

Моделирование затрат межполетного обслуживания элементов многоразовой космической системы на примере первой ступени ракеты-носителя Falcon 9

Refurbishment cost simulation of the reusable space system's elements on the example of the Falcon 9 booster rocket first stage

Повторное использование элементов космической системы – это объективная реальность. Из расходного материала оборудование превращается в амортизируемый долгосрочный актив. Поэтому актуальной задачей является разработка экономической модели затрат межполетного обслуживания многоразовых элементов ракеты-носителя. Единственной функционирующей в настоящее время частично многоразовой ракетой-носителем является Falcon 9. На основе фактических данных продолжительности межполетного обслуживания в статье исследованы альтернативные модели затрат межполетного обслуживания и путем моделирования выбрана наилучшая. Установлен новый критерий замены многоразовой первой ступени на новую: суммарные затраты повторного использования не должны быть выше 85% затрат на изготовление новой первой ступени (приблизительно 20,6 млн долл. США). Все известные оценки затрат межполетного обслуживания укладываются в интервал от 1 до 3 млн долл. США или в среднем 2 млн долл. США. Это в 7–10 раз меньше 20,6 млн долл. США, что говорит о большом потенциале для увеличения ресурса.

The reuse of the space system's elements is an objective reality. The equipment turns from a consumable into a depreciable long-term asset. Therefore, an urgent task is to develop an economic cost model for refurbishment of reusable launch vehicle elements. The only partially reusable launch vehicle currently operating is the Falcon 9. Based on the actual data on the duration of turnaround maintenance, alternative models of refurbishment costs have been investigated in the article, and the best one has been selected by modeling. A new criterion for replacing the reusable first stage with a new one has been determined. The total cost of reuse should not be more than 85% of the manufacturing cost of a new first stage (approximately \$20.6 million). All known estimates of the refurbishment cost fit into the range from \$1 to \$3 million or an average of \$2 million. This is 7-10 times less than \$20.6 million, which indicates a great potential for increasing the resource.

Ключевые слова: многоразовые ракеты-носители, межполетное обслуживание, снижение стоимости, критерий выгодности повторного использования, массовость производства, кривая обучения

Keywords: reusable launch vehicles, turnaround maintenance (refurbishment), cost reduction, criterion of profitability of reuse, mass production, learning curve

**ФАЛЬКО СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ**

Д.э.н., профессор, заведующий кафедрой
«Экономика и организация производства»
(ИБМ-2), МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: serfalk@rambler.ru

FALKO SERGEY

Grand Ph.D. in Economics, Professor, Head of Department of
Economics and Organization of Production (EBM-2), Bauman
Moscow State Technical University

**БАДИКОВ
ГРИГОРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

К.т.н., доцент кафедры «Экономика
и организация производства» (ИБМ-2),
МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: grigori.badikov@rambler.ru

**BADIKOV
GRIGORY**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor of Department of
Economics and Organization of Production (EBM-2), Bauman
Moscow State Technical University

**КРЯТ АРСЕНИЙ ПАВЛОВИЧ**

Студент кафедры «Стартовые ракетные
комплексы» (СМ-8), МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: arpakr@yandex.ru

KRYAT ARSENY

Student of Launch Complexes Department (SE-8), Bauman
Moscow State Technical University

Для цитирования: Фалько С.Г. Моделирование затрат межполетного обслуживания элементов многоразовой космической системы на примере первой ступени ракеты-носителя Falcon 9 / С.Г. Фалько, Г.А. Бадиков, А.П. Крят // «Экономика космоса». – 2024. – № 9. – С. 66-78. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2024.03.09.07

Введение

Идея многократного использования космического оборудования получила реализацию и продолжает совершенствоваться компанией SpaceX¹ [1-6]. Повторное использование первой ступени ракеты-носителя Falcon 9 приводит к снижению затрат на выведение полезной нагрузки на околоземную орбиту, увеличению частоты запусков, сохранению дорогостоящих высокотехнологичных объектов и улучшению экологии^{2,3} [1-5; 7-12]. Межполетное обслуживание является видом технологического обслуживания со спецификой аэрокосмической отрасли. Сочетание механических, акустических, вибрационных и термических воздействий на элементы космической системы требуют особого подхода. Каждый пуск и посадка ракеты-носителя и корабля происходят в изменяющихся климатических условиях. Поэтому межполетное обслуживание носит исследовательский неустановившийся характер. Такое обслужи-

вание можно назвать технологическим обслуживанием по состоянию, т.к. в результате осмотров и испытаний определяется объем работ по ремонту. Окончательный контроль показывает возможность дальнейшего использования.

Еще в 2000 году была предложена модель затрат на межполетное обслуживание (реконструкцию, ремонт) многоразовой ракеты-носителя в виде формулы кривой обучения [1]. Затраты на первый повторный пуск определялись как 0,5-2% от затрат на производство новой ракеты-носителя. Процент обучения равен 105-115%.

В работе М. Сиппель и др. [11] отмечено, что затраты на операции по восстановлению (возврат первой ступени на стартовый стол) составляют около 650 тыс. долл. США при посадке на платформу в океане и 250 тыс. долл. США при посадке на площадку на стартовом комплексе. Предлагается определять затраты на межполетное обслуживание [12] как произведение коэффициента

¹ «Основной тренд космической отрасли»: как продвигается создание российских многоразовых ракет-носителей [Электронный ресурс] // RT на русском: [сайт]. [2020]. URL: <https://ru.rt.com/h8b6> (дата обращения: 11.09.2023).

² Интервью Илона Маска на MWC (на русском языке) [Электронный ресурс] // YouTube: [сайт]. [2021]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eaSmNylmylc> (дата обращения: 11.09.2023). Таймкод: 00.23.30 – 00.24.50.

³ Интервью Илона Маска на CodeCon 2021 (на русском языке) [Электронный ресурс] // YouTube: [сайт]. [2021]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=WCdJTNln5uE> (дата обращения: 11.09.2023). Таймкод: 00.14.00 – 00.21.00.

ремонта (изменяется в пределах от 0 до 1) на затраты изготовления новой ракеты-носителя. Утверждается, что затраты на пуск многоразовой ракеты-носителя меньше затрат на пуск ее одноразового аналога, если затраты на техническое обслуживание и реконструкцию (ремонт) не превышают 0,25 затрат на изготовление новой ракеты-носителя. При 0,4 затраты на пуск многоразовой и одноразовой ракеты-носителя сравниваются. Таким образом, актуальной задачей является разработка экономической модели затрат межполетного обслуживания многоразовых элементов ракеты-носителя⁴ [13-15]. В частности, первой ступени Falcon 9.

