

# Об экономической целесообразности снижения кратности повторного использования многоразовых ступеней ракеты-носителя

## *On the economic feasibility of reducing the reuse frequency of reusable launch vehicle stages*

*В статье рассмотрен подход к оценке экономической целесообразности возможного снижения кратности повторного использования многоразовых ступеней ракеты-носителя для осуществления программы выведения полезных нагрузок в случае замены одноразовой ракетой-носителем сопоставимой грузоподъемности. Представлен пример расчета. Предлагаемый подход может быть применен для планирования программы выведения полезных нагрузок с использованием многоразовой ракеты-носителя в интересах государственного заказчика.*

*The article considers an approach to assessing the economic feasibility of possible reducing the reuse frequency of reusable launch vehicle (LV) stages in order to achieve savings in payloads (PL) launch program costs in case of replacing an expendable LV of comparable PL capacity. An example of calculation is presented.*

*The proposed approach can be applied to a reusable LV PL launch program planning in the interests of the state contractor.*

**Ключевые слова:** многоразовая ракета-носитель, программа выведения полезных нагрузок, экономия затрат

**Keywords:** reusable launch vehicle, payload launch program, cost savings



### **ПОЛУШКИН ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

*К.т.н., главный специалист отдела перспективных проектов Управления ТЭО ФЦП, АО «Организация «Агат»*  
E-mail: PolushkinIuV@agat-roskosmos.ru

### **POLUSHKIN YURIY**

*Ph.D. in Engineering, chief specialist of Prospective Projects Department of Directorate of Feasibility Study of Federal Target Programs, JSC "Organization "Agat"*



### **СМИРНОВ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ**

*Заместитель начальника управления – начальник отдела перспективных проектов Управления ТЭО ФЦП, АО «Организация «Агат»*  
E-mail: SmirnovDP@agat-roskosmos.ru

### **SMIRNOV DMITRIY**

*Deputy Head of Directorate – Head of Prospective Projects Department of Directorate of Feasibility Study of Federal Target Programs, JSC "Organization "Agat"*

Для цитирования: Полушкин Ю.В. Об экономической целесообразности снижения кратности повторного использования многоразовых ступеней ракеты-носителя / Ю.В. Полушкин, Д.П. Смирнов // «Экономика космоса». – 2024. – № 10. – С. 37-41. – DOI 10.48612/agat/space\_economics/2024.03.10.04

## Введение

Снижение стоимости выведения полезной нагрузки (далее – ПН) на орбиту является актуальной проблемой для развития космической отрасли. При достигнутом уровне технологий возможным решением может стать использование многоразовых ракет-носителей (далее – РН) [1-2].

В настоящее время мы являемся свидетелями перехода к эксплуатации частично многоразовых РН, представляющих собой второе поколение ракет-носителей [3], типичным представителем которого является РН Falcon-9R американской компании SpaceX. РН Falcon-9 используется как в одноразовом, так и в частично многоразовом варианте в качестве РН различного класса (тяжелого/среднего) [3], при этом кратность повторного использования многоразовой первой ступени до применения в одноразовом варианте может быть различной [4-5].

При расчете показателей многоразовых РН, как правило, стоимость пусковой услуги многоразовой РН/РН с многоразовыми составными частями (далее – «многоразовая РН») оценивается для максимальной кратности повторного использования многоразовой составной части (далее – СЧ) [6-8], которая выбирается исходя из технических и технологических ограничений.

Такая методология не учитывает возможного применения многоразовой РН как в многоразовом, так и одноразовых вариантах с различными технико-экономическими характеристиками и не всегда может быть использована для планирования программы выведения ПН по экономическому критерию.

Целью настоящей работы является исследование подхода к определению возможного снижения количества повторных использований многоразовых ступеней РН, позволяющих проводить экономически оправданную замену одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности, при осуществлении программы выведения для государственного заказчика.

## Основная часть

В настоящее время в Российской Федерации реализуется проект создания частично многоразовой РН среднего класса, эксплуатация которой должна привести к существенному снижению стоимости выведения ПН на орбиту

по сравнению с существующими одноразовыми РН.

Для сравнительной оценки выгоды от эксплуатации многоразовой РН в целях данной статьи будем использовать показатель стоимости пусковой услуги.

Под пусковой услугой (далее – ПУ) будем понимать услугу по доставке ПН в заданную область околоземного пространства с необходимым вектором скорости и ориентацией в пространстве.

Для многократного использования СЧ РН требуется обеспечить их спасение и подготовку к повторному использованию, что определяет две основные группы особенностей, которые следует учитывать при сравнительном анализе с одноразовыми РН.

