

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С МНОГОРАЗОВЫМИ БЛОКАМИ ПЕРВЫХ СТУПЕНЕЙ

© 2010 Ю. А. Советкин, Д. В. Щербина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Представлена методика оценки технико-экономической эффективности создания ракет-носителей с многоразовыми блоками первых ступеней.

Ракета-носитель, первая ступень, блок, многоразовое использование, технико-экономическая эффективность, методика.

Идея повторного или многоразового использования блоков первых ступеней ракет-носителей (РН) возникла после того, как корабли флота США стали вылавливать в Атлантическом океане отработавшие блоки первых ступеней (ускорителей) различных РН (Титан-II, Атлас-Кентавр и других), а в СССР группы по утилизации упавших блоков находили в районах падения с песчаной местностью почти «целые» боковые блоки от РН семейства Р-7А [1, 2].

Исследования состояния этих блоков позволили сделать вывод о том, что если части РН могут случайно возвращаться на землю или воду не разрушаясь, без принятия каких-либо специальных мер по их защите от разрушения, то, по-видимому, небольшая модификация конструкции РН может обеспечить целостность её возвращения, в том числе и сохранность дорогостоящих двигателей.

В 1970-годы американские специалисты фирмы «Боинг» исследовали возможность спасения и многоразового использования ступеней РН «Сатурн-V»: первой ступени S-1С с парашютной системой посадки на водную поверхность; третьей ступени S-IVB в трех вариантах – посадка в океан без парашютной системы, с парашютной системой, посадка на землю с парашютной системой и комплексом посадочных устройств (тормозной двигатель, «ноги» и т.д.). Ни один из вариантов не был реализован, поскольку изменения конструкции спасаемого блока привели бы к ухудшению лётных характери-

стик РН вследствие увеличения массы и установки дополнительного оборудования [2].

В СССР в 1971-1973 гг. была проведена научно-исследовательская работа по теме «Подъём» [1]. Посадка спасаемых блоков предусматривалась только на землю в районах их падения при пусках с полигонов Байконур и Плесецк.

Самым значительным исследованием, повлиявшим на внешний облик ракетно-космического комплекса «Энергия-Буран», стала опытно-конструкторская работа по разработке многоразовости его блоков «А».

Исследования привели к таким выводам.

1. Спасение и многоразовое использование составных частей РН возможно реализовать только для блоков первых ступеней.

2. Предполагаемые к многоразовому использованию блоки первых ступеней РН могут являться либо составными частями одноразовых РН традиционных конструктивно-компоновочных схем (блоки А «Энергии», универсальный ракетный модуль «Ангары»), либо блоками, сразу проектируемыми под многоразовое использование (модули «Ангары» с парашютным подхватом, или с блоками «Байкал»; блоки «А», предполагавшиеся к разработке по теме «Подъём»).

3. Многоразовое использование блоков первых ступеней может быть реализовано только за счёт уменьшения массы полезного груза.

4. Установка спасённого блока в составе РН для повторного пуска возможна толь-

ко после подтверждения всех его технических характеристик, предусмотренных по технической документации на блок перед его первым пуском.

5. Как и любой проект, многоразовость требует проведения научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (возможны и фундаментальные исследования), и, следовательно, соответствующих затрат времени и средств.

6. Реализация многоразовости целесообразна при получении какого-то эффекта: научного, производственного, экономического, социального, экологического, политического. В настоящей статье рассмотрены основные положения методики определения технико-экономического эффекта и выработанные на его основе рекомендации о целесообразности реализации многоразовости блоков первых ступеней на РН исследованных проектов.

7. Критической особенностью эффективности многоразовости является то, что затраты на её разработку проводятся на инвестиционной фазе проекта, а выгоды от реализации предполагается получать на эксплуатационной фазе, длящейся не менее 10-15 лет. Поэтому если Головное конструкторское бюро и Головной сборочный завод не входят в организацию типа холдинга, то экономическая эффективность реализации многоразовости может быть и нулевой.

8. Реализация многоразовости на боковых ускорителях проведена на американской ракетно-космической системе (РКС) «Space Shuttle» и французской РН «Arian-5». Обстоятельствами, обусловившими реализацию многоразовости, явились: посадка блоков на воду, твёрдотопливная двигательная установка на ускорителях, элементарная парашютная система спасения, проведение ремонтно-восстановительных работ на предприятиях-изготовителях.

9. В силу географического расположения стартов российских РН, районов падения отработавших блоков первых ступеней, приходящихся только на земную поверхность, и подавляющего числа РКС, использующих в качестве блоков первых ступеней блоки с жидкостными ракетными двигателя-

ми, реализация многоразовости в России находится пока на уровне НИР, в лучшем случае – на уровне разработок эскизных проектов.

Формирование методики расчета технико-экономической эффективности основано на традиционной схеме сравнения одно-разовых и многоразовых блоков по всем сходствам и различиям.

Технические отличия многоразового блока от одноразового

Конструктивные:

– если под многоразовость дорабатывается блок реально функционирующей РН, то доработка состоит в установке на этот блок элементов системы спасения (СС) и доработке самого блока в местах установки элементов СС. Блок совместно с СС должен пройти экспериментальную и комплексную наземную экспериментальную отработку и летные испытания;

– если блок сразу проектируется под многоразовость, то расчётной альтернативой ему становится одноразовый блок, который выполняет свои функции только на активном участке полёта первой ступени РН.

Функциональные:

– одноразовый блок после окончания функционирования в составе первой ступени РН отделяется от верхних блоков и в неуправляемом баллистическом полёте падает в расчётный район приземления;

– многоразовый блок первой ступени после отделения от верхних блоков ракеты носителя должен совершать примерно такие эволюции:

- быть застabilизирован в движении по баллистической траектории падения, что способствует сокращению площади района приземления;

- застabilизированное движение должно предусматривать характер движения, чтобы обеспечивать преодоление нагрева конструкции блока;

- для блоков, предусматривающих подхват вертолётном в воздухе, или посадку в районе падения, при достижении определённой скорости вводят в действие сверхзвуковой тормозной парашют, а при достижении дозвуковой скорости – основной каскад па-

рашютной системы. На расчётной высоте блок подхватывается вертолётном и транспортируется к месту старта. Блок, предусматривающий посадку на землю, продолжает управляемый спуск;

• блоки самолётного типа («Байкал») в расчётной точке включают авиационный двигатель и возвращаются к месту старта с посадкой на взлётно-посадочную полосу.

Эксплуатационные отличия:

– одноразовый блок после штатного использования и приземления утилизируется;

– многоразовый блок после штатного использования возвращается к месту старта или после приземления в районе посадки доставляется на техническую позицию стартового комплекса.

Все показатели, используемые при разработке методики, и рекомендуемые их значения взяты из используемых источников или из открытых данных отдельных отечественных проектов и сведены в табл. 1.

Проведём анализ формулы полной эффективности от многоразового использования блоков первых ступеней [1]:

$$Э \text{ полная} = M (N_I - DN_{\text{МН}} + Q - R) \quad (1)$$

Рассмотрим отдельные составляющие (1):

$$M = \gamma \lambda Ц,$$

где γ – доля стоимости блока первой ступени от стоимости РН, λ – коэффициент уменьшения стоимости изготовления первого серийного образца относительно стоимости опытного, $Ц$ – стоимость опытного образца всей РН.

Эти параметры являются факторами масштабности абсолютной величины экономии на штатной программе изготовления и пусков за счёт многоразовости блоков первых ступеней.

Величина $N_I = (X_I t)^\beta / \beta$ зависит от годовой программы X_I изготовления одноразовых блоков; времени t , в течение которого они будут изготавливаться, и коэффициента динамики стоимости β . Значения этих величин устанавливаются по ТТЗ и «нише» пусков и определяются техническими специалистами с учётом динамики стоимости.

Величина $D = (1 + \delta)(1 + \epsilon)$ зависит от относительного увеличения стоимости δ одноразового блока при его доработке под многоразовость и от относительного увеличения стоимости ϵ многоразового блока за счёт проведения ремонтно-восстановительных работ. Значения этих величин определяются экспертами.

Величина $N_{\text{МН}} = [(X_I / n_{\text{ср}} + \eta + \theta) t]^\beta / \beta$ определяет требуемое количество многоразовых блоков. Все параметры устанавливаются проектантами, конструкторами и экспертами. Значение $n_{\text{ср}}$ рассчитывается. Значения η и θ имеют долю произвола.

Величина $Q = (1 + \delta/2) (q_1 + q_2) t$ назначается только проектантами или экспертами Главных институтов из-за отсутствия статистических данных.

Все составляющие $R = \delta N_\Sigma / \lambda$ не затрагивают «чисто» экономических величин.

Значение N_Σ (по таблице $N_{\text{сумм}}$) при согласовании вызывает существенные разногласия.

Анализ приводит к «парадоксальным» выводам.

1. Эффективность многоразового использования блоков первых ступеней РН в первую очередь зависит от корректного назначения техническими специалистами подавляющего большинства всех относительных коэффициентов, не имеющих подтверждения практической реализацией многоразового использования этих блоков.

2. Абсолютные значения стоимостей изготовления РН и блоков первых ступеней играют только масштабирующую роль, их влияние учтено в относительных коэффициентах изменения стоимости, назначенных экспертами.

Это объясняется тем, что в России ни один из проектов, предполагавших многоразовое использование блоков первых ступеней, так и не дошёл до лётных испытаний. Поэтому отсутствует статистика по технике и экономике, а все методики имеют только проектный характер.

Приведенные в [1] расчёты с установленными экспертирующими организациями относительными коэффициентами привели к таким результатам:

Таблица 1

Учитываемый фактор традиционных параметров одноразового блока или появления новых обстоятельств, вызванных многоразовостью блоков первых ступеней ракет-носителей	Параметр		Чем установлено или кем рекомендовано
	Обозначение	Рекомендуемое значение	
Надёжность запуска РН в целом	$P_{РН}$	По ТТЗ	ТТЗ, КД
Надёжность работы системы спасения до момента подхвата, посадки или включения двигателя возвращения	$P_{СС}$	По ТТЗ	ТТЗ, КД
Надёжность подхвата, посадки или возвращения	$P_{посадки}$	По ТТЗ	ТТЗ, КД
Вероятность благоприятной погоды	$P_{погоды}$	0.95	ЦПИ-20
Ресурс многоразового блока	Res	10-15	По нормам проектирования
Средняя кратность использования многоразового блока в составе своего носителя с учётом возможности установки блока и на вторую ступень	n_{cp}	Рассчитывается по специально разработанной программе Prog 2A, приведенной в [1]	
Стоимость изготовления ракеты-носителя в целом	Ц	Факт	КД + «Агат»
Годовая программа пусков РН	X	Рыночная ниша по маркетинговым исследованиям	
Доля стоимости блоков первой ступени в стоимости всей РН	γ	Факт	КД + «Агат»
Коэффициент перехода от стоимости опытного образца к стоимости первого серийного	λ	Факт	КД + «Агат»
Относительное увеличение стоимости изготовления одноразового блока при «превращении» его в многоразовый	δ	0.25-0.3	ЦНИИМАШ + Агат
Доля конструктивной доработки блока под многоразовость	$\delta/2$	0.125-0.15	ЦНИИМАШ + Агат
Доля систем спасения в многоразовом блоке	$\delta/2$	0.125-0.15	ЦНИИМАШ + Агат
Увеличение стоимости многоразового блока за счет ремонтно-восстановительных и профилактических работ и проведения огневых технологических испытаний	ε	0.25	РКК «Энергия», ЦНИИМАШ, Агат, «Моторостроитель»
Годовое количество многоразовых блоков, устанавливаемых на вторые ступени для одноразового использования	q	Устанавливается по нише пусков всех входящих в семейство РН	
Годовая программа изготовления одноразовых блоков с учётом возможности их установки на вторую ступень	X_1	Вычисляется по нише пусков всех входящих в семейство РН	
Годовая программа изготовления многоразовых блоков	$\sum X_{i1} / n_{ср1}$	Вычисляется	
Число блоков, стоимость изготовления которых компенсирует затраты на аренду земли под посадку блоков	η	1	ЦНИИМАШ + Агат
Число блоков, стоимость изготовления которых компенсирует затраты на потерю массы полезного груза	θ	1-3	Принимается по конкретным проектам
Расчётное число годовой программы изготовления многоразовых блоков	$\sum X_{i1} / n_{ср1} + \eta + \theta$	Вычисляется	
Коэффициент освоения производства в процессе серийного изготовления на основе обработки статистики завода «Прогресс»	p	Вычисляется по аналитической формуле $P = 1 - 4 \cdot 10^{-5} X(120 - X)$	
Показатель динамики стоимости	α	Вычисляется: $\alpha = -\ln p / \ln 2$	
Коэффициент динамики стоимости	β	Вычисляется: $\beta = 1 - \alpha$	
Эквивалент разработки	$N_{сумм}$	Принимается по таблицам из [1]	
Время, после которого эффективность неотрицательна	t	Искомый параметр	

Аббревиатуры, применённые в таблице, имеют такие расшифровки:
ТТЗ – тактико-техническое задание; КД – конструкторская документация;
ЦПИ-20 – Центральный проектный институт Министерства обороны;
Агат – ФГУП «Организация Агат»;
ЦНИИМАШ – ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»;
РКК «Энергия» – ОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия»;
Моторостроитель – ОАО «Моторостроитель»;
Прогресс – завод, входящий в ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

В варианте «Ангары» с парашютным подхватом условие полной эффективности (Δ полная > 0) достигается через 4 месяца после начала штатной программы.

В варианте темы «Подъём» условие эффективности многоразовости достигается через год после начала штатной программы.

В варианте семейства «Ангары» с многоразовым ракетным ускорителем «Байкал» условие эффективности не достигается для любого времени.

Установление новой рыночной ниши пусков может изменить время t , после которого наступает эффективность.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что теоретически многоразовое применение блоков первых ступеней ракет-носителей, не использующих самолётные принципы посадки, может дать определённые экономические выгоды.

Библиографический список

1. Оценка эффективности многоразовости ступеней и предложения по вариантам

многоразовой ракетно-космической системы: Научно-технический отчёт по теме «Магистраль-6-3-ЦСКБ», 2007 / Самарский государственный аэрокосмический университет. - Самара: СГАУ, 2007. - 168 с. № государственной регистрации 353П-000-32223-1151.

2. Боно Ф., Готланд К. Перспективы освоения космоса. - Лондон, 1969 / Сокр. пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1975. - 216 с.

References

1. Estimation of efficiency of multiple-usage stages and proposals concerning variants of a reusable space-rocket system: Report on the subject "Magistr al-6-3-TsSKB", 2007 / Samara State Aerospace University. - Samara: SSAU, 2007. - 168 p. State Register No. 353P-000-32223-1151.

2. Bono, F., Gotland K. Frontiers of space (Prospects of space exploration). - London/ Abridged translation from English. - Moscow: "Machinostroyeniye", 1975. - 216 p.

ASSESSMENT OF TECHNICAL AND ECONOMICAL EFFICIENCY OF DEVELOPING CARRIER ROCKETS WITH FIRST-STAGE REUSABLE UNITS

© 2010 Yu. A. Sovetkin, D. V. Shcherbina

Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper presents a method of assessing technical and economical efficiency of developing carrier rockets with first-stage reusable units.

Carrier rocket, first stage, unit, multiple use, technical and economical efficiency, method.

Информация об авторах

Советкин Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры организации производства, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: ракетостроение. E-mail: sovetkin@smrk.ru, sovetkin@bk.ru.

Щербина Дарья Владимировна, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), ассистент кафедры «Технология машиностроения» филиала Самарского го-

сударственного технического университета в г. Сызрани. Область научных интересов: технология машиностроения.

Sovetkin Yuri Alexandrovitch, doctor of technical science, professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), sovetkin@bk.ru. Area of research: spacecraft engineering.

Shcherbina Darya Vladimirovna, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), assistant of the department “Mechanical engineering technology”, Syzran branch of Samara State Technical University, sovetkin@smrk.ru. Area of research: technology of mechanical engineering.