Накопление информации и опыта приведет к стандартизации производственного процесса межполетного обслуживания и к его дальнейшей автоматизации. Будут создаваться условия для широкого использования цифровых и сквозных технологий. Например, большие данные для обработки гигабайтов информации, собираемой до, во время и после полета, коллаборативные роботы, самодвижущиеся тележки, автоматический визуальный контроль, аддитивные технологии, автоматические тесты, дополненная реальность и умные датчики.

В качестве последнего примера известен болт со встроенным эндовибратором, который сам сообщает, какое у него натяжение во время сборки, в течение и после полета [13]. Стандартизация процессов межполетного обслуживания приводит к модифицированным формам системы планово-предупредительного ремонта.

Важнейшей частью такой системы становится осмотр и испытания, анализ всех доступных данных, объемов работ и прогноз дальнейшего использования первой ступени после каждой посадки. Таким образом, необходимость, объем и сроки ремонтов определяются по состоянию первой ступени.

Целью статьи является исследование зависимости продолжительности межполетного обслуживания от номера пуска, а также разработка альтернативных вариантов моделей затрат межполетного обслуживания, определяющих условия выгоды использования первой ступени повторно.

Статистика продолжительности межполетного обслуживания

Известны даты повторных пусков всех первых ступеней Falcon 9. Примем, что время между двумя пусками, идущими один за другим, одной и той же первой ступени будет равно продолжительности межполетного обслуживания. Это допущение, так как на самом деле неопределенную часть этого периода составляет ожидание. Будем считать продолжительность межполетного обслуживания начиная с 2018 года, когда стала использоваться последняя модификация первой ступени FT (Full Trust Block 5). На рис. 1 представлено математическое ожидание и стандартное отклонение периодов обслуживания начиная с января 2018 года по апрель 2024 года.

Результаты расчетов показывают аномальные стан-

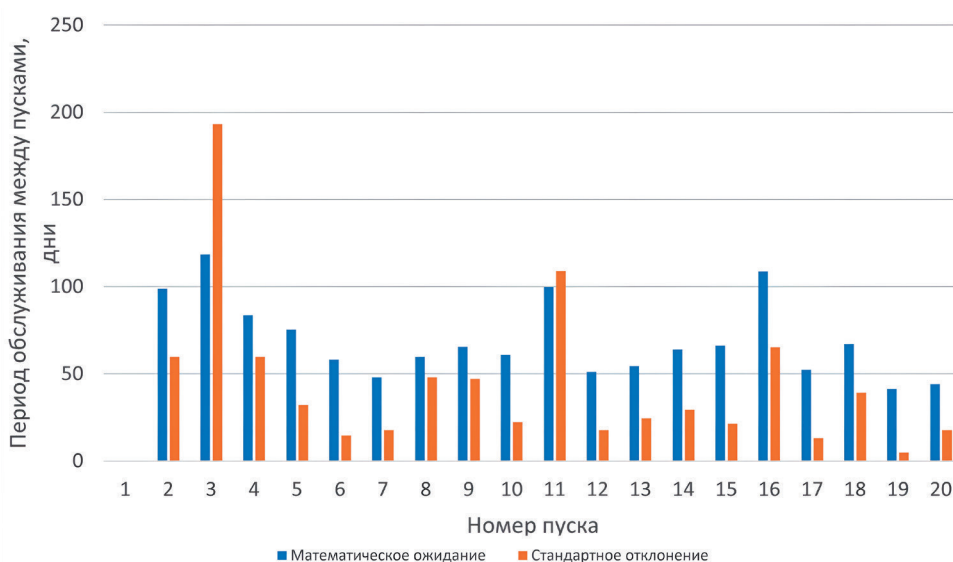


Рис. 1. Время в днях между повторными пусками первых ступеней Falcon 9 FT (Block 5), отнесенное к порядковому номеру пуска, 2018-2024 гг.

Источник: составлено авторами на основе данных о датах пуска, опубликованных в открытой печати

⁴ «Три тайны Илона Маска» [Электронный ресурс] // Хабр: [сайт]. [2016]. URL: <https://habr.com/ru/articles/369113/> (дата обращения: 11.09.2023).

дартные отклонения перед пусками 3, 11 и 16, что говорит о неустановившемся процессе межполетного обслуживания. Осуществляется поиск лучших технологических подготовок ступеней к повторному пуску. С другой стороны, известно, что часть первых ступеней, например, В1058 и В1060, была подвергнута расширенному объему испытаний с целью подготовки данных для сертификации увеличенного числа повторных пусков. Это продлевало период обслуживания до 150 и даже до 250 дней. Очевидно, что через некоторое время при установившихся производственных процессах показатели стабилизируются. Чтобы подтвердить эти предположения, выполнена статистическая обработка массива

данных за 2022-2024 годы (рис. 2) и за 2023-2024 годы (рис. 3), исключая пуски, межполетное обслуживание перед которыми превышало 100 дней, что, возможно, связано с расширенным объемом испытаний.

Как и ожидалось, разброс продолжительности межполетного обслуживания сократился с интервала 50-120 в 2020 году до 40-60 дней в 2023 году. Средние значения математических ожиданий по всему массиву данных за период уменьшаются: 69,4 дня за 2018-2024 гг.; 51,9 дня за 2022-2024 годы; 49,9 дня за 2023-2024 годы. Такие изменения свидетельствуют о формировании установившихся процессов межполетного обслуживания. Необходимо отметить особенности формы

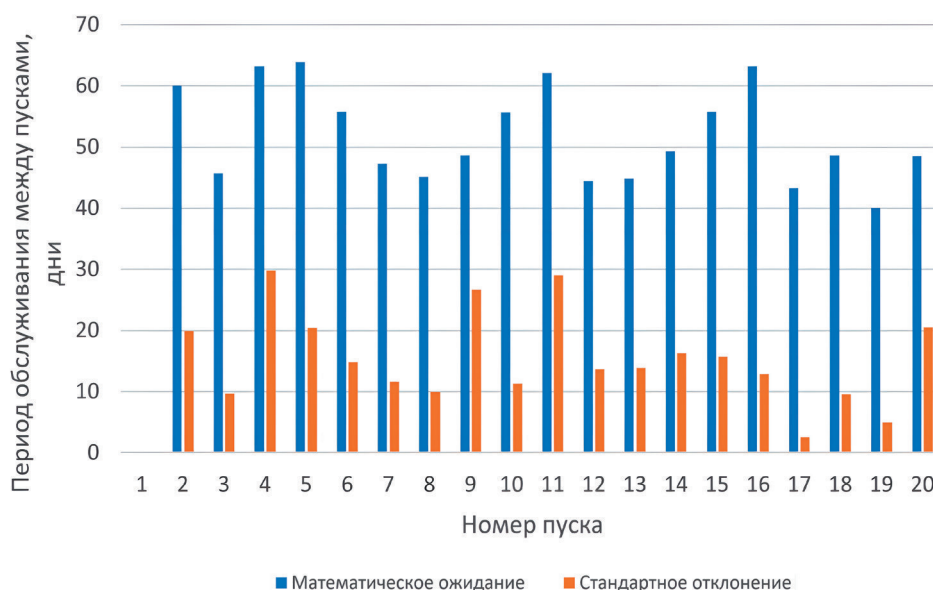


Рис. 2. Время в днях между повторными пусками первых ступеней Falcon 9 FT (Block 5), отнесенное к порядковому номеру пуска, 2022-2024 гг.

