УДК 053.401

Хужина Арина Радиковна,
студент,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ-РТФ),
Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург
Харисов Азамат Робертович,
кандидат технических наук, руководитель образовательной программы «Системы управления сложными объектами и процессами»,
Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург

ВОЗВРАЩАЕМЫЕ СТУПЕНИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ: ТЕХНОЛОГИИ, ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация: *В статье предусмотрены ключевые технологии возврата ступеней ракет-носителей, проанализирован опыт ведущих компаний (Space X, Blue Origin, Rocket Lab) и национальных космических программ. Описаны основные методы посадки, технические решения и инженерные вызовы. Показаны экономические и операционные преимущества многоразовых систем. Приведены перспективы развития технологии в контексте снижения стоимости космических запусков и расширения возможностей пилотируемых миссий.*

Ключевые слова: *возвращаемые ступени, многоразовые ракеты-носители, Falcon 9, Starship, вертикальная посадка, парашютно-реактивная система, снижение стоимости запусков, Space X, Blue Origin, Rocket Lab.*

Khuzhina Arina Radikovna,
student,
Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems,
Ural Federal University nfmed after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia, Yekaterinburg
Kharisov Azamat Robertovitch,
Candidate of Engineering Sciences,
Head of the Educational Program "complex objects and processes management systems",
Ural Federal University nfmed after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia, Yekaterinburg

Abstract: *The article examines key technologies of the recovery of rocket launch vehicle stages, analyzes the experience of leading companies (Space X, Blue Origin, Rocket Lab) and national space programs. Here described the primary landing methods, technical solutions, and engineering challenges. It demonstrates the economic and operational advantages of reusable systems. It presents the development prospects for the technology in the context of reducing the cost of space launches and expands the capabilities of crewed missions.*

Key words: *reusable stages, reusable launch vehicle, Falcon 9, Starship, vertical landing, parachute-rocket system, launch cost reduction, Space X, Blue Origin, Rocket Lab.*

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Проблема высокой удельной стоимости вывода полезной нагрузки (ПН) на целевые орбиты остаётся ключевым ограничивающим фактором

развития космической деятельности. Традиционные одноразовые ракеты-носители (РН) предполагают полную замену конструкционных элементов после каждого пуска, что обуславливает значительные эксплуатационные издержки.

1.2 Концепция возвращаемых ступеней РН направлена на радикальное снижение затрат за счёт:

– Повторного использования дорогостоящих компонентов (двигатели, топливные баки);

– Сокращения межполётного интервала подготовки;

– Накопления статистической базы эксплуатации для повышения надёжности.

Согласно современным оценкам, внедрение многоразовости способно снизить стоимость запусков на 30-60% при сохранении грузоподъёмности.

1.3 Цель исследования – провести комплексный анализ:

1. Технологических решений по возврату ступеней;
2. Опыта их практической реализации;
3. Экономических и операционных эффектов;
4. Перспектив развития в контексте глобальных космических программ.

2 ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВРАТА СТУПЕНЕЙ

2.1 Вертикальная посадка (Space X, Blue Origin)

2.1.1 Falcon 9 (Space X) – первая в мире серийно эксплуатируемая многоразовая первая ступень. Процесс возврата включает три ключевых этапа:

1. Boostback burn – включение трёх двигателей Merlin для коррекции горизонтальной скорости после отделения от второй ступени.

2. Reentry burn – повторное зажигание двигателей перед входом в плотные слои атмосферы ($\rho \approx 0{,}125$ кг/м^3) для снижения скорости до $\upsilon \leq 2$ км/с и контроля траектории.

3. Landing burn – финальное торможение до нулевой скорости в момент касания наземной посадочной площадки или плавучей платформы.

2.1.2 Starship и Super Heavy (Space X) – сверхтяжёлая система с многоразовой первой ступенью (Super Heavy):

– 33 двигателя Raptor на метане и кислороде;

– Посадка на стартовый стол или специализированные площадки;

– В испытаниях 2024 г. достигнуто мягкое приводнение первой ступени.

2.1.3 New Glenn (Blue Origin) – аналогичная вертикальная посадка, но с акцентом на возвращение на сушу.

2.2 Парашютно-реактивная система (Rocket Lab)

2.2.1 Компания Rocket Lab разработала и успешно применила гибридную парашютно-реактивную систему для возвращения первой ступени своей ракеты Electron.

