

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.015>

УДК 629.764 338.5

А. П. Кушнарєв, В. Н. Пышнев, М. А. Дегтярев, А. В. Демченко

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,
Днепро, Украина

ОЦЕНКА СТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С МНОГОРАЗОВОЙ ПЕРВОЙ СТУПЕНЬЮ

Проведен сравнительный анализ стоимостных показателей ракеты-носителя с одноразовой и многоразовой первой ступенью. Получены соотношения, связывающие стоимость пуска со стоимостями основной конструкции, двигательной установки, системы управления, восстановления первой ступени и кратностью ее использования. На примере модельной ракеты-носителя рассчитана стоимость пуска в зависимости от кратности использования первой ступени. Представлен качественный анализ допущений, используемых в этих расчетах. Показано, что для каждого варианта сочетаний стоимости составных частей ракеты и затрат на восстановление есть оптимальная кратность использования первой ступени. Дальнейшее увеличение кратности использования не дает значимого экономического эффекта с точки зрения снижения стоимости пуска, но увеличивает единовременные затраты на разработку и отработку составных частей, допускающих многократное использование.

Ключевые слова: многоразовая первая ступень, оценка стоимостных показателей, анализ стоимости, конкурентоспособность, стоимость пусковых услуг, стоимость ракеты-носителя.

ВВЕДЕНИЕ

Один из мировых трендов современного ракетостроения состоит в снижении стоимости пусковых услуг за счет применения многоразовых ступеней [1, 2], что требует не только разработки технологий спасения первых ступеней ракет-носителей но и технико-экономического анализа их внедрения.

Использование многоразовой (спасаемой) первой ступени приводит к увеличению ее стоимости и стоимости ракеты-носителя в целом по сравнению с одноразовым вариантом, к некоторому ухудшению энергетических характеристик носителя и усложнению технологии эксплуата-

ции. Кроме того, появляются затраты на восстановление первой ступени, отсутствующие в одноразовом варианте. В то же время применение восстановленной первой ступени в нескольких пусках может дать заметное снижение средней себестоимости пуска, поскольку у поставщика пусковых услуг основной статьей затрат является приобретение ракеты-носителя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим два проекта ракеты-носителя легко-го класса, отличающиеся исполнением первой ступени. В варианте 1 первая ступень одноразовая, в варианте 2 — многоразовая (спасаемая, самолетный вариант спасения). Соответственно далее индексы «1» и «2» при переменных и обозначениях будут относиться к одноразовому и

© А. П. КУШНАРЕВ, В. Н. ПЫШНЕВ,
М. А. ДЕГТЯРЕВ, А. В. ДЕМЧЕНКО, 2017

многоразовому варианту. Проведем сравнительный анализ стоимостных показателей (по единовременным и повторяющимся затратам) двух вариантов рассматриваемой ракеты-носителя.

Для проведения анализа введем следующие предположения.

1. Единовременные затраты второго варианта (спасаемая первая ступень) превышают соответствующие показатели первого за счет увеличения расходов на разработку и экспериментальную отработку новых элементов конструкции: шасси и крыло при самолетной схеме спасения, носовой аэродинамический обтекатель, органы управления, другие элементы конструкции, обеспечивающие мягкую посадку. Кроме того, увеличиваются затраты на экспериментальную отработку ступени и двигательной установки, а также технологии спасения ступени.

2. Возрастание повторяющихся затрат второго варианта связано с:

2.1. Увеличением стоимости спасаемой первой ступени за счет:

- усложнения конструкции (шасси и крыло при самолетной схеме спасения, носовой аэродинамический обтекатель, органы управления и другие элементы конструкции, обеспечивающие мягкую посадку). Это удорожает «основную конструкцию» на 15–20 %;

- появления на борту первой ступени полноценной системы управления, обеспечивающей ее полет на участке снижения и приземление. По стоимости она сопоставима с «основной» системой управления ракеты.

2.2. Усложнением технологии эксплуатации (в том числе ее логистической части) в связи с необходимостью выполнения восстановительных работ для основной конструкции и двигательной установки, а также проведения тестов, гарантирующих возможность дальнейшего использования ступени. Это ведет к увеличению эксплуатационных расходов.

2.3. Ухудшением на 10–15 % энергетических характеристик ракеты в целом из-за необходимости резервирования части топлива на первой ступени для обеспечения процесса посадки спасаемой первой ступени. Это не оказывает прямого влияния на повторяющиеся затраты, но

ведет к уменьшению клиентской базы по сравнению с одноразовым вариантом. Поэтому опосредованно (или за счет снижения частоты пусков, или за счет уменьшения цены пуска) это эквивалентно увеличению эксплуатационных затрат, хотя и трудно прогнозируемо.

3. Уменьшение повторяющихся затрат второго варианта связано со снижением средней стоимости ракеты в целом при условии многоразового использования первой ступени. Поскольку стоимость ракеты дает наибольший вклад в повторяющиеся затраты, ее уменьшение позволяет снизить стоимость пусковых услуг и, тем самым, повысить конкурентоспособность такой ракеты.

Опираясь на принятые предположения, проведем оценку средней стоимости пуска как функции кратности повторного использования первой ступени, стоимости восстановления ступени и удорожания основной конструкции спасаемой ступени относительно одноразовой.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получим соотношения для оценки средней стоимости пуска. Введем такие обозначения: x_1 и x_2 — стоимость основной конструкции первой ступени в одноразовом и спасаемом варианте, k — коэффициент удорожания основной конструкции спасаемой ступени относительно одноразовой ($x_2 = kx_1$), d — стоимость двигательной установки первой ступени, y — стоимость системы управления ракеты, x_{dv} — стоимость основной конструкции и двигателей верхних ступеней, v — стоимость верхних ступеней ($v = x_{dv} + y$), z_1 и z_2 — стоимость ракеты в целом в одноразовом и спасаемом варианте, s — стоимость всех работ, связанных с проведением ремонтно-восстановительных работ и обеспечением возможности дальнейшего использования первой ступени, p — стоимость подготовки и проведения пуска, n — кратность использования первой ступени, c_1 и c_2 — средняя стоимость одного пуска в одноразовом и спасаемом варианте, cc_1 и cc_2 — стоимость n пусков в одноразовом и спасаемом варианте, e_1 и e_2 — единовременные затраты на создание ракетного комплекса ($e_2 = e_1 + \Delta$, где Δ — разница между величинами единовремен-

ных затрат для первого и второго вариантов), pr_1 и pr_2 — цена пусковой услуги для первого и второго варианта, N_1 и N_2 — годовой манифест пусков, t_1 и t_2 — условный срок окупаемости.

Тогда справедливы следующие соотношения.

Стоимость ракеты-носителя в одноразовом и многоразовом вариантах исполнения соответственно равна

$$z_1 = x_1 + d + v, \quad z_2 = x_2 + d + y + v.$$

Средняя стоимость одного пуска в одноразовом и многоразовом вариантах исполнения равна

$$c_1 = z_1 + p = x_1 + d + xdv + y + p, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{1}{n} \cdot (x_2 + d + y + v + (s + v) \cdot (n - 1) + p \cdot n + d) = \\ &= \frac{1}{n} \cdot (k \cdot x_1 + 2 \cdot d + y + xdv + y + (s + xdv + y) \cdot (n - 1) + p \cdot n). \quad (2) \end{aligned}$$

Стоимость n пусков в одноразовом и многоразовом вариантах исполнения равна

$$\begin{aligned} cc_1 &= c_1 \cdot n = (x_1 + d + v + p) \cdot n, \\ cc_2 &= z_2 + (s + v) \cdot (n - 1) + p \cdot n + d = \\ &= x_2 + d + y + v + (s + v) \cdot (n - 1) + p \cdot n + d. \end{aligned}$$

Отметим как очевидный вывод, что при $s \geq x_1 + d$ восстановление первой ступени вообще нецелесообразно по экономическим соображениям.

Представляет практический интерес зависимость средней стоимости пуска ракеты со спасаемой первой ступенью от стоимости восстановления, кратности использования, коэффициента удорожания конструкции.

Для определения такой зависимости примем, что стоимости составных частей (выраженные в условных единицах, которые отражают типичные пропорции для стоимости составных частей ракет легкого класса) составляют: $x_1 = 2$, $d = 3$, $xdv = 5$, $y = 1$, $p = 3$. Тогда, подставив принятые значения в зависимости (1) и (2), получим:

$$\begin{aligned} c_1 &= 2 + 3 + 5 + 1 + 3 = 14, \\ c_2 &= \frac{1}{n} \cdot (2k + 6 + 1 + 5 + 1 + (s + 5 + 1) \cdot (n - 1) + 3 = \\ &= \frac{1}{n} \cdot (2k + 13 + (s + 6) \cdot (n - 1)) + 3. \quad (3) \end{aligned}$$

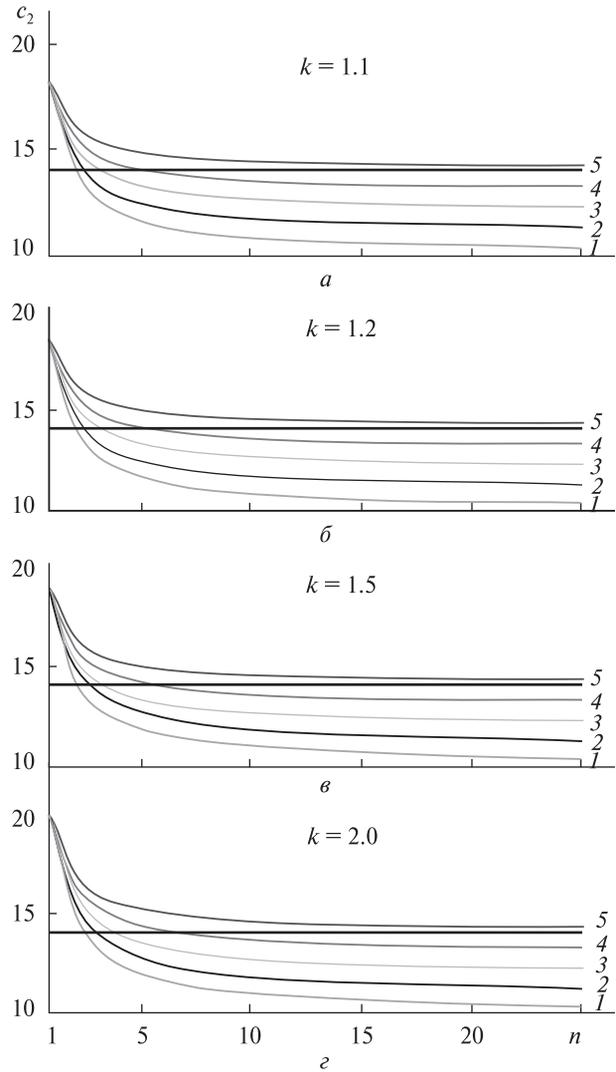


График зависимости средней себестоимости пуска c_2 от кратности повторного использования первой ступени n для разных значений коэффициента k удорожания основной конструкции спасаемой ступени относительно одноразовой: цифры у кривых — стоимость всех операций, связанных с проведением ремонтно-восстановительных работ и обеспечением возможности дальнейшего использования первой ступени. Горизонтальная прямая показывает стоимость пуска при использовании одноразовой первой ступени

Отметим, что полученные соотношения имеют смысл условия $s < x_1 + d = 5$.

Результаты расчетов по формуле (3) средней стоимости c_2 пуска как функции кратности n повторного использования первой ступени при

разных значениях стоимости s восстановления ступени и удорожания k основной конструкции спасаемой ступени относительно одноразовой представлены на рисунке. Горизонтальная прямая показывает стоимость пуска при использовании одноразовой первой ступени.

Анализ полученных результатов показывает возможность определения минимального количества повторных запусков первой ступени, при котором реализуется более низкая, по сравнению с использованием одноразовой ступени, стоимость пуска. Другим, менее очевидным результатом анализа является вывод о нецелесообразности «бесконечного» увеличения кратности использования первой ступени.

Так, при принятых допущениях о соотношении стоимостных показателей составных частей ракеты (основная конструкция, двигатель, система управления и т. д.), для всего диапазона варьирования параметров s и k , кривые выходят на почти горизонтальную «полку» уже при $n = 10 \dots 16$. В частности, для наиболее реалистичных значений $k = 1, 2$ и $s = 3$ не имеет смысла проектировать первую ступень, способную осуществить более 10–12 полетов: дальнейшее увеличение кратности использования почти не сказывается на снижении себестоимости пуска.

Рассмотрим вопрос о допустимом увеличении единовременных затрат на создание ракетного комплекса со спасаемой первой ступенью (параметр Δ), при котором его разработка становится экономически целесообразной по сравнению с одноразовой первой ступенью. В качестве критерия для сравнения вариантов используем условный срок окупаемости затрат, потребовав выполнение неравенства $t_1 \geq t_2$. То есть, условный срок окупаемости для многократного варианта комплекса не должен превышать таковой для одноразового варианта.

Определим единовременные затраты на создание ракетного комплекса с многократовой первой ступенью:

$$e_2 = e_1 + \Delta. \quad (4)$$

Тогда условные сроки окупаемости для двух вариантов исполнения комплекса будут определяться формулами

$$t_1 = \frac{e_1}{(p_1 - c_1) \cdot N_1}, \quad (5)$$

$$t_2 = \frac{e_2}{(p_2 - c_2) \cdot N_2}. \quad (6)$$

Учитывая соотношения (5), (6) и условие $t_1 \geq t_2$, получим:

$$\frac{e_1}{(p_1 - c_1) \cdot N_1} \geq \frac{e_2}{(p_2 - c_2) \cdot N_2}.$$

Приняв (например, по результатам исследования рынка) $pr_1 \approx pr_2$ и $N_1 \approx N_2$, с учетом (4) экономически целесообразные единовременные затраты по созданию многократовой первой ступени (допустимое значение величины Δ) определяются зависимостью

$$\Delta \leq e_1 \cdot (c_1 - c_2) / (pr_1 - c_1).$$

Для рассмотренного выше примера ($k = 1.2, s = 2$) приняв $e_1 = 350$ и $pr_1 = 16$, получим $\Delta \leq 350 \cdot (14 - 11.6) / (16 - 14) = 420$. Для менее оптимистичных $k = 1.2, s = 4, e_1 = 350, pr_1 = 18$, получаем $\Delta \leq 350 \cdot (14 - 13.5) / (18 - 14) = 43.75$.

Иначе говоря, чем больше снижение себестоимости пуска при использовании многократовой ступени и чем меньше маржа (разница между ценой и себестоимостью пуска) при использовании одноразовой ступени, тем больше средств может потратить разработчик на создание многократовой ступени.

ВЫВОДЫ

1. Получены соотношения, связывающие стоимость пуска со стоимостями основной конструкции, двигательной установки, системы управления, восстановления первой ступени и кратностью ее использования.
2. Разработка многократовой первой ступени имеет смысл (с экономической точки зрения) только при том условии, что затраты на восстановление первой ступени не превышают стоимости первой ступени в одноразовом варианте.
3. Полученные соотношения дают возможность определить минимальное количество повторных запусков первой ступени, при котором

реализуется более низкая, по сравнению с использованием одноразовой ступени, себестоимость пуска.

4. Кратность использования многоразовой первой ступени имеет экономически целесообразный предел. Есть конечное значение проектной кратности использования многоразовой первой ступени, выше которого себестоимость пуска перестает существенно изменяться. Для рассмотренного примера это значение кратности составляет $n = 10...12$.

5. Получены соотношения, позволяющие оценить допустимое увеличение единовременных затрат на создание ракетного комплекса со спасаемой первой ступенью, при котором его разработка становится экономически целесообразной по сравнению с одноразовой первой ступенью. В качестве критерия использовано условие непревышения условным сроком окупаемости для многоразового варианта комплекса того же срока для одноразового варианта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang K. (2017-03-30). Recycled Rockets Could Drop Costs, Speed Space Travel // The New York Times site. — Mode of access: <https://www.nytimes.com/2017/03/30/science/space-x-reuseable-rockets-launch.html?action=click&contentCollection=Science&module=RelatedCoverage®ion=Marginalia&pgtype=article>.
2. Foust J. (2017-04-05). SpaceX gaining substantial cost savings from reused Falcon 9 // Spacenews site. Mode of access: <http://spacenews.com/spacex-gaining-substantial-cost-savings-from-reused-falcon-9/>.

Стаття надійшла до редакції 28.08.17

REFERENCES

1. Chang K. (2017-03-30). Recycled Rockets Could Drop Costs, Speed Space Travel // The New York Times site. — Mode of access: <https://www.nytimes.com/2017/03/30/science/space-x-reuseable-rockets-launch.html?action=click&contentCollection=Science&module=RelatedCoverage®ion=Marginalia&pgtype=article>.
2. Foust J. (2017-04-05). SpaceX gaining substantial cost savings from reused Falcon 9. Spacenews site. Mode of access: <http://spacenews.com/spacex-gaining-substantial-cost-savings-from-reused-falcon-9/>.

О. П. Кушнар'ов, В. М. Пишн'єв,
М. О. Дегтяр'ов, А. В. Демченко

Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

ОЦІНКА ВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ РАКЕТИ-НОСІЯ З БАГАТОРАЗОВИМ ПЕРШИМ СТУПЕНЕМ

Проведено порівняльний аналіз вартісних показників ракети-носія з одноразовим і багаторазовим першим ступенем. Отримано співвідношення, які зв'язують вартість пуску з вартостями основної конструкції, рушійної установки, системи керування, відновлення першого ступеня і кратністю її використання. На прикладі модельної ракети-носія розраховано вартість пуску залежно від кратності використання першого ступеня. Наведено якісний аналіз допущень, які використовувалися в цих розрахунках. Показано, що для кожного варіанта поєднань вартості складових частин ракети і витрат на відновлення є оптимальна кратність використання першого ступеня. Подальше збільшення кратності використання не дає значущого економічного ефекту з точки зору зниження вартості пуску, але збільшує одноразові витрати на розробку і відпрацювання складових частин, що допускають багатократне використання.

Ключові слова: багаторазовий перший ступінь, оцінка вартісних показників, аналіз вартості, конкурентоспроможність, вартість пускових послуг, вартість ракети-носія.

A. P. Kushnariov, V. N. Pysnniev,
M. A. Degtyarev, A. V. Demchenko

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine

ASSESSMENT OF COST INDEXES FOR LAUNCH VEHICLE WITH REUSABLE LOWER STAGE

We conduct a comparative analysis of cost indexes for launch vehicle with the expendable and reusable lower stage. The obtained relations connect the cost of launch with the costs of the rocket core construction, propulsion system and control system, recovery of the lower stage and the multiplicity of its use. The cost of the launch depending on the multiplicity of utilizing the lower stage was estimated for a model launch vehicle. We give also a qualitative analysis of the assumptions applied in these calculations. It is shown that for each combination of the cost of rocket components and expenses for recovery of the lower stage, there is an optimal multiplicity of its use. Further increase in the multiplicity of its launch does not show a significant economic effect in terms of reducing the cost of the launch, but increases one-time expenses for the development and working out of reusable components.

Keywords: reusable lower stage, assessment of cost indexes, analysis of cost, competitiveness, cost of launch services, launch vehicle cost.