Источник: составлено авторами на основе данных о датах пуска, опубликованных в открытой печати

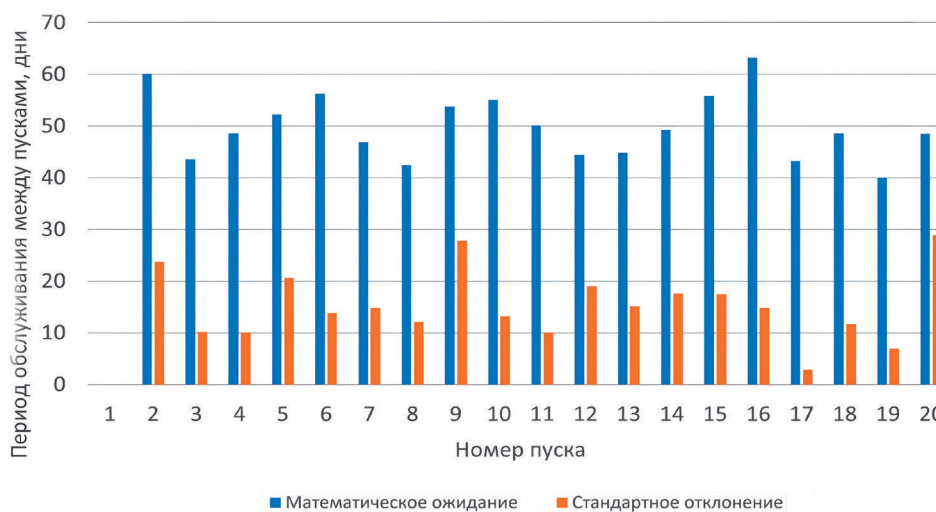


Рис. 3. Время в днях между повторными пусками первых ступеней Falcon 9 FT (Block 5), отнесенное к порядковому номеру пуска, 2023-2024 гг.

Источник: составлено авторами на основе данных о датах пуска, опубликованных в открытой печати

зависимости периода обслуживания от номера пуска. Повышенные значения в начале и в конце сертифицированного ресурса объясняются необходимостью повышенного контроля. Плавное увеличение внутри ресурса согласуется с накоплением износа первой ступени.

Статистика за 2023 год

Всего: 91 пуск. Использовано 15 первых ступеней от 3 до 8 раз каждая, в среднем 6 раз. 4 ступени начали использовать в 2023 году.

Статистика за 2022 год

Всего: 59 пусков. Использовано 13 первых ступеней от 1 до 8 раз каждая, в среднем 4,5 раз. 4 ступени начали использовать в 2022 году.

Аналогичные зависимости получаются для космического челнока Space Shuttle (рис. 4).

Моделирование затрат на межполетное обслуживание

В настоящее время реально доступны только данные повторного использования Space Shuttle и первой ступени ракеты-носителя Falcon 9. Затраты на ремонт, восстановление и подготовку к следующему пуску (межполетное обслуживание) являются самой неопределенной переменной в экономике многоразовости⁵ [1-4; 11-12; 14-15]. Для Falcon 9 стоимость межполетного обслуживания составляет 1-3 млн долл. США, а время между соседними полетами одной и той же первой ступени

менялось от 24 до 223 дней (рис. 1). Аналогично стоимость ремонтно-восстановительных работ для ряда агрегатов в системе Space Shuttle достигала половины стоимости их производства. Вместо сравнительно простого обслуживания в стиле коммерческой авиации подготовка шаттла к новому полету занимала месяцы (рис. 4). Мы можем точно определить перерывы между повторными пусками многоразового оборудования. Оплата труда при межполетном обслуживании скорее всего производится повременнo, т. е. затраты на оплату пропорциональны фактически отработанному времени с коэффициентом пропорциональности, равным тарифной ставке. На этом основании предположим, что затраты на межполетное обслуживание пропорциональны продолжительности межполетного обслуживания. Таким образом, мы получим зависимость затрат от порядкового номера повторного запуска (рис. 5). Примем максимальное значение затрат – 3 млн долл. США, а минимальное – 1 млн долл. США.

Другой элемент неопределенности, препятствующий успешному моделированию, – это ресурс многоразового элемента космической системы⁶. Для первой ступени ракеты-носителя – это максимальное число пусков, которое может выдержать первая ступень с суммарными затратами, не превышающими затраты на ее изготовление.

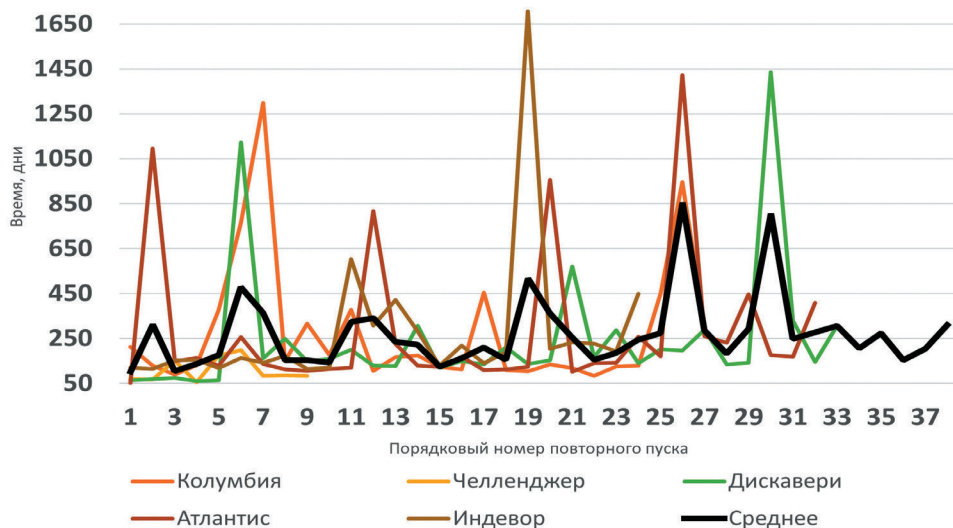


Рис. 4. Время в днях между повторными запусками космического самолета Space Shuttle, отнесенное к порядковому номеру повторного пуска.
 Источник: неопубликованная работа Сабитова Дмитрия Маратовича, студента МГТУ им. Н.Э. Баумана

⁵ «Три тайны Илона Маска» [Электронный ресурс] // Хабр: [сайт]. [2016]. URL: <https://habr.com/ru/articles/369113/> (дата обращения: 11.09.2023).
⁶ Там же.



Рис. 5. Предполагаемые затраты на межполетное обслуживание первых ступеней Falcon 9 FT (Block 5), отнесенное к порядковому номеру повторного пуска.

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

В качестве ресурса может быть принята величина пусков, сертифицированная регулятором. В 2021 году – 10 пусков, в 2022 – 15, в 2023 – 20, а сейчас компания подала документы на 25-40 пусков. Тогда максимумы на диаграммах перерывов между пусками (рис. 1, 4) можно толковать как время текущего или капитального ремонта модифицированной системы плано-предупредительного ремонта. Для Falcon 9 максимумы на диаграммах наблюдаются через 5-11 повторных пусков, а для Space Shuttle – через 2-5 повторных пусков (рис. 1, 4).

Моделирование затрат на межполетное обслуживание должно включать процент потерь, вероятность которых возрастает. За период регулярного повторного использования первой ступени с 2018 по 2024 годы потеряно 7 ступеней из 23 используемых. Получается 30,4% потерь. Три ступени (B1056, B1048, B1059) действительно потеряны во время неудачной посадки на платформу. Для остальных четырех (B1051, B1049, B1060, B1046) посадка не планировалась, так как при выведении на геостационарную орбиту высокий расход топлива не позволял посадить первую ступень. Под потерями в этом случае понимается неиспользованный ресурс первой ступени. Без учета этих четырех ступеней получим минимальный процент потерь: 3 из 23 или 13%. 30,4% будет максимальным процентом. Таким образом, планируемое число пусков необходимо умножить на $1,15 = 23/20$, чтобы учесть возможные потери.

Экономические модели межполетного обслуживания

Исследованы три зависимости затрат на межполетное обслуживание от порядкового номера повторного пуска. Первая и самая простая – постоянное значение

затрат (C_p) на протяжении всего периода использования первой ступени. К этому есть следующие основания. Так, руководство компании называло в качестве оценки затрат на межполетное обслуживание постоянную величину в 2 млн долл. США, другая оценка – десятая часть от затрат на изготовление первой ступени. И ничего не упоминалось про изменения с новым пуском, $C_p = \text{const}$.

Вторая зависимость предложена в исследовании Дж. Р. Верца [1] и обосновывается тем, что износ транспортного средства со временем растет. А значит и затраты на техническое обслуживание и ремонт должны возрастать. Используется формула кривой обучения (1), в которой процент изменения S_1 больше 100%:

$$C_p = C_1 \cdot (M - 1)^{B_1}, B_1 = 1 - \frac{\ln\left(\frac{100}{S_1}\right)}{\ln(2)}, \quad (1)$$

где C_1 – затраты на межполетное обслуживание после первого пуска; M – номер пуска одной и той же первой ступени; B_1 – показатель степени; S_1 – процент изменения затрат при удвоении номера пуска.

Третья зависимость основана на особенностях, выявленных изучением изменения времени межполетного обслуживания с увеличением порядкового номера повторного полета. Повышенные затраты перед вторым C_{p2} и двадцать первым C_{p21} пуском первой ступени связаны с необходимостью убедиться в штатной работе всех компонентов и систем. В промежутке между третьим и двадцатым пуском затраты линейно растут из-за износа от 1 до 3 млн долл. США.

$$C_{p2} = 3, C_{p3} = 1, C_p = 1 + (3 - 1) \cdot \frac{M-3}{20-3}, \quad (2)$$

при $3 < M < 21$, $C_{p21} = 6$

Важнейшим в использовании многоразовых космических систем является ответ на вопрос: выгодно это или нет? Для первой ступени Falcon 9 эту дилемму можно перефразировать следующим образом: при каком условии ее можно использовать повторно? Если суммарные затраты на возврат и подготовку первой ступени к повторному пуску меньше затрат на изготовление новой ступени на 10-15%, использовать повторно первую ступень выгодно. В обратном случае надо использовать новую ступень и утилизировать старую.

В 2021 году Илон Маск утверждал: «Первую ступень Falcon 9 запустили повторно 10 раз, расчет на 20-30 пусков. 60% стоимости ракеты приходится на первую ступень, 10% – обтекатель, 20% – вторая ступень, 10% – полет и восстановительные работы»⁷. «Предельная себестоимость пуска, исключая накладные расходы, составляет 15 млн долл. США за 15 тонн полезной нагрузки»⁸. Примем, что предельные затраты десятого запуска составили 15 млн долл. США и вклад возвращаемых первой ступени и обтекателя составили одну десятую от затрат на новые первую ступень и обтекатель. Тогда можно найти затраты на первый пуск новой ракеты-носителя, фактически равные затратам на пуск одноразовой ракеты-носителя. Распределяем стоимость первой ступени и обтекателя на 10 пусков и получаем относительную стоимость пуска при повторном использовании:

$$60\%/10 + 10\%/10 + 20\% + 10\% = 37\%$$

При абсолютном значении полученного показателя в 15 млн долл. США стоимость первого пуска будет равняться: $15/0,37 = 40,5$ млн долл. США. Отсюда можно вычислить затраты на полет и восстановительные работы: $0,1 \cdot 40,54 = 4,054$ млн долл. США. Далее можно определить экономию затрат при повторном пуске: $40,54/15 = 2,7$.

Таким образом, получается, что многократное использование (более 10 раз) первой ступени Falcon 9 сокращает прямые затраты на пуск в 2,7 раза. Актуальной задачей является определение условий рентабельного использования многоразовых ракет-носителей. В этих условиях затраты на изготовление новой первой ступени (60% от затрат на изготовление новой ракеты-носителя) составят $C_{пс} = 24,3$ млн долл. США. Эта величина должна быть на 10-15% больше суммы затрат, необходимых для повторного пуска уже летав-

шей первой ступени, а именно: амортизации первой ступени, затрат на межполетное обслуживание, затрат на возврат ступени на стартовый стол. Амортизацию первой ступени определяем как частное от деления затрат на изготовление первой ступени на порядковый номер повторного запуска ($A = 24,3/M$). Затраты на межполетное обслуживание задаются вышеописанными зависимостями.

Затраты на возврат ступени на стартовый стол состоят из: затрат на посадку – приблизительно 150 тыс. долл. США, транспортных расходов – 70-100 тыс. долл. США, горючего и окислителя для испытаний – порядка 270 тыс. долл. США. В сумме они не превышают 0,5 млн долл. США, что существенно меньше двух других составляющих, и поэтому ими можно пренебречь. Необходимо отметить, что все расчеты выполнены в ценах 2021 г., так как основаны на оценках Илона Маска в том же году.

Результаты моделирования

Расчеты по предлагаемым зависимостям представлены на рис. 6-14. По горизонтальной оси отложен номер пуска одной и той же первой ступени. По вертикали амортизация ($A = 24,3/M$), затраты на межполетное обслуживание (ремонт) и сумма этих двух составляющих. При первом пуске показаны затраты на изготовление первой ступени равные 24,3 млн долл. США. Постоянные значения межполетного обслуживания 3, 6 и 12 млн долл. США показаны на рис. 6, 7 и 8. Значения 3 и 6, составляющие восьмую и четвертую часть от 24,3 млн долл. США, мало влияют на сумму затрат амортизации и межполетного обслуживания. Значение межполетного обслуживания дает асимптоту, к которой стремится значение суммы при больших числах пусков. Вид кривой суммы определяется видом кривой амортизации. При значении 12, составляющем половину от 24, вид кривой суммы меняется. Затраты второго пуска первой ступени сравниваются с затратами на ее изготовление. Это моделирует ситуацию, когда второе использование первой ступени является невыгодным. При 19-ом, 20-ом пуске (в конце ресурса) отсутствует рост затрат.

На рис. 9-11 показаны затраты на межполетное обслуживание по зависимости (1) для значений $S_1 = 105, 115$ и 145%. Поскольку амортизация и затраты на межполетное обслуживание с увеличением номера

⁷ Интервью Илона Маска на MWC (на русском языке) [Электронный ресурс] // YouTube: [сайт]. [2021].

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eaSmNylmylc> (дата обращения: 11.09.2023). Таймкод: 00.23.30 – 00.24.50.

⁸ Интервью Илона Маска на CodeCon 2021 (на русском языке) [Электронный ресурс] // YouTube: [сайт]. [2021].

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=WCDJTNln5uE> (дата обращения: 11.09.2023). Таймкод: 00.14.00 – 00.21.00.

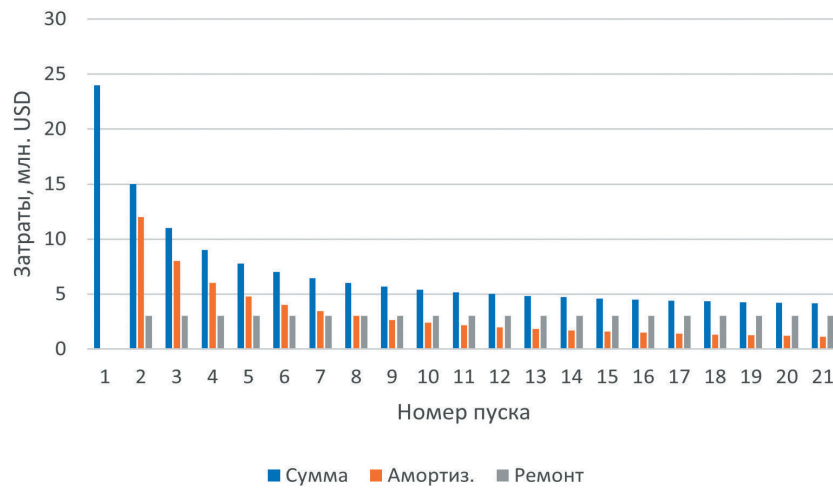


Рис. 6. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска, $C_p=3$.
 Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

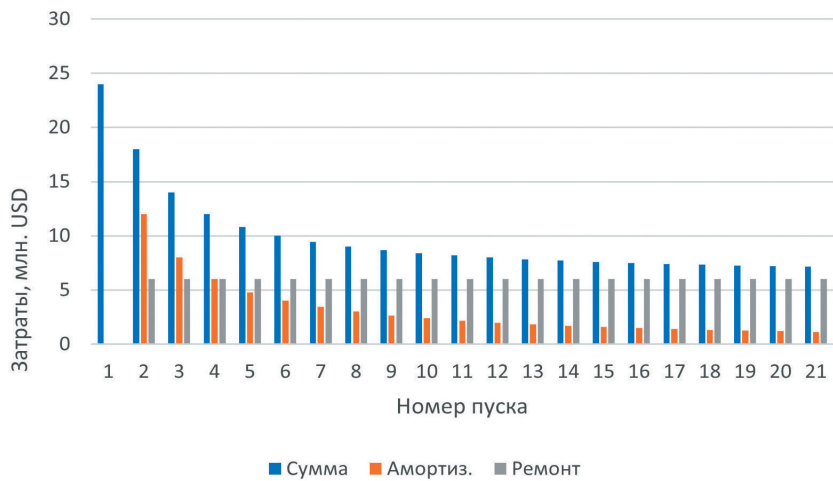


Рис. 7. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска, $C_p=6$.
 Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

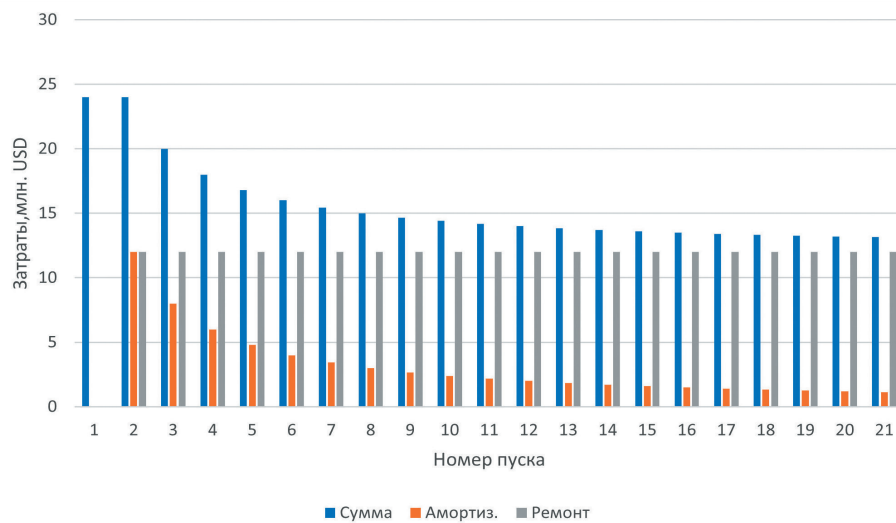


Рис. 8. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска, $C_p=12$.
 Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

пуска изменяются разнонаправленно, суммарные затраты имеют точку минимума. С увеличением скорости нарастания затрат на межполетное обслуживание S_1 минимум смещается в сторону меньших значений номера пуска.

При $S_1 = 145\%$ суммарные затраты превышают затраты на изготовление первой ступени в случае использования первой ступени 21 раз. В этом случае использование первой ступени невыгодно. Чтобы

избежать такого положения, необходимо остановить применение первой ступени заранее, например, при суммарных затратах, составляющих 85% от затрат на изготовление первой ступени: $A + C_p < 0,85 \cdot C_{1C}$.

Исследование третьей зависимости представлено на рис. 12-14. Предельные затраты на полет и восстановительные работы составляют приблизительно 4 млн долл. США. Примем, что предельные затраты на полетные услуги равны не меньше 1 млн долл. США.

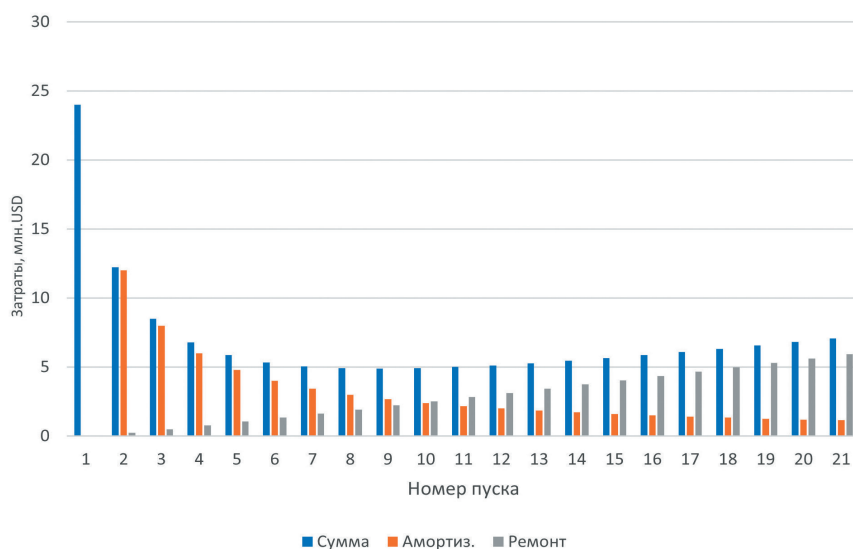


Рис. 9. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_p = C_1 \cdot (M-1)^{B_1}, B_1 = 1 - \ln(100/S_1) / \ln(2), S_1 = 105\%.$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

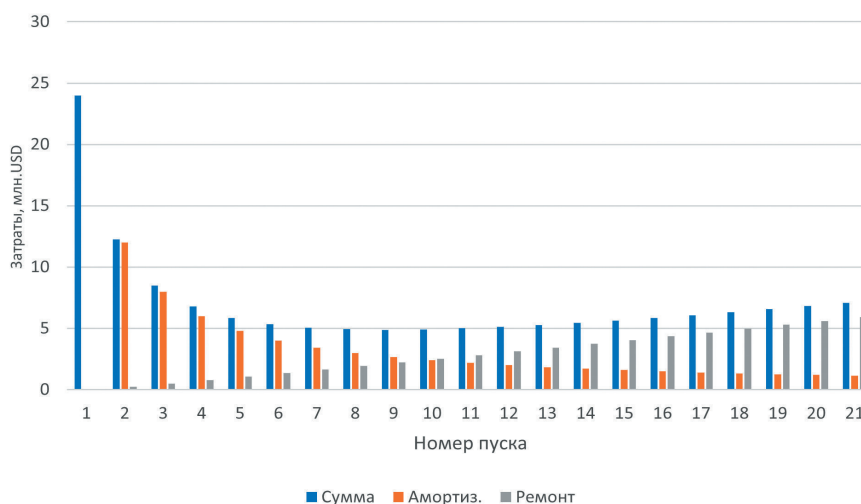


Рис. 10. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_p = C_1 \cdot (M-1)^{B_1}, B_1 = 1 - \ln(100/S_1) / \ln(2), S_1 = 115\%.$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

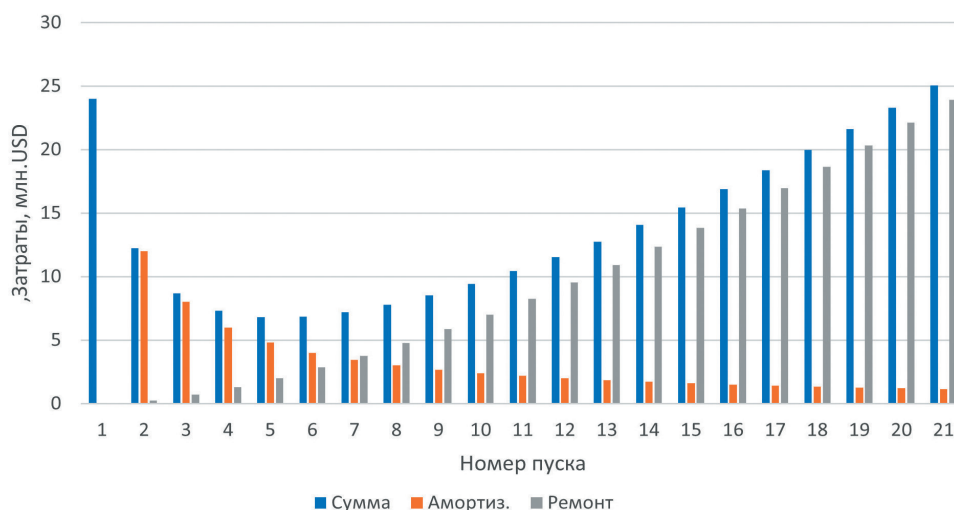


Рис. 11. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_p = C_i(M-1)^{p-1}, B_i = 1 - \ln(100/S_1) / \ln(2), S_1 = 145\%$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

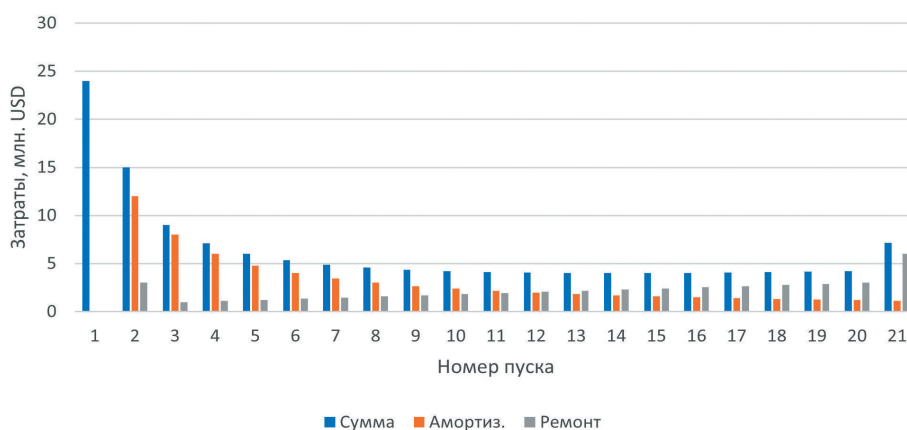


Рис. 12. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_{p2} = 3, C_{p3} = 1, C_p = 1 + (3-1) \cdot (M-3) / (20-3), \text{ при } 3 < M < 21, C_{p21} = 6.$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

Тогда предельные затраты на восстановительные работы (межполетное обслуживание) изменяются в пределах от 1 до 3 млн долл. США. В эти пределы попадают оценки затрат на межполетное обслуживание, заявленные руководством компании: 2 млн долл. США и десятая часть от затрат на изготовление первой ступени – $24,3/10 = 2,43$ млн долл. США. Таким образом, на рис. 12 показана наиболее вероятная зависимость затрат на межполетное обслуживание от номера пуска одной и той же первой ступени. На рис. 13 и 14 затраты межполетного обслуживания увеличены в 3 и в 5 раз соответственно. Рис. 14 моде-

лирует последний выгодный пуск (номер 21) первой ступени. Суммарные затраты (21,1 млн долл. США) стали больше $(0,85 \cdot 24,3 = 20,6$ млн долл. США), но меньше затрат на изготовление новой первой ступени (24,3 млн долл. США). Необходимо отметить, что использование первой ступени повторно становится невыгодным при увеличении текущих затрат на межполетное обслуживание, равное приблизительно 2 млн долл. США, в 7-10 раз. Это говорит о высокой надежности первой ступени, и прогноз в 100 повторных пусков первой ступени не лишен оснований.

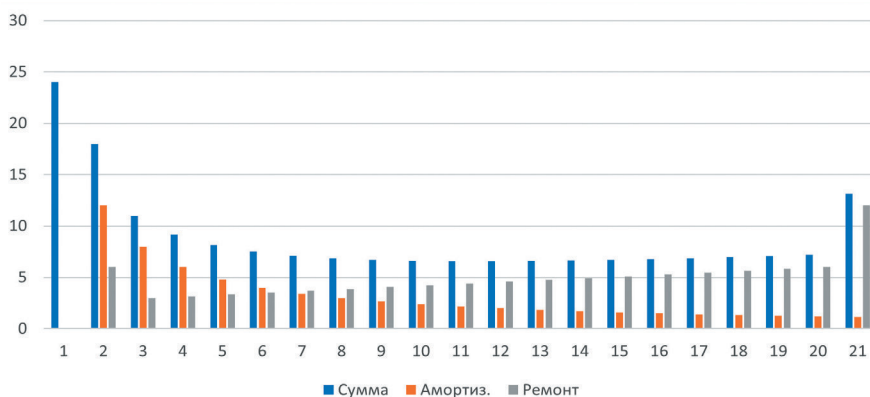


Рис. 13. Суммарные затраты на амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_{p2}=3, C_{p3}=1, C_p=1+(3-1) \cdot (M-3)/(20-3), \text{ при } 3 < M < 21, C_{p21} = 12.$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

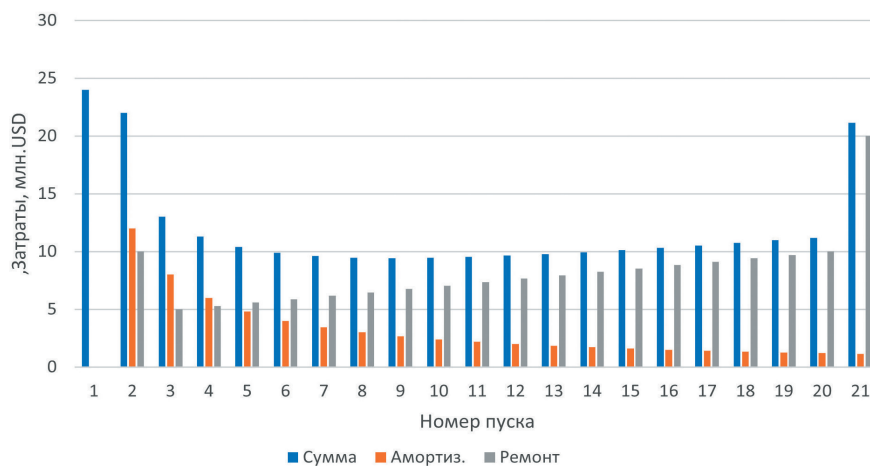


Рис. 14. Суммарные затраты амортизацию и межполетное обслуживание в млн долл. США в зависимости от порядкового номера пуска:

$$C_{p2}=3, C_{p3}=1, C_p=1+(3-1) \cdot (M-3)/(20-3), \text{ при } 3 < M < 21, C_{p21} = 20.$$

Источник: составлено авторами на основе расчетов по выбранной модели

Заключение

Первую ступень Falcon 9 выгодно использовать повторно, если суммарные затраты на восстановление и подготовку к полету меньше 85% от затрат на изготовление новой ступени, что в 2021 году составляло приблизительно 20,6 млн долл. США.

Экономическая модель затрат на межполетное обслуживание должна отражать особенности продолжительности обслуживания. В начале и в конце ресурса отмечаются повышенные значения, в середине – плавное повышение затрат. Из предложенных экономических моделей затрат на межполетное обслуживание наилучшей является модель, представленная на рис. 12.

Все предлагаемые оценки затрат укладываются в интервал от 1 до 3 млн долл. США. Это в 7-10 раз меньше 20,6 млн долл. США, что говорит о большом потенциале для увеличения ресурса.

С каждым годом размах и значение продолжительности межполетного обслуживания уменьшаются. Стабилизируются производственные процессы. Становится возможна их стандартизация и автоматизация с применением цифровых и сквозных технологий. Возможны элементы модифицированного планово-предупредительного ремонта, основанного на осмотрах и испытаниях после каждой посадки с корректировкой объемов работ.

Список литературы

1. Верц Дж. Р. Экономическая модель многоразовых ракет-носителей в сравнении с одноразовыми / Дж. Р. Верц. – Текст: непосредственный // 51-ый Международный астронавтический конгресс, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2-6 октября. – 2000. – С. 1-15.
2. Бадиков Г. А. Снижение затрат на запуск с использованием многоразовых тяжелых и сверхтяжелых ракет-носителей / Г. А. Бадиков, Е. Б. Мазурин, К. Н. Гончаров. – Текст: непосредственный // Материалы конференции AIP, ООО «Издательство AIP». – 2021. – Т. 2318, № 1. – С. 180004-1-180004-7.
3. Бадиков Г. А. Экономическая модель затрат, необходимых для создания и эксплуатации системы быстрого интернета Starlink / Г. А. Бадиков, А. В. Зайцев. – Текст: непосредственный // Материалы конференции AIP, ООО «Издательство AIP». – 2023. – Т. 2549, № 1. – С. 200002.
4. Келле Д. Э. Оптимальный с точки зрения затрат размер будущих многоразовых ракет-носителей / Д. Э. Келле. – Текст: непосредственный // Acta Astronautica. – 2000. – Т. 47 (2-9). – С. 205-213.
5. Гибсон Д. Эволюция и сравнение жизненного цикла систем проектирования ракет-носителей / Д. Гибсон. – Текст: непосредственный // Системная инженерия. – 2019. – Т. 22 (4). – С. 330-334.
6. Мюллер Г. Э. Многоразовый аэрокосмический аппарат К-1: как добиться низкой стоимости / Г. Э. Мюллер, Д. Ф. Лепор. – Текст: непосредственный // Acta Astronautica. – 2000. – Т. 46 (2-6). – С. 199-202.
7. Сафи Ф. М. Количественный подход к безопасности и надежности для многоразовых ракет-носителей НАСА второго поколения / Ф. М. Сафи, Г. Маджио. – Текст: непосредственный // Материалы совместной конференции ЕКА-НАСА по безопасности космических полетов, под ред. Б. Баттрик и К. Прейсл. – 2002. – Т. 486. – С. 307-312.
8. Сюй К. Анализ и оптимизация стоимости запуска на основе анализа характеристик космической системы / К. Сюй, П. Холлингсворт, К. Смит. – Текст: непосредственный // Труды Японского общества авиационных и космических наук. – 2019. – Т. 62 (4). – С. 175-183.
9. Бауэр У. Обзор летного эксперимента по повторному использованию DLR / У. Бауэр, П. Рикмерс, А. Калленбах, С. Степперт, В. Вартеманн, С. Меррем Ханс-Йоахим и др. – Текст: непосредственный // Acta Astronautica. – 2020. – Т. 168. – С. 57-68.
10. Бадиков Г. А. Экономическое моделирование затрат на запуск космической системы / Г. А. Бадиков, С. Г. Фалько. – Текст: непосредственный // «Экономика космоса». – 2022. – № 2 (2). – С. 65-73. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.02.09.
11. Сиппель М. Систематическая оценка вариантов возврата многоразового использования на первом этапе / М. Сиппель, С. Стэпперт, Л. Бусслер, Э. Дюмон. – Текст: непосредственный // Материалы Международного астронавтического конгресса (МАК). – 2017. – № D2.4.4. – С. 1-12.
12. Степперт С. Систематическая оценка и сравнение вариантов возвращения первой ступени многоразового использования / С. Степперт, Дж. Уилкен, Л. Бусслер, М. Сиппель. – Текст: непосредственный // Материалы Международного астронавтического конгресса (МАК). – 2019. – № D2.3.10. – С. 1-15.
13. Куакуви А. Мониторинг состояния конструкции многоразовой пусковой системы с использованием беспроводных датчиков эндовибраторного типа / А. Куакуви, К. Дежус, Д. Барнонсель, С. Хемур. – Текст: электронный // Европейская микроволновая конференция, Париж, Франция. – 2024. – URL: <https://hal.science/hal-04559987> (дата обращения: 11.09.2023).
14. Вагнер И. В. Три аспекта создания частично многоразовых ракет-носителей / И. В. Вагнер, А. А. Дмитриева, М. Н. Охочинский. – Текст: непосредственный // «Инновации». – 2020. – № 9. – С. 22-29.
15. Джонс Х. Недавнее значительное снижение стоимости космических запусков / Х. Джонс. – Текст: непосредственный // 48-я международная конференция по экологическим системам, Альбукерке, США. – 2018. – С. 1-10.

List of literature

1. Wertz J. R. Economic model of reusable vs. expendable launch vehicles / J. R. Wertz. – Text: direct // 51 st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, Oct. 2-6. – 2000. – pp. 1-15.
2. Badikov G. A. Reduced launch costs using reusable heavy and superheavy launch vehicles / G. A. Badikov, E. B. Mazurin, K. N. – Text: direct // AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC. – 2021. – Vol. 2318, № 1. – pp. 180004-1-180004-7.
3. Badikov G. A. Economic model of costs required to create and operate the Starlink fast internet system / G. A. Badikov, A. V. Zaytsev. – Text: direct // AIP Conference Proceedings, AIP Publishing. – 2023. – Vol. 2549, № 1. – p. 200002.
4. Koelle D. E. The cost-optimal size of future reusable launch vehicles / D. E. Koelle. – Text: direct // Acta Astronautica. – 2000. – Vol. 47 (2-9). – pp. 205-213.
5. Gibson D. Launch vehicle systems engineering life-cycle evolution and comparison / D. Gibson. – Text: direct // Systems Engineering. – 2019. – Vol. 22 (4). – pp. 330-334.

6. Mueller G. E. The K-1 reusable aerospace vehicle: Managing to achieve low cost / G. E. Mueller, D. F. Lepore. – Text: direct // *Acta Astronautica*. – 2000. – Vol. 46 (2-6). – pp. 199-202.
7. Safie F. M. The quantitative safety and reliability approach for NASA'S second generation reusable launch vehicles / F. M. Safie, G. Maggio. – Text: direct // *Proceedings of the Joint ESA-Nasa Space-Flight Safety Conference*, B. Battryck & C. Preysl (Eds.). – 2002. – Vol. 486. – pp. 307-312.
8. Xu Q. Launch cost analysis and optimization based on analysis of space system characteristics / Q. Xu, P. Hollingsworth, K. Smith. – Text: direct // *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*. – 2019. – Vol. 62 (4). – pp. 175-183.
9. Bauer W. DLR reusability flight experiment ReFEx / W. Bauer, P. Rickmers, A. Kallenbach, S. Stappert, V. Wartemann, C. Hans-Joachim Merrem et al. – Text: direct // *Acta Astronautica*. – 2020. – Vol. 168. – pp. 57-68.
10. Badikov G. A. Economic modeling of the costs of launching a space system / G. A. Badikov, S. G. Falco. – Text: direct // *"Space Economics"*. – 2022. – № 2 (2). – pp. 65-73. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.02.09.
11. Sippel M. Systematic assessment of reusable first-stage return options / M. Sippel, S. Stappert, L. Bussler, E. Dumont. – Text: direct // *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC)*. – 2017. – № D2.4.4. – pp. 1-12.
12. Stappert S. A systematic assessment and comparison of reusable first stage return options / S. Stappert, J. Wilken, L. Bussler, M. Sippel. – Text: direct // *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC)*. – 2019. – № D2.3.10. – pp. 1-15.
13. Kuakivi A. Structural health monitoring of reusable launch system using endovibrator-type wireless sensors / A. Kuakivi, C. Dejous, D. Barnonce, S. Hemour. – Text: electronic // *European Microwave Conference, Paris, France*. – 2024. – URL: <https://hal.science/hal-04559987> (accessed: 11.09.2023).
14. Wagner I. V. Three aspects of the creation of partially reusable launch vehicles / I. V. Wagner, A. A. Dmitrieva, M. N. Okhochinsky. – Text: direct // *"Innovations"*. – 2020. – № 9. – pp. 22-29.
15. Jones H. The recent large reduction in space launch cost / H. Jones. – Text: direct // *48th International Conference on Environmental Systems, Albuquerque, USA*. – 2018. – pp. 1-10.

Рукопись получена: 02.07.2024

Рукопись одобрена: 19.09.2024