После отделения от второй ступени на суборбитальное траектории первая ступень РН Electron выполняет пассивный аэродинамический разворот с целью ориентации для входа в плотные слои атмосферы.

2.2.2 Процесс разделён на три основных этапа:

1. Аэродинамическое торможение и стабилизация (снижение скорости с помощью парашюта);

2. Импульсивное реактивное гашение скорости (включение тормозных двигателей на финальной стадии);

3. Обеспечение плавучести и последующее извлечение;

2.2.3 Основным преимуществом парашютно-реактивной системы является её относительная простота и меньшая масса в сравнении с

системами, требующими сохранения значительного запаса топлива для управляемого полёта и посадки. Это позволяет минимизировать изменения в базовой конструкции ракеты-носителя и повысить её эффективность.

2.3 Горизонтальная посадка (крылатые ступени)

2.3.1 Наиболее масштабной реализацией концепции горизонтальной посадки являлись программы пилотируемых многоразовых транспортных космических систем Stuttle (NASA) и «Буран» (СССР), где в качестве возвращаемого элемента выступал орбитальный корабль-планировщик.

2.3.2 Процесс возвращения разбит на следующие фазы:

1. Баллистический спуск и вход в атмосферу;
2. Гиперзвуковой и дозвуковой планирующий полёт;
3. Заход на посадку и приземление.

2.3.3 Концепция горизонтальной посадки для возвращаемых ступеней, будучи технологически продемонстрированной в крупных программах, сталкивается с фундаментальным компромиссом между гибкостью возврата и массовой эффективностью. Её применение представляется наиболее оправданным для крупногабаритных верхних ступеней и космических кораблей, где масса крыла и теплозащиты составляет меньшую долю от общей массы конструкции.

3 НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

3.1 Россия («Роскосмос»)

3.1.1 Российская компания «Роскосмос» в рамках стратегии по снижению затрат на космические запуски и создания конкурентоспособной многоразовой техники ведёт разработку ракетного комплекса с возвращаемыми ступенями под неформальным названием «Кузнечик».

Проект направлен на создание отечественной технологии многоразового использования первых ступеней ракет-носителей.

3.1.2 Ключевые технологические решения:

1. Схема вертикальной посадки – принцип вертикального возврата и посадки первой ступени по аналогии с Falcon9.

2. Система управления и наведения – использование комбинированной системы, включающей:

– Инерциальную навигационную системы (ИНС);

– Спутниковую навигацию ГЛОНАСС.

3. Теплозащита – решение на основе керамических теплозащитных плиток, способных выдерживать температуры до 1600°C для защиты от тепловой нагрузки в плотных слоях атмосферы.

Таким образом, «Кузнечик» представляет собой адаптацию проверенной мировой концепции вертикальной посадки с применением российских технологических разработок.

3.2 Китай (CASC)

3.2.1 Ключевым проектом Китайской компании аэрокосмической науки и технологий (CASC) в этом направлении стала адаптация ракеты-носителя «Чанчжэн-8» (Long March 8) для возвращаемой первой ступени.

3.2.2. Ракета «Чанчжэн-8» изначально создавалась как экономичная и конкурентоспособная ракета среднего класса для запусков на солнечную орбиту. Её дизайн в многоразовой конфигурации предусматривает возврат связки первых ступеней и горизонтальную посадку на двигателях.

Для гашения основной скорости разрабатывается и испытывается гигантская парашютная система, ключевым элементов которой является парашют площадью около 800 м^2.

3.3 Европа (ESA)

3.3.1 Европейское космическое агентство (ESA) разработала ключевой проект – Callisto (Cooperative Action Leading to Launcher Innovation in Stage Toss-back Operations). Это суборбитальный летающий стенд-демонстратор, создаваемый совместно ESA, Немецким аэрокосмическим центром (DLR), Французским космическим агентством (CNES) и Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA). Его задача – доказать жизнеспособность европейских технологий вертикальной посадки в реальных условиях.

3.3.3 Основные характеристики:

1. Одноступенчатый демонстратор – вертикально взлетающая и вертикально приземляющаