

Анализ чувствительности экономической модели затрат жизненного цикла многоразовой системы воздушного старта

© Г.А. Бадиков, П.С. Орлов, К.В. Кулеш

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В ближайшие годы ряд компаний (например, SpaceX) собираются запустить несколько тысяч малых спутников для обеспечения доступа к высокоскоростному Интернету в любой точке Земли. Это поднимет спрос на системы воздушного старта с полезной нагрузкой 300...500 кг. Разработана комплексная экономическая модель затрат жизненного цикла многоразовой системы воздушного старта, позволяющая выбрать параметры системы, обеспечивающие ее окупаемость. Моделирование затрат на запуск ракет-носителей Minotaur (запуск с Земли) и Pegasus-XL (воздушный старт) показало, что система воздушного старта позволяет сократить приблизительно на 40 % затраты на запуск ракет-носителей. Анализ чувствительности модели показал, что к большинству исходных данных модель малочувствительна. Высокую чувствительность модель показала к скорости (проценту) кривой обучения изготовлению ракеты-носителя и среднюю к стоимости изготовления первого экземпляра ракеты-носителя. Исследовано влияние этих исходных данных на изменение затрат воздушного старта и окупаемость инвестиционного проекта.

Ключевые слова: воздушный старт, ракета-носитель, снижение стоимости, методы анализа эффективности инвестиций, многоразовость, массовость производства, кривая обучения, чувствительность экономической модели

Введение. Идея запуска ракеты-носителя с воздушного судна не нова [1]. В СССР велись работы по созданию ракетоплана, запускаемого с самолета АН-225 (проект МАКС), разрабатывались проекты, связанные с запуском ракет-носителей с самолетов МиГ-31. В настоящее время воздушный старт является проверенным вариантом запуска малых спутников, используемым частными и государственными компаниями.

Ракета-носитель воздушного старта Pegasus-XL исправно выполняет задачи по доставке грузов на орбиту уже 20 лет [2–4]. Этот носитель запускается с помощью самолета Stargazer LH-1011. Воздушный старт имеет большие преимущества перед традиционным запуском: ракета-носитель может совершать дополнительные маневры, расширяя возможные орбиты выведения, обладает начальной высотой 8...10 км и скоростью около 800 км/ч.

Примером неугасающего интереса к данной идее является работа над самолетом Stratolaunch Model 351. Предполагается 12 запусков в год, а также запуск спутника в течение считанных месяцев с момента

подачи заявки. Stratolaunch Model 351 пока еще только тестируется на взлетной полосе, но на 2020 год уже запланирован запуск трех ракет-носителей Pegasus-XL с помощью этого самолета. На текущий момент за всю историю воздушного старта ракета-носитель Pegasus-XL была запущена 42 раза. Если первые запуски стоили 13 млн долл., то последний обошелся НАСА в 56 млн долл. Так как полезная нагрузка составляет 450 кг, стоимость выведения 1 кг на околоземную орбиту составит от 28,9 до 124,4 тыс. долл. Это слишком дорого для коммерческого использования. Нужна такая система воздушного старта, которая окупается за 3–5 лет и в дальнейшем приносит прибыль.

На основе [5–8] разработана экономическая модель затрат жизненного цикла системы воздушного старта, позволяющая выбрать параметры системы, обеспечивающие ее окупаемость. Актуальной задачей является определение чувствительности модели к отклонениям входных величин. Анализ чувствительности позволяет выявить входные переменные, изменения которых создают наибольшие изменения в затратах на запуск ракеты-носителя.

Цель работы. Проанализировать чувствительность экономической модели затрат жизненного цикла многократной системы воздушного старта. Провести сравнительное моделирование затрат на запуск современных ракет-носителей: Minotaur, которая стартует традиционным запуском с Земли, и Pegasus-XL (воздушный старт). Результаты моделирования затрат использовать в качестве исходных данных анализа чувствительности.

Экономическая модель. На основе агрегатного метода расчета издержек, методов анализа эффективности инвестиций и представлений о кривой роста производительности (кривой обучения) разработана комплексная модель затрат жизненного цикла многократной системы воздушного старта. Модель применима как на начальной стадии периода эксплуатации с целью определения эффективной стоимости запуска, так и в процессе эксплуатации, что позволяет учесть фактические затраты прошлых периодов и скорректировать стоимость будущих запусков. В модели естественным образом учитываются затраты на модификацию ракеты-носителя.

Затраты на запуск одноразовой ракеты-носителя (C_3) с самолета определяются как сумма затрат на покупку и модернизацию самолета [9] и разработку ракеты-носителя, на изготовление одного ее экземпляра [10], обеспечение подготовки и выполнение полета, на ремонт, утилизацию и страхование:

$$C_3 = C_p + C_{и} + C_{п} + C_{рем} + C_y + C_c, \quad (1)$$

где C_p — часть затрат на покупку, модернизацию самолета и разработку ракеты-носителя, возвращаемых после запуска; $C_{и}$ — затраты на изготовление ракеты-носителя; $C_{п}$ — затраты на обеспечение подготовки и выполнение полета; $C_{рем}$ — затраты на ремонт; C_y — затраты на утилизацию; C_c — затраты на страхование.

Возврат затрат на покупку, модернизацию самолета и разработку ракеты-носителя. Пусть k — число лет фактического использования (эксплуатации) ракеты-носителя. Тогда перед началом использования при $k = 0$ затраты на покупку, модернизацию самолета и разработку определяются с помощью метода аннуитета:

$$C_p = C_1 = C_0 \left[i / \left(1 - (1+i)^{-N} \right) \right] / L_{1,пл}, \quad (2)$$

где C_0 — все затраты на покупку, модернизацию самолета и разработку ракеты-носителя до начала использования системы; i — процентная ставка инвестиционного проекта; N — число лет, в течение которых планируется возврат всех затрат; $L_{1,пл}$ — количество запланированных запусков в год.

В формуле (2) предполагается постоянство величин i и L на протяжении всего периода N . Затраты на модификацию ракеты-носителя также нигде не учитываются. Через k лет эксплуатации, где $1 \leq k \leq N-1$, будут известны фактическое количество запусков в эти годы $L_1, L_2, \dots, L_k, 1 \leq m \leq k$, и затраты на модификацию $S_1, S_2, \dots, S_k, 1 \leq m \leq k$. Тогда возврат затрат на разработку с каждого запуска начиная с $(k+1)$ -го года будет составлять

$$C_{k+1} = \frac{1}{L_{k+1,пл}} \frac{i [C_0 (1+i)^k + \sum_{m=1}^k (S_m - C_m L_m) (1+i)^{k-m}]}{1 - (1+i)^{-(N-k)}}, \quad (3)$$

где C_m — возврат затрат в m -й год за один запуск; m — номер года, пробегающий значения от 1 до k ; $L_{k+1,пл}$ — планируемое число запусков на $(k+1)$ -й год.

Затраты на изготовление ракеты-носителя. Эти затраты определяются по кривой обучения изготовлению (роста кривой производительности), которая показывает сокращение суммарных затрат на изготовление t экземпляров ракет-носителей начиная с самого первого:

$$C_{и} = Z_1 t^B; \quad B = 1 - \ln(100\% / S\%) / \ln 2, \quad (4)$$

где Z_1 — затраты на изготовление первого экземпляра ракеты-носителя; $S\%$ — процент кривой обучения изготовлению, обычно

выбирается значение 95 % для менее 10 единиц продукции, 90 % для 10–50 единиц и 85 % для 50 или более единиц.

Как правило, ракета-носитель создается для осуществления более 50 пусков. Будем считать, что $S\% = 85\%$. Тогда

$$C_{и,t} = \text{Средняя стоимость } t \text{ единиц} = Z_1 t^B / t. \quad (5)$$

Изменение затрат на изготовление в связи с модификацией ракеты-носителя в (5) тоже не учитывается. Примем, что P_1, P_2, \dots, P_k , $1 \leq m \leq k$, — дополнительные затраты, связанные с модификацией ракеты-носителя в 1-, 2-, ..., k -й год эксплуатации. Тогда затраты на изготовление ракеты-носителя с номером t будут составлять

$$C_{и,t} = \text{Средняя стоимость } t \text{ единиц} = (Z_1 + \sum_{m=1}^k P_m) t^B / t. \quad (6)$$

Операционные затраты на подготовку и выполнение полета. Эти затраты определяются по кривой обучения. Аналогично затратам на изготовление затраты на подготовку и выполнение полета ракеты-носителя с номером t будут составлять

$$C_{п,t} = \text{Средняя стоимость } t \text{ единиц} = (Z_2 + \sum_{m=1}^k P_{1,m}) t^B / t, \quad (7)$$

где Z_2 — затраты на подготовку и выполнение полета первого экземпляра ракеты-носителя; $P_{1,m}$ — дополнительные затраты, связанные с модификацией ракеты-носителя.

Принимаем $S\% = 85\%$.

Затраты на ремонт. Необходимая сумма для выполнения всех технических регламентных работ для поддержания самолета в работоспособном состоянии составляет 0,5 млн долл. в первый год эксплуатации. В эту сумму входят затраты на необходимую диагностику и проверку, замену изношенных узлов и контроль всей аппаратуры. Затраты на ремонт определяются по кривой обучения. Практика ремонта транспортных средств показывает, что чем больше используется транспорт, тем больше затраты на ремонт, поэтому величина $S\%_{рем}$ равна 105 %. Затраты на ремонт самолета после запуска с номером t будут составлять

$$C_{р,t} = \text{Средняя стоимость } t \text{ единиц} = (Z_3 + \sum_{m=1}^k P_{2,m}) t^B / t, \quad (8)$$

где $Z_3 = 500\,000 / 48$ — затраты на ремонт самолета после первого полета; $P_{2,m}$ — дополнительные затраты, связанные с модификацией системы.

Затраты на утилизацию. Затраты на утилизацию ступеней ракет, а также на дальнейшую утилизацию самолета по истечении срока службы изделия примем равными 30 тыс. долл. с каждого запуска.

Затраты на страхование. C_y -оценка страховой суммы запуска разделена на две составляющие. Первая часть заключается в страховании ракеты в размере 7 % от стоимости изготовления ракеты-носителя при одном запуске. Вторая часть страховой суммы состоит из ежегодного 7 %-ного взноса от стоимости самолета, которая делится на количество запусков в год. Таким образом, $I\% = 7\%$.

Моделирование затрат на запуск современных ракет-носителей Minotaur и Pegasus-XL

Выбор ракет-носителей для моделирования. На основе опыта сравнительного моделирования [8] были выбраны ракеты-носители: Minotaur, которая стартует традиционным запуском с Земли, и Pegasus-XL (воздушный старт). Большое влияние на выбор оказала доступность исходных данных [11]. В табл. 1 представлены данные о количестве запусков в год Pegasus-XL и Minotaur и о цене запусков Pegasus-XL. Данные о цене запусков Minotaur недоступны.

Таблица 1

Количество запусков ракет-носителей в год

Год	Запуск Pegasus-XL	Цена запуска Pegasus-XL, млн долл.	Запуск Minotaur
1996	5 (1)	—	—
1997	5	13	—
1998	6	—	2
1999	3	12	1
2000	2	15	4
2001	0	—	2
2002	1	—	3
2003	4	14	—
2004	0	—	1
2005	1	—	2
2006	1	—	2
2007	1	—	3
2008	2	16	1
2009	0	—	2
2010	0	—	3
2011	0	—	5
2012	1	—	—
2013	1	—	2
2014	1	40	—
2015	1	—	—
2016	1	—	—
2017	1	56	2

Примечание. В скобках указаны неудачные запуски

Анализ данных табл. 1 показывает, что спрос на запуски Pegasus-XL и Minotaur снижается. Это объясняется высокой стоимостью выведения 1 кг полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту: для Pegasus-XL — от 28,9 (13 млн долл. делим на 450 кг) до 124,4 тыс. долл. (18 млн долл. делим на 450 кг); для Minotaur — больше 120 тыс. долл.

Предлагается система воздушного старта, удобная для коммерческого использования. Первоначальные капитальные затраты на разработку системы, составляющие 400 млн долл., будут возвращены в приемлемые для инвестора сроки 3–5 лет, и далее система будет приносить прибыль. Разработанная математическая модель позволяет определить ключевые параметры такой системы.

Эффективность инвестиционного проекта и срок окупаемости. Эффективность оценивается по NPV (чистому приведенному потоку платежей):

$$NPV_k = -A_0 + \sum_{n=1}^k \frac{\sum_{j=48(n-1)+1}^{48n} (P_j - C_{и,j} - C_{п,j} - C_{рем,j} - C_{у,j} - C_{с,j})}{(1+i)^n}, \quad (9)$$

где k — номер года, для которого рассчитываем NPV_k ; A_0 — стоимость разработки; j — номер запуска в k -м году; P_j — цена j -го запуска; $C_{и,j}$, $C_{п,j}$, $C_{рем,j}$, $C_{у,j}$, $C_{с,j}$ — затраты одного запуска по модели; i — ставка инвестиционного проекта (7 %).

Инвестиционный проект будет эффективным, если чистый приведенный поток платежей принимает положительные значения. При стоимости разработки $A_0 = 400$ млн долл., цене каждого запуска $P = 12$ млн долл., длительности инвестиционного проекта $k = 10$ лет, ставке инвестиционного проекта $i = 7$ % чистый приведенный поток платежей за весь проект составляет

$$NPV_{10} = -400 + 1418,2 = 1018,2 \text{ млн долл.}$$

Окупаемость достигается в середине четвертого года:

$$NPV_4 = -400 + 452,7 = 52,7 \text{ млн долл.}$$

Исходные данные для моделирования. Источником исходных данных модели послужили договорные цены на запуск ракет-носителей, страховые выплаты, закупочные цены на изготовление ракет-носителей и их компонентов. В табл. 2 приведены исходные данные, сформированные по выбранным ракетам-носителям.

Наибольшее техническое и конструктивное сходство наблюдается у представителей Minotaur и Pegasus-XL. Обе ракеты-носители являются разработкой компании Orbital ATK (США). В отличие от «воздушного» аналога Minotaur имеет четыре ступени, вторая ступень является первой ступенью ракеты-носителя Pegasus-XL. Массы ракет-носителей составляют 36 т Minotaur и 23 т Pegasus-XL соответственно.

Исходные данные ракет-носителей

Параметр	Pegasus-XL	Minotaur
Масса полезного груза, т	0,45	0,58
Стартовая масса, т	23	36
Общие затраты на разработку, млн долл.	400	400
Продолжительность инвестиционного проекта, год	10	10
Ставка проекта, %	7	3
Количество запусков в год, шт.	48	48
Кривая обучения, %	85	85
Затраты на изготовление первого экземпляра, млн долл.	20	40
Затраты на полет первого экземпляра, млн долл.	1,2	1,2
Затраты на ремонт первого экземпляра, млн долл.	0,0107	—
Кривая обучения ремонта, %	105	—
Затраты на утилизацию, млн долл.	0,03	0,05
Затраты на страхование, %	7	7

Затраты на запуск современных ракет-носителей. Сравнительное моделирование затрат на запуск современных ракет-носителей Minotaur, которые стартуют традиционным запуском с Земли, и Pegasus-XL (воздушный старт) показало, что система воздушного старта позволяет сократить приблизительно на 30 % затраты на запуск (рис. 1–3).

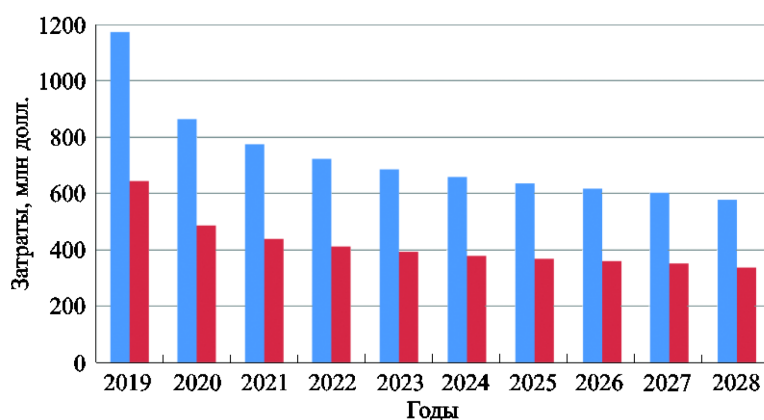


Рис. 1. Суммарные затраты на запуск:

■ — Minotaur; ■ — Pegasus-XL

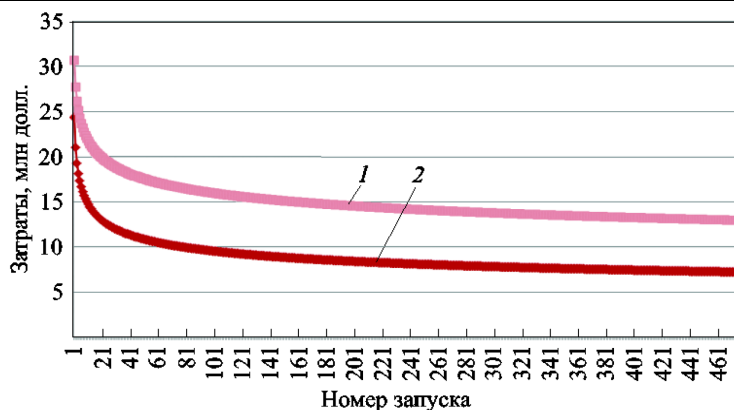


Рис. 2. Затраты на запуск Minotaur (1) и Pegasus-XL (2)

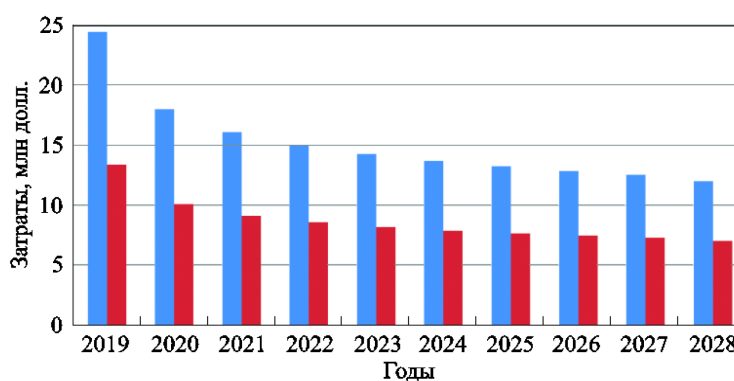


Рис. 3. Средние затраты на один запуск:
 ■ — Minotaur; ■ — Pegasus-XL

Чувствительность модели затрат на запуск ракет-носителей системы воздушного старта

Анализ чувствительности. После выполнения расчетов стоимости важно исследовать чувствительность результатов к отклонениям начальной стоимости для различных входных параметров. Такое исследование позволит разработчикам провести оптимизацию производства и эксплуатации ракет-носителей с целью уменьшения затрат [6].

Если рассматривать произвольные переменные отклика y_i к параметрам x_j , чувствительность модели затрат можно определить следующим образом:

$$S_j = \left. \frac{dy_i}{dx_j} \right|_{x_j} \frac{x_j}{y_j}, \quad (10)$$

где i — порядковый номер компонента, по которому рассчитывают чувствительность (процент кривой обучения, амортизация и т. п.);

j — порядковый номер суммы затрат (на разработку, полет, изготовление и страхование); dy_i — изменение i -й суммы затрат; dx_j — изменение j -го критерия.

Принято считать чувствительность слабой при $S_j < 0,3$; средней в случае $0,3 < S_j < 1$ и сильной, когда $S_j > 1$, замечая при этом, что отрицательное значение S_j указывает на уменьшение переменной отклика y_i с ростом параметра x_i .

Будем изменять по отдельности входные параметры в модели затрат и вычислять затраты на запуск ракеты-носителя. В качестве базового выбран расчет затрат на последний запуск в 2022 году, когда инвестиции полностью окупятся.

В табл. 3 приведены данные о базовых затратах для Pegasus-XL. Значения чувствительности модели затрат к параметрам ракеты-носителя Pegasus-XL представлены в табл. 4, где в первой графе в скобках приведены исходные входные значения, соответствующие базовым затратам, а в последней графе — полученное значение чувствительности, т. е. процентное изменение в общей стоимости, деленное на процентное изменение входных значений.

Таблица 3

Базовые затраты для ракеты-носителя Pegasus-XL, млн долл.

Разработка	Изготовление	Полет	Ремонт	Страхование	Утилизация	Итого
1,19	6,10	0,51	0,02	0,81	0,03	8,65

Таблица 4

Чувствительность модели затрат для ракеты-носителя Pegasus-XL

Параметр	Диапазон	Затраты, млн долл.							Чувствительность
		Разработка	Изготовление	Полет	Ремонт	Страхование	Утилизация	Итого	
$S\% = 90\%$ (было 85%)	85–95	1,19	9,26	0,51	0,02	1,03	0,03	12,04	6,647
$N = 12$ лет (было 10 лет)	10–12	1,05	6,10	0,51	0,02	0,81	0,03	8,52	0,079
$i = 11\%$ (было 7%)	3–15	1,42	6,10	0,51	0,02	0,81	0,03	8,88	0,046
$L_1 = 24$ запусков в год (было 48 запусков)	24–48	2,37	6,10	0,51	0,03	1,19	0,03	10,23	0,183

Параметр	Диапазон	Затраты, млн долл.							Чувствительность
		Разработка	Изготовление	Полет	Ремонт	Страхование	Утилизация	Итого	
$C_0 = 440$ млн долл. (было 400 млн долл.)	400–440	1,31	6,10	0,51	0,02	0,81	0,03	8,77	0,137
$Z_1 = 22$ млн долл. (было 20 млн долл.)	20–22	0,91	6,71	0,51	0,02	0,85	0,03	9,03	0,441
$Z_2 = 2,4$ млн долл. (было 1,2 млн долл.)	1,2–4,8	1,19	6,10	0,75	0,02	0,81	0,03	8,89	0,027
$I \% = 10 \%$ (было 7 %)	5–10	1,19	6,10	0,51	0,02	1,15	0,03	9,0	0,093
$C_y = 146$ тыс. долл. (было 30 тыс долл.)	30–220	1,19	6,10	0,51	0,02	0,81	0,15	8,77	0,004
$S_{\text{рем}} \% = 110 \%$ (было 105 %)	105–115	1,19	6,10	0,51	0,02	0,81	0,03	8,66	0,01

Обсуждение результатов. Модель показала высокую чувствительность к скорости (проценту) кривой обучения (6,65). Так, повышение скорости обучения на 10 % привело к увеличению затрат на запуск на 66,5 %. Это оправданно, так как кривая обучения отражает изменение многих элементов производства, например технологии изготовления, модернизации и массовости производства.

Среднюю чувствительность модель проявила к затратам на изготовление (теоретической) первой единицы продукции (0,44).

К остальным входным величинам модель оказалась малочувствительна.

Анализ чувствительности модели дает возможность расположить входные величины в порядке убывания их влияния на снижение затрат на запуск:

- скорость обучения;
- затраты на изготовление (теоретической) первой единицы продукции;
- число запусков в год;

- разовая разработка;
- процентная ставка;
- срок амортизации;
- процент страхования;
- стоимость операций полета.

Моделирование влияния скорости (процента) кривой обучения, к которой модель проявила высокую чувствительность. При изменении скорости (процента) кривой обучения от 85 через 90 до 95 % затраты на запуск увеличиваются (рис. 4). Так, на конец инвестиционного проекта они примут значения 7, 10 и 15 млн долл. соответственно.

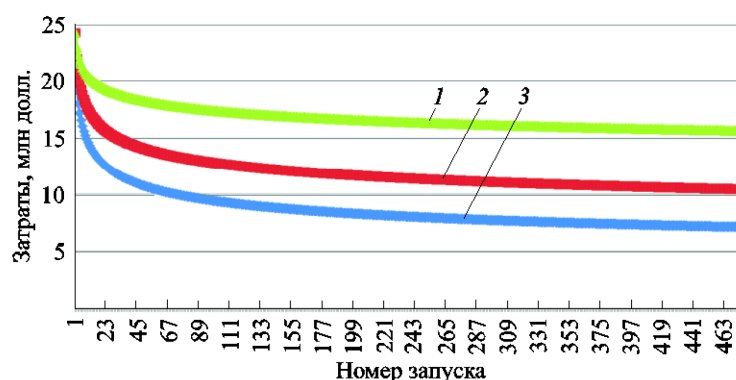


Рис. 4. Затраты на запуск Pegasus-XL при различных значениях скорости обучения:

1 — $S = 95\%$; 2 — $S = 90\%$; 3 — $S = 85\%$

Чистый приведенный поток платежей NPV уменьшается при изменении кривой обучения от 85 до 95 % (рис. 5). Он составляет 1018,2 млн долл. при 85 %, -25 млн долл. — при 90 %, -1667,3 млн долл. — при 95 %. Окупаемость при 85 % достигается в середине четвертого года, при 90 % — в середине одиннадцатого года, при 95 % окупаемость не будет достигнута когда-либо. Отрицательное значение NPV свидетельствует о неприемлемости инвестиционного проекта. Ситуацию может исправить увеличение поступлений, например, за счет повышения цены запуска. Экономическая модель позволяет подобрать цены: 30 млн долл. — для 95 %, 20 млн долл. — для 90 %. В этом случае проекты станут привлекательными для коммерческого использования.

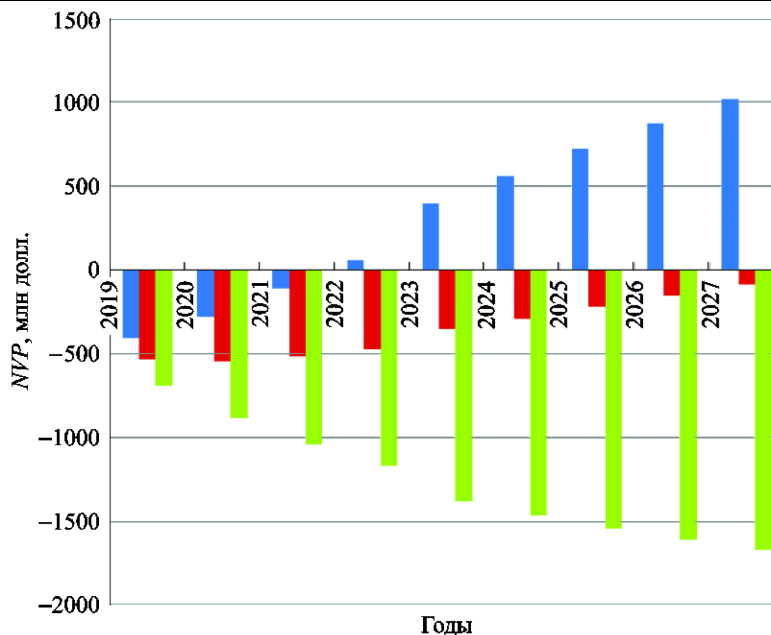


Рис. 5. Чистый приведенный поток платежей NPV для Pegasus-XL при различных значениях скорости обучения:
 ■ — $S = 85\%$; ■ — $S = 90\%$; ■ — $S = 95\%$

Моделирование влияния стоимости изготовления первого экземпляра, к которой модель проявила среднюю чувствительность. Затраты на запуск увеличиваются приблизительно на 1 млн долл. при увеличении стоимости изготовления первого экземпляра с 20 до 22 млн долл. На конец инвестиционного проекта затраты составят 7 и 8 млн долл. соответственно (рис. 6).

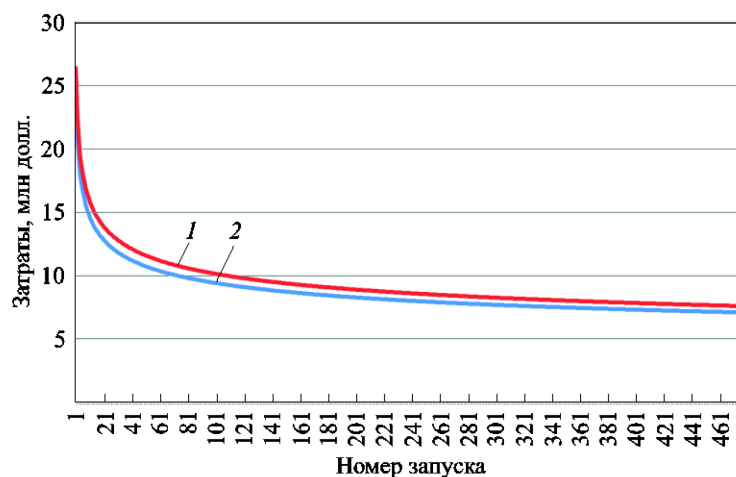


Рис. 6. Затраты на запуск Pegasus-XL при стоимости изготовления первого экземпляра 20 млн долл. (1) и 22 млн долл. (2) и скорости кривой обучения ремонта 85 %

Заключение. 1. Разработана экономическая модель затрат жизненного цикла системы воздушного старта, позволяющая выбрать параметры системы, обеспечивающие ее окупаемость.

2. Сравнительное моделирование затрат на запуск современных ракет-носителей Minotaur, которые стартуют традиционным запуском с Земли, и Pegasus-XL (воздушный старт) показало, что система воздушного старта позволяет сократить приблизительно на 30 % затраты на запуск.

3. Для системы воздушного старта высокую чувствительность модель показала к скорости (проценту) кривой обучения изготовлению ракеты-носителя и среднюю к стоимости изготовления первого экземпляра ракеты-носителя. К остальным параметрам модель оказалась малочувствительна.

4. Экономическая модель позволяет оценить эффективность инвестиционного проекта путем определения чистого приведенного потока платежей, а также окупаемости инвестиционного проекта.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Искушения воздушного старта*. URL: <https://habr.com/post/214335/> (дата обращения 04.04.2018).
- [2] *Pegasus User's Guide. April 2010. Release 7.0*. URL: http://www.georing.biz/usefull/Pegasus_UG.pdf (дата обращения 1.03.2018).
- [3] *Space Launch Report: Pegasus Data Sheet*. URL: <http://www.spacelaunchreport.com/pegasus.html> (дата обращения 3.03.2018).
- [4] Бадиков Г.А., Кеворков С.С. Тенденции развития рынка ракет-носителей. *Сб. науч. тр. VII Международного конгресса по контроллингу «Контроллинг услуг»*. Москва, НП «Объединение контроллеров», 2016, с. 25–28.
- [5] Бадиков Г.А., Зуев А.Г., Левашов Р.Д. Экономическое моделирование затрат на запуск ракеты-носителя. *Тр. секции 22 им. академика В.Н. Челомея Академических чтений по космонавтике «Ракетные комплексы и ракетно-космические системы. Проектирование, экспериментальная отработка, летные испытания, эксплуатация»*. Москва, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2017, с. 29–36.
- [6] Бадиков Г.А., Бурнашова Е.В., Левашов Р.Д. Анализ чувствительности экономической модели затрат на запуск современных ракет-носителей. *Тр. секции 22 им. академика В.Н. Челомея Академических чтений по космонавтике «Ракетные комплексы и ракетно-космические системы. Проектирование, экспериментальная отработка, летные испытания, эксплуатация»*. Москва, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2018, с. 27–39.
- [7] Wertz J.R. Economic Model of Reusable Vs. Expendable Launch Vehicles. *IAF Congress, Rio de Janeiro, Brazil Oct. 2–6, 2000*.
- [8] Бадиков Г.А., Бурнашова Е.В., Левашов Р.Д. Сравнительное моделирование затрат на запуск современных ракет-носителей. *Сб. науч. тр. VI Научно-практической конференции по контроллингу*. Москва, НП «Объединение контроллеров», 2017, с. 10–23.

- [9] *Стоимость разработки новых самолетов и ремоторизации существующих моделей.* URL: <https://expert.ru/ratings/stoimost-razrabotki-novyih-samoletoy-i-remotorizatsii-suschestvuyuschih-modelej/> (дата обращения 25.03.2018).
- [10] *Расчет стоимости производства, обслуживания и запуска ракет Falcon 9 и Falcon Heavy компании SpaceX.* URL: <http://www.astronews.space/spacecrafts-2/252-raschet-stoimosti-proizvodstva-obsluzhivaniya-i-zapuska-raket-falcon-9-i-falcon-heavy-kompanii-spacex> (дата обращения 12.03.2018).
- [11] *Ракета-носитель. Пегас-XL.* URL: <http://www.ecoruspace.me/%D0%9F%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D1%81+XL.html> (дата обращения 25.03.2018).

Статья поступила в редакцию 23.10.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бадиков Г.А., Орлов П.С., Кулеш К.В. Анализ чувствительности экономической модели затрат жизненного цикла многоэтапной системы воздушного старта. *Гуманитарный вестник*, 2018, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2306-8477-2018-12-581>

Бадиков Григорий Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры ИБМ-2 «Экономика и организация производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: grigori.badikov@rambler.ru.

Орлов Павел Сергеевич — студент группы АК1-111 МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: spamone@mail.ru.

Кулеш Константин Викторович — студент группы АК1-111 МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kulesh.kostya@mail.ru.

Sensitivity analysis of the economic model of life cycle costs of a reusable air start system

© G.A. Badikov, P.S. Orlov, K.V. Kulesh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In the coming years, a number of companies (for example, SpaceX) are planning to launch several thousand small satellites to provide high-speed Internet access anywhere in the world. As a result, the demand for air launch systems with a payload of 300...500 kg will increase. An economic model of the cost of the air start system life cycle allowing choosing the parameters of the system that ensure its payback was developed. Simulation of the cost of launching carrier rockets (CR) Minotaur and Pegasus-XL (air launch) showed that the air launch system can reduce the carrier rocket launch cost by approximately 40%. The sensitivity analysis of the model showed that the model is insensitive to most of the initial data. The model showed high sensitivity to the speed (percentage) of the learning curve for the production of CR and the average for the cost of manufacturing the first CR. The influence of these initial data on the change in air start costs and the return on investment project was investigated.

Keywords: *air launch, carrier rocket, cost reduction, investment analysis methods, reuse, production quantity, learning curve, economic model sensitivity*

REFERENCES

- [1] *Iskusheniya vozdušnogo starta* [Air start temptation]. Available at: <https://habr.com/post/214335/> (accessed April 4, 2018).
- [2] *Pegasus User's Guide. April 2010. Release 7.0.* Available at: http://www.georing.biz/usefull/Pegasus_UG.pdf (accessed March 1, 2018).
- [3] *Space Launch Report: Pegasus Data Sheet.* Available at: <http://www.spacelaunchreport.com/pegasus.html> (accessed March 3, 2018).
- [4] Badikov G.A., Kevorkov S.S. Tendentsii razvitiya rynka paket-nositeley [Development trends of the carrier rocket market]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 mezhdunarodnogo kongressa po kontrollingu "Kontrolling uslug"* [Proceedings of the 7th International Controlling Congress "Service Controlling"]. Falko S.G., ed. Moscow, NP "Obyedinenie kontrollerov" Publ., 2016, pp. 25–28.
- [5] Badikov G.A., Zuev A.G., Levashov R.D. Ekonomicheskoe modelirovanie zatrat na zapusk rakety-nositelya [Economic simulation of carrier rocket launch costs]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike "Raketnye komplekсы i raketno-kosmicheskie sistemy. Proektirovanie, eksperimentalnaya otrabotka, letnye ispytaniya, ekspluatatsiya"* [Proceedings of academician V.N. Chelomey section 22 of Academic readings on cosmonautics "Rocket systems and rocket-space systems. Design, experimental development, flight tests, operation"]. Moscow, JSC "MIC "NPO mashinostroyeniya" Publ., 2017, pp. 29–36.
- [6] Badikov G.A., Burnashova E.V., Levashov R.D. Analiz chuvstvitelnosti ekonomicheskoy modeli zatrat na zapusk sovremennykh raket-nositeley [Analysis of sensitivity of the economic model of current carrier rocket launch costs]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike "Raketnye komplekсы i raketno-kosmicheskie sistemy. Proektirovanie, eksperimentalnaya otrabotka, letnye ispytaniya, ekspluatatsiya"* [Proceedings of academician V.N. Chelomey section 22 of Academic readings

- on cosmonautics “Rocket systems and rocket-space systems. Design, experimental development, flight tests, operation”]. Moscow, JSC “MIC “NPO mashinostroenia” Publ., 2018, pp. 27–39.
- [7] Wertz J.R. *Economic model of reusable vs. expendable launch vehicles*. IAF Congress, Rio de Janeiro, Brazil Oct. 2–6, 2000.
- [8] Badikov G.A., Burnashova E.V., Levashov R.D. Sravnitelnoe modelirovanie zatrat na zapusk sovremennykh raket-nositeley [Comparative simulation of current carrier rocket launch costs]. *Sbornik nauchnykh trudov VI nauchno-prakticheskoy konferentsii po kontrolyu* [Proceedings of the VI Scientific Practical Conference on Controlling]. Falko S.G., ed. Moscow, NP “Obyedinenie kontrollerov” Publ., 2017, pp. 10–23.
- [9] *Stoimost razrabotki novykh samoletov i remotorizatsii sushchestvuyushchikh modeley* [The cost of developing new aircrafts and remotorizing existing models]. Available at: <https://expert.ru/ratings/stoimost-razrabotki-novyih-samoletov-i-remotorizatsii-suschestvuyushchih-modelej/> (accessed March 25, 2018).
- [10] *Raschet stoimosti proizvodstva, obsluzhivaniya i zapuska raket Falcon 9 i Falcon Heavy kompanii SpaceX* [Analysis of the cost of production, maintenance and launch of Falcon 9 and Falcon Heavy missiles of the company SpaceX]. Available at: <http://www.astronews.space/spacecrafts-2/252-raschet-stoimosti-proizvodstva-obsluzhivaniya-i-zapuska-raket-falcon-9-i-falcon-heavy-kompanii-spacex> (accessed March 12, 2018).
- [11] *Raketa-nositel. Pegas-XL* [Carrier rocket. Pegasus-XL]. Available at: <http://www.ecorospace.me/%D0%9F%D0%B5%D0%B3%D0%B0%D1%81+XL.html> (accessed March 25, 2018).

Badikov G.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Management, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: grigori.badikov@rambler.ru

Orlov P.S., student, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: spamone@mail.ru

Kulesh K.V., student, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: kulesh.kostya@mail.ru