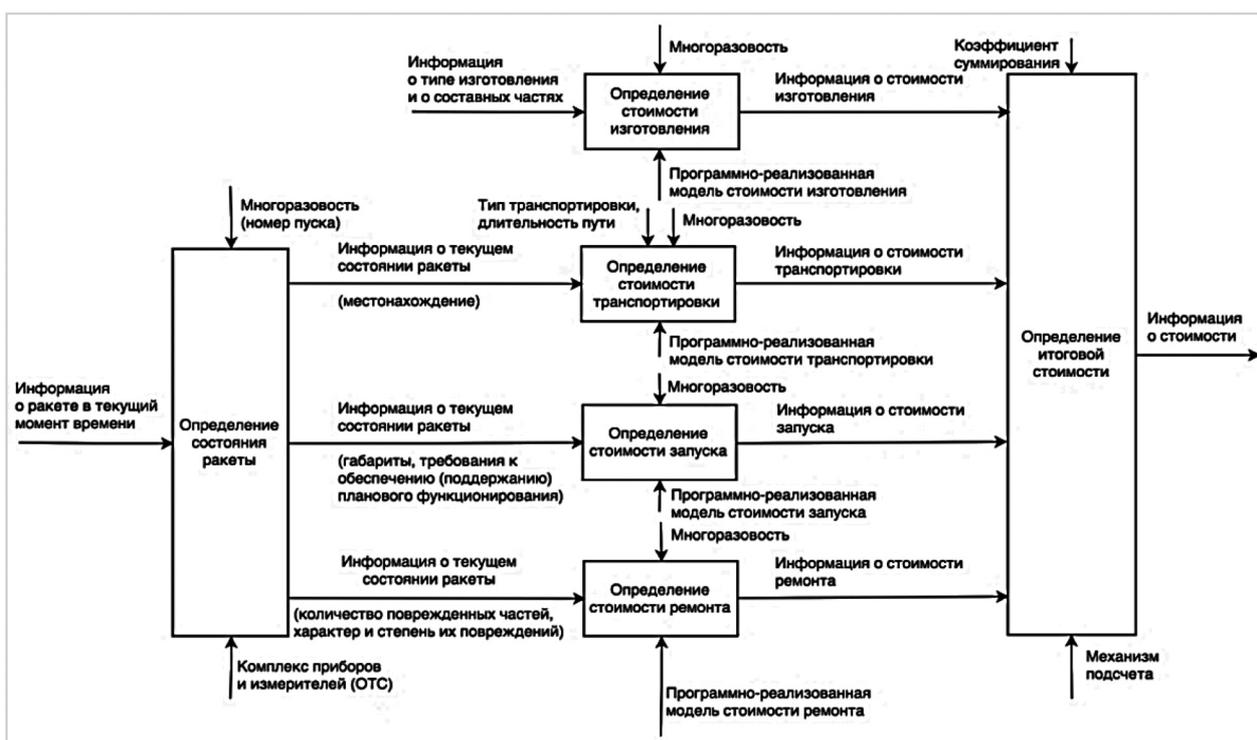


Рис. 1. Функциональная модель оценки стоимости РН [7]

- заработная плата исполнителей с учетом всех начислений;
- накладные расходы и т. п.

Важно, что затраты по этим статьям расходов вполне могут быть оценены в соответствии с нормативами, которые применяются в аэрокосмической отрасли или на конкретных предприятиях. Такие данные накапливаются годами, они вполне доступны и при этом не являются частью отчетов о реальной финансовой деятельности конкретных фирм, в частности «SpaceX», которые исследователям пока не предоставлены.

В результате вполне возможна оценка всех затрат, связанных с подготовкой и частично-многократной, и однократной РН к очередному пуску. В принципе, в каждом конкретном случае сравнение полученных результатов даст возможность оценить целесообразность применения частично-многократной или однократной системы.

На рис. 1 представлена функциональная модель оценки стоимости РН, применимая как для частично-многократных, так и однократных конструкций [7]. Здесь главная функция – определение стоимости РН, и для каждого этапа цикла функционирования частично-многократной РН следует раскрыть подробно содержание соответствующих этапов. В качестве так называемого «элемента управления» в нашем случае будет выступать «многократность» (возможность повторного использования).