1. Особенности формирования стоимости многоразовой РН включают:

- многоразовые СЧ переносят свою стоимость на пусковую услугу по частям;
- при последнем использовании многоразовой СЧ на стоимость пусковой услуги переносится остаточная стоимость (ранее не амортизированная при использовании);
- подготовка к повторному использованию многоразовой СЧ требует дополнительного межполетного обслуживания;
- возникает удорожание изготовления РН в связи с появлением дополнительных элементов, обеспечивающих многократное использование СЧ<sup>1</sup>;
- возникают дополнительные расходы, связанные с содержанием многоразовых СЧ (хранение, страхование и т.п.).

2. Особенности функционирования:

- необходимость спасения многоразовой СЧ приводит к снижению грузоподъемности РН.

Рассмотрим вариант, когда многоразовая РН создается для замены одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности. В этом случае по сравнению с такой одноразовой РН при прочих равных условиях для многоразовой РН:

1. Стоимость изготовления РН выше, вследствие:

- необходимости увеличения размерности РН (стартовой массы) для выведения заданной ПН (с учетом веса элементов, обеспечивающих спасение многоразовой СЧ);

<sup>1</sup> Состав и величина этих расходов зависят от выбранного варианта спасения многоразовой СЧ.

- меньшей серийности производства.

2. Стоимость эксплуатации выше вследствие, например, наличия расходов на межполетное обслуживание.

Исходя из вышеизложенного, стоимость пусковой услуги многоразовой РН в одноразовом варианте использования сразу после изготовления будет выше стоимости пуска одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности как минимум на разность в стоимости изготовления, включая многоразовые элементы.

Стоимость пусковой услуги многоразовой РН в одноразовом варианте будет снижаться после каждого повторного использования (в связи с отнесением части стоимости многоразовой СЧ на пусковую услугу при пуске в многоразовом варианте использования) и станет минимальной в пуске, соответствующем максимальной кратности повторного использования многоразовой СЧ.

Если многоразовая РН обеспечивает снижение стоимости пусковой услуги, то существует такое число повторных использований многоразовой СЧ (показатель  $N_{min}$ ), начиная с которого стоимость пусковой услуги многоразовой РН в одноразовом варианте будет ниже стоимости пусковой услуги одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности, которую планируется заменить.

Для определения показателя  $N_{min}$  выделим в составе стоимости пусковой услуги многоразовой РН две составляющие: первоначальную стоимость многоразовой СЧ и дополнительные расходы, связанные с подготовкой и проведением пуска.

Первоначальная стоимость будет включать расходы на изготовление, транспортировку и утилизацию многоразовых СЧ, а дополнительные расходы – изготовление одноразовых СЧ, транспортировку, хранение и техническое обслуживание одноразовых СЧ, подготовку и проведение пуска РН, хранение многоразовых СЧ между пусками и т.п.<sup>2</sup>

Тогда стоимость пусковой услуги многоразовой РН ( $C_{пу,мн}$ ) в зависимости от количества ранее произведенных повторных пусков многоразовой СЧ может быть рассчитана по формуле (1):

где:

$$C_{пу}^{мн}(C_{сч}^{мн}, \Delta C_{пу}, K, N) = C_{сч}^{мн} \left(1 - \frac{N}{K}\right) + \Delta C_{пу}, \quad (1)$$

- $(C_{сч}^{мн})$  – первоначальная стоимость многоразовой СЧ;
- $(\Delta C_{пу})$  – дополнительные расходы, связанные с подготовкой и проведением пуска многоразовой РН;

- $N$  – количество ранее произведенных пусков многоразовой СЧ;
- $K$  – кратность повторного использования (ресурсе) многоразовой СЧ.

Приравняв формулу (1) к стоимости пусковой услуги одноразовой РН<sup>3</sup> ( $C_{пу}^{одн}$ ), можно получить формулу для расчета номера повторного использования многоразовой СЧ, после проведения которого пуск многоразовой РН в одноразовом варианте экономически целесообразен:

$$N_{min} \geq K \times \left(1 - \frac{C_{пу}^{одн}}{C_{сч}^{мн}} + \frac{\Delta C_{пу}}{C_{сч}^{мн}}\right), \quad (2)$$

Соотношение  $\left(1 - \frac{C_{пу}^{одн}}{C_{сч}^{мн}} + \frac{\Delta C_{пу}}{C_{сч}^{мн}}\right)$  определяет экономические требования к расходу ресурса многоразовой ступени до ее использования в одноразовом варианте. Из формулы видно, что требования к расходу ресурса снижаются при увеличении отношения  $\frac{C_{пу}^{одн}}{C_{сч}^{мн}}$  и снижении отношения  $\frac{\Delta C_{пу}}{C_{сч}^{мн}}$ , т.е. увеличении стоимости пусковой услуги одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности и снижении дополнительных расходов, связанных с подготовкой и проведением пуска (стоимости изготовления одноразовых частей РН, стоимости подготовки и проведения пуска и т.п.).

Проведем расчет показателя  $N_{min}$  на базе аналога – РН Falcon-9 по данным, полученным из открытых источников<sup>4</sup>:

- стоимость изготовления многоразовой 1-ой ступени ( $C_{сч}^{мн}$ ) – 30,0 млн долл. США;
- стоимость изготовления 2-ой ступени и головного обтекателя ( $C_{изг}^{2+Г0}$ ) – 15,0 млн долл. США;
- подготовка и проведение пуска ( $C_{п}$ ) – 4,0 млн долл. США<sup>5</sup>;
- масса выводимой ПН на низкую околоземную орбиту (далее – НОО) в одноразовом варианте использования ( $M_{пн}^{одн}$ ) – 23,0 т;
- масса выводимой ПН на НОО в многоразовом варианте использования ( $M_{пн}^{мн}$ ) – 16,0 т.

Предположим, что стоимость изготовления РН пропорциональна массе выводимой ПН. Тогда стоимость изготовления одноразовой РН с грузоподъемностью 16 т может быть оценена в 31,3 млн долл. США:

$$C_{изг}^{одн} = (C_{сч}^{мн} + C_{изг}^{2+Г0}) \times \frac{M_{пн}^{одн}}{M_{пн}^{мн}} = (30,0 + 15,0) \times \frac{16,0}{23,0} = 31,3 \text{ млн долл. США} \quad (3)$$

<sup>2</sup> Поскольку рассматривается использование многоразовой СЧ в одноразовом варианте, в данном случае расходы на межполетное обслуживание многоразовых СЧ в составе дополнительных расходов не учитываются.

<sup>3</sup> Для замены которой создается РН с многоразовыми СЧ.

<sup>4</sup> «Falcon 9 экономика возрата первой ступени» [Электронный ресурс] // Космос и Программирование: [сайт]. [2020]. URL: [https://dzen.ru/a/X-wGcF\\_sFCrpdOR](https://dzen.ru/a/X-wGcF_sFCrpdOR) (дата обращения: 12.11.2024).

<sup>5</sup> Приведенная стоимость пуска вероятнее всего занижена, но для целей настоящей статьи это значения не имеет.

С учетом стоимости подготовки и проведения пуска (4,0 млн долл. США) стоимость пусковой услуги одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности ( $C_{пу}^{Одн}$ ) составит 35,3 млн долл. США.

Дополнительные расходы, связанные с подготовкой и проведением пуска многоразовой РН ( $\Delta C_{пу}$ ), в данном случае равны 19,0 млн долл. США (сумма изготовления одноразовых 2-ой ступени и головного обтекателя – 15,0 млн долл. США, плюс стоимость подготовки и проведения пуска – 4,0 млн долл. США).

Первоначальная стоимость многоразовой СЧ ( $C_{СЧ}^{МН}$ ) – 30,0 млн долл. США.

Подставив соответствующие данные в формулу (2), получим:

$$N_{min} \geq K \times \left( 1 - \frac{35,3}{30,0} + \frac{19,0}{30,0} \right) = 0,46 \times K \quad (4)$$

Таким образом, для данного примера многоразовая ступень должна израсходовать 46% ресурса в рамках повторного использования, чтобы ее пуск в одноразовом варианте использования был экономически целесообразен при замене одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности.

При определении показателя  $N_{min}$  для конкретного значения ресурса многоразового ускорителя оценку,

полученную по формуле (4), нужно округлять вверх до целого значения. Например, для приведенного выше примера при кратности повторного использования равной десяти, пуски в одноразовом варианте целесообразно проводить для ступеней, которые ранее запускались не менее 5 раз, т.е. для пусков с 6 по 10.

#### Заключение

В статье представлено описание подхода к оценке вариантов использования многоразовой РН в целях получения экономического эффекта при осуществлении программы выведения ПН в случае замены одноразовой РН сопоставимой грузоподъемности, в том числе:

- сформулировано условие получения экономического эффекта;
- определены экономические требования к расходованию ресурса многоразовой ступени до ее использования в одноразовом варианте;
- проведен расчет с использованием исходных данных из открытых источников.

Предлагаемый подход может быть использован для формирования программы применения вариантов многоразовой РН с конкретными технико-экономическими характеристиками в целях оптимизации затрат на выведение ПН государственных заказчиков.

#### Список литературы

1. Дошанова Д. Р. Экономические аспекты перехода к многоразовым средствам выведения / Д. Р. Дошанова, И. В. Пшеничников, Д. П. Смирнов. – Текст: непосредственный // «Экономика космоса». – 2022. – № 1. – С. 40-45. – DOI: 10.48612/agat/space\_economics/2022.01.01.07.
2. Смирнов Д. П. От кареты до ракеты. Рынок запусков и развитие космических транспортных систем / Д. П. Смирнов, С. В. Троценков, И. В. Пшеничников. – Текст: непосредственный // «Русский космос». – 2021. – № 30 – С. 46-49.
3. Смирнов Д. П. От ракеты до орбитальной мастерской / Д. П. Смирнов, С. В. Троценков, И. В. Пшеничников. – Текст: непосредственный // «Русский космос». – 2021. – № 32 – С. 62-65.
4. Яныгин В. Ю. Методология оценки стоимости ракетно-космической техники с учетом затрат на технологическую подготовку производства / В. Ю. Яныгин. – Текст: непосредственный // «Экономика вчера, сегодня, завтра». – 2023. – Т. 13, № 3А. – С. 219-225.
5. Вагнер И. В. Три аспекта создания частично-многоразовых ракет-носителей / И. В. Вагнер, А. А. Дмитриева, М. Н. Охочинский. – Текст: непосредственный // «Инновационная Россия. Конъюнктура. Прогнозы. Тенденции». – 2020. – № 9 (263). – С. 22-29.
6. Стельмах С. Ф. Исследование факторов, влияющих на возможность многократного применения жидкостных ракетных двигателей в целях снижения стоимости пусков многоразовых ракет-носителей / С. Ф. Стельмах, В. А. Грибакин, В. Л. Слатов, А. В. Антропова. – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 2 – С. 215-226.
7. Келле Д. Е. ТРАНСКОСТ 6.0 аналитическая статистическая модель оценки стоимости и экономической оптимизации космических транспортных систем (версия 6.0) / Д. Е. Келле. – Текст: непосредственный // Отчет № TCS-TR-146(95). – Германия: TCS – TransCostSystems D-85521 Оттобрунн, Либигвер, 10. – 1995. – 143 с.
8. Стапперт С. Оценка параметрических моделей стоимости на начальном этапе проектирования многоразовых ракет-носителей / С. Стапперт, Я. Вилкен, Г. Калабуг, М. Сиппел. – Текст: непосредственный // 9-ая Европейская конференция по аэронавтике и космическим наукам (EUCASS). – 2022. – С. 1-13.

**List of literature**

1. Doschanova D. R. Economic aspects of the transition to reusable means of excretion / D. R. Doschanova, I. V. Pshenichnikov, D. P. Smirnov. – Text: direct // “Space economics”. – 2022. – № 1. – pp. 40-45. – DOI: 10.48612/agat/space\_economics/2022.01.01.07.
2. Smirnov D. P. From the carriage to the rocket. The launch market and the development of space transport systems / D. P. Smirnov, S. V. Troshchenkov, I. V. Pshenichnikov. – Text: direct // “Russian Space”. – 2021. – № 30 – pp. 46-49.
3. Smirnov D. P. From the rocket to the orbital workshop / D. P. Smirnov, S. V. Troshchenkov, I. V. Pshenichnikov. – Text: direct // “Russian Cosmos”. – 2021. – № 32 – pp. 62-65.
4. Yanygin V. Y. Methodology for estimating the cost of rocket and space technology, taking into account the costs of technological preparation of production / V. Yu. Yanygin. – Text: direct // “Economics yesterday, today, tomorrow”. – 2023. – Vol. 13, № 3A. – pp. 219-225.
5. Vagner I. V. Three aspects of the creation of partially reusable launch vehicles / I. V. Vagner, A. A. Dmitrieva, M. N. Okhochinsky. – Text: direct // “Innovative Russia. The conjuncture. Forecasts. Trends”. – 2020. – № 9 (263). – pp. 22-29.
6. Stelmakh S. F. Analysis of factors affecting the possibility of multiple use of liquid rocket engines in order to reduce the cost of launching reusable launch vehicles / S. F. Stelmakh, V. A. Gribakin, V. L. Slatov, A.V. Antropova. – Text: direct / News of TUISU. Technical sciences. – 2023. – № 2 – pp. 215-226.
7. Koelle D. E. TRANSCOST 6.0 Statistical-Analytical Model for Cost Estimation and Economical Optimization of Space Transportation Systems (version 6.0) / Dr. Dietrich E. Koelle. – Text: direct // Report № TCS-TR-146(95). – Germany: TCS – TransCostSystems D-85521 Ottoberunn, Liebigweg 10. – 1995. – 143 p.
8. Stappert S. Evaluation of Parametric Cost Estimation in the Preliminary Design Phase of Reusable Launch Vehicles / S. Stappert, J. Wilken, G. J. D. Calabuig, Dr M. Sippel. – Text: direct // 9th European Conference For Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). – 2022. – p. 1-13.

Рукопись получена: 21.11.2024

Рукопись одобрена: 12.12.2024