В качестве примера реализации предлагаемого подхода можно рассмотреть набор операций по подготовке к повторному запуску одного из ключевых элементов конструкции первой ступени РН «Falcon 9», обеспечивших ее успешное возвращение на Землю и мягкую посадку. Это – ЖРД «Merlin 1D» многодвигательной установки первой ступени РН, входе полета и посадки несколько раз включавшийся и выключавшийся. Перед повторным использованием необходимо проверить его работоспособность, поэтому должна выполняться укрупненная последовательность операций:

- снятие двигательной установки и размещение ее на испытательном стенде (в принципе, возможно проведение испытаний без такого демонтажа, непосредственно в составе ступени);
- проведение необходимой программы испытаний;
- ремонтно-восстановительные работы и/или замена части оборудования;
- операции по приведению двигательной установки ступени в состояние предполетной готовности.

Перечень основных элементов конструкции рассматриваемого ЖРД, которые подлежат проверке на предмет возможности повторного использования, и контрольные операции, им соответствующие, даны в табл. 2.

На основании этого перечня параметров можно составить укрупненную номенклатуру испытаний, которая, даже для указанного в табл. 2 далеко не полного перечня элементов, будет включать более 25 позиций [17]. По каждому ЖРД, не отвечающему требованиям, предъявляемым на любом из этапов проверки, принимается решение: либо о ремонтно-восстановительных операциях, либо о полной его замене на резервный двигатель.

К сожалению, часть обязательных контрольных операций принципиально не может быть выполнена при испытаниях ЖРД, проводимых после его использования в составе ступени РН (например, в случае, когда из-за конструктивных особенностей невозможен демонтаж отдельных агрегатов двигательной установки). Здесь потребуется выработка косвенных критериев, подтверждающих надежность двигателя, и для набора необходимой статистики придется выполнить значительное количество предварительных испытаний, что, в свою очередь, увеличит общие затраты.

В любом случае, при наличии сформированной последовательности необходимых работ появляется возможность оценки общих затрат на испытания ЖРД.

Таблица 2

Укрупненный перечень элементов конструкции ЖРД и необходимые испытания [7, 19, 20]

№	Элемент конструкции (агрегат)	Испытательные операции
1	Смесительная (форсуночная) головка камеры сгорания	Проверка на герметичность
2	Вал турбонасосного агрегата	Подбор критических режимов работы ротора
3	Камера сгорания в целом	
3.1	Камера сгорания, а также сопряженные с ней элементы конструкции ЖРД	Проверка на герметичность
3.2	Напряженно-деформационное состояние корпуса камеры сгорания	Проверка на прочность
4	Турбонасосный агрегат (ТНА)	
4.1	Турбина ТНА (включая сопловой аппарат и лопатки)	
4.1.1		Нагрузка со стороны возникающих центробежных сил
4.1.2		Герметичность стыков
4.1.3		Надежность уплотнений
4.1.4		Изменение давления на входе и выходе турбины (по отношению к номинальному)
4.1.5		Диапазон рабочих температур
4.1.6		Газовые нагрузки
4.1.7	Надежность крепления лопаток к диску турбины (ее основному колесу)	
4.2	Лопатка турбины ТНА	Прочность лопатки на изгиб

Для этого потребуются стоимости каждой операции из сформулированного перечня; как мы уже отмечали, эти данные вполне могут быть получены как показатели, средние по аэрокосмической отрасли.

Добавим, что в работах [7, 18] рассмотрен также цикл испытательных и восстановительных работ по другому элементу частично-многоразовой РН — посадочным опорам возвращаемой ступени.

### Общие выводы

Концептуально идея создания частично-многоразовых РН была сформулирована в середине 1960-х гг. и за прошедшие годы не претерпела каких-то принципиальных изменений. Концепция эта подразумевает, причем практически без должного обоснования, что многократность использования космических систем и их отдельных элементов способна существенно снизить показатель СВКПН.

Технический аспект создания частично-многоразовых РН связан с разработкой таких элементов их конструкции, которые, обладая необходимой надежностью в течение всего срока эксплуатации, могут неоднократно использоваться. Созданные за прошедшие годы элементы конструкции РН показали принципиальную возможность этого, но их многолетняя эксплуатация не дала четкого ответа о

целесообразности их использования, в том числе и с экономической точки зрения.

Экономический аспект вопроса в настоящее время является ключевым и, к сожалению, наименее проработанным, поскольку в распоряжении исследователей нет достоверных данных, показывающих реальную картину затрат на создание и эксплуатацию частично-многоразовых систем. Большинство предлагаемых моделей оценки экономической целесообразности создания частично-многоразовых РН предусматривает использование статистической информации и данных по стоимостям отдельных элементов транспортной системы, реальные значения которых, повторим, пока недоступны. Поэтому большинство существующих оценок находятся в области предположений, иногда достоверно никак не подтвержденных.

Предложен подход к оценке затрат, связанных с обеспечением «многоразовости» ТКС, который ориентирован на определение стоимости всех дополнительных работ, необходимых для неоднократного использования элементов конструкции. Здесь появляется возможность определения суммарных расходов на основе вполне достоверных статистических данных, что позволяет сравнивать затраты на применение той или иной — частично-многоразовой или одноразовой — ракеты-носителя для каждого конкретного случая.

### Список использованных источников

1. «Главкосмос»: ракеты Маска дешевле, потому что за них платят NASA и Минобороны США//Коммерсантъ. 26 апреля 2020 г. [https://www.kommersant.ru/doc/4332395?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop&utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews..](https://www.kommersant.ru/doc/4332395?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews..)
2. А. Милкус. Глава Роскосмоса Дмитрий Рогозин: «Наши многоразовые ракеты будут возвращаться по-самолетному»//Комсомольская правда. 19 апреля 2020 г. <https://www.nsk.kp.ru/daily/27119/4201316>.
3. И. И. Ануреев. Ракеты многократного использования. М.: Воениздат, 1975. 214 с.
4. А. А. Дмитриева, М. Н. Охочинский. К оценке стоимости запуска космических аппаратов носителями многократного применения//Труды Х НПК «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». Т. 1. СПб.: БГУ «Военмех», 2018. С. 229-232.
5. Космическая эра. Прогнозы на 2001 г./Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 420 с.
6. C. Lafleur. U.S. Piloted Programs Costs. Spacecraft Encyclopedia. <http://claudelafleur.qc.ca/Programcosts.html>.
7. И. В. Вагнер, А. А. Дмитриева, М. Н. Охочинский, Г. В. Цаканян. К оценке целесообразности создания частично-многоразовых ракетных транспортных систем//Труды XII НПК «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». Т. 1. СПб.: БГУ «Военмех», 2020. С. 21-35.
8. К. А. Афанасьев, И. В. Вагнер, М. Н. Охочинский, С. А. Чириков и др. Логистика и управление цепями поставок в высокотехнологичных отраслях национальной экономики. Аэрокосмическая промышленность: монография/Под ред. М. Н. Григорьева, И. А. Максимцева, С. А. Уварова. В 3-х т. Т. 1. СПб.: Изд-во СПб ГЭУ, 2017. 224 с.
9. SpaceX Falcon 9 product page. Space Exploration Technologies Corp. 2013. <https://www.spacex.com/falcon9>.
10. Falcon\_9\_users\_guide\_rev\_2.0. Course Hero. <https://www.coursehero.com/file/13961533/falcon-9-users-guide-rev-20>.
11. Проекты многоразовых ракет-носителей в России: есть ли у них будущее?//Военное обозрение. 5 сентября 2019 г. <https://topwar.ru/162070-proekty-mnogorazovyh-raket-nositel-v-rossii-est-li-u-nih-budushee.html>.
12. Пусть расцветают сто многоразовых ракет//Habr. 20 апреля 2020 г. <https://habr.com/ru/post/498086>.
13. Д. Г. Белянин, В. А. Грибакин, А. С. Перфильев, С. Ю. Пирогов. Оценка технико-экономического эффекта применения многоразовых элементов конструкции ракет-носителей//Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. № 660. СПб.: 2018. С. 138-145.
14. Д. Г. Белянин, В. А. Грибакин, В. М. Низовцев, С. Ю. Пирогов. Исследование влияния ресурса возвращаемой двигательной установки первой ступени ракеты-носителя легкого класса на стоимость выведения полезного груза//Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. № 661. СПб., 2018. С. 137-141.
15. О. А. Иванов. Модель оценки экономической эффективности частично многоразовых ракет-носителей//Труды XII ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». В 4-х т. Т. 1. СПб.: БГУ «Военмех», 2020. С. 132-135.
16. В. Ю. Ключников. Leap-носитель — основа системы транспортного обеспечения начального этапа индустриализации космоса//Воздушно-космическая сфера. 2018. № 3 (96). С. 38-51.
17. А. А. Дмитриева. Методика оценки стоимости ракеты-носителя многоразового использования//Труды X ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». В 2-х т. Т. 1. СПб.: БГУ «Военмех», 2018. С. 69-74.
18. Г. В. Цаканян. Оценка целесообразности применения многоразовых элементов транспортных космических систем//Труды XI ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». В 2-х т. Т. 2. СПб.: БГУ «Военмех», 2019. С. 84-88.
19. ГОСТ Р 56099-2014. Двигатели ракетные жидкостные. Методика утяжеленных испытаний. М.: Стандартинформ, 2015.
20. Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1989. 429 с.

### References

1. Glavkosmos: Musk's rockets are cheaper because they are paid for by NASA and the US Department of defense//Kommersant. April 26, 2020. [https://www.kommersant.ru/doc/4332395?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop&utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews..](https://www.kommersant.ru/doc/4332395?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews..)
2. A. Milkus. The Head Of Roscosmos, Dmitry Rogozin: «Our reusable rockets will return by plane»//Komsomolskaya Pravda. April 19, 2020. <https://www.nsk.kp.ru/daily/27119/4201316>.
3. I. I. Anureev. Multiple-use missiles. Moscow: Voenizdat, 1975. 214 p.
4. A. A. Dmitrieva, M. N. Ohochinsky. To estimate the cost of launching spacecraft by multiple-use carriers//Proceedings of the X Conference «Innovative technologies and special-purpose equipment». Vol. 1. SPb.: BSTU «Voennemh», 2018. P. 229-232.
5. Space era. Forecasts for 2001. M.: Mir, 1970. 420 p.

6. C. Lafleur. U.S. Piloted Programs Costs. Spacecraft Encyclopedia. <http://claudeLafleur.qc.ca/Programcosts.html>.
7. I. V. Wagner, A. A. Dmitrieva, M. N. Ohochinsky, G. V. Tsakanyan. To assess the feasibility of creating partially reusable rocket transport systems//Proceedings of the XII Conference «Innovative technologies and special-purpose equipment». Vol. 1. SPb.: BSTU «Voenmeh», 2020. P. 21-35.
8. K. A. Afanasyev, I. V. Wagner, M. N. Ohochinsky, S. A. Chirikov et al. Logistics and supply chain management in high-tech sectors of the national economy. Aerospace industry: monograph/Ed. by M. N. Grigoriev, I. A. Maksimtsev, S. A. Uvarov. In 3 vols. Vol. 1. SPb.: publishing house of Saint Petersburg Economic University, 2017. 224 p.
9. SpaceX Falcon 9 product page. Space Exploration Technologies Corp. 2013. <https://www.spacex.com/falcon9>.
10. Falcon\_9\_users\_guide\_rev\_2.0. Course Hero. <https://www.coursehero.com/file/13961533/falcon-9-users-guide-rev-20>.
11. Projects reusable launch vehicles in Russia: do they have a future?//Military review. September 5, 2019. <https://topwar.ru/162070-proekty-mnogorazovnyh-raket-nositelej-v-rossii-est-li-u-nih-budushee.html>.
12. Let a hundred reusable rockets bloom//Habr. April 20, 2020. <https://habr.com/ru/post/498086>.
13. D. G. Belyanin, V. A. Gribakin, A. S. Perfiliev, S. Yu. Pirogov. Assessment of the technical and economic effect of using reusable launch vehicle design elements//Proceedings of the Military Space Academy n. a. A. F. Mozhaisky. № 660. SPb.: 2018. P. 138-145.
14. D. G. Belyanin, V. A. Gribakin, V. M. Nizovtsev, S. Yu. Pirogov. Study of the impact of the resource of the return engine of the first stage of a light-class launch vehicle on the cost of removing the payload//Proceedings of the Military Space Academy n. a. A. F. Mozhaisky. № 661. SPb., 2018. P. 137-141.
15. O. A. Ivanov. Model for evaluating the economic efficiency of partially reusable launch vehicles//Proceedings of the XII Conference «Youth. Technic. Space». In 4 vols. Vol. 1. SPb.: BGTU «Voenmeh», 2020. P. 132-135.
16. V. Y. Klyushnikov. Lean carrier-the basis of the transport support system for the initial stage of space industrialization//Aerospace sphere. 2018. № 3 (96). P. 38-51.
17. A. A. Dmitrieva. Methodology for estimating the cost of a reusable launch vehicle//Works X Conference «Youth. Technic. Space». In 2 vols. Vol. 1. SPb.: BSTU «Voenmeh», 2018. P. 69-74.
18. G. V. Tsakanyan. Evaluation of the feasibility of using reusable elements of transport space systems//Proceedings of the XI Conference «Youth. Technic. Space». In 2 vols. Vol. 2. SPb.: BSTU «Voenmeh», 2019. P. 84-88.
19. GOST R 56099-2014. Liquid rocket engines. Methods of weighted tests. M.: Standartinform, 2015.
20. G. G. Gakhun, V. I. Baulin, V. A. Volodin et al. Construction and design of liquid rocket engines: textbook for university students. M.: Mashinostroenie, 1989. 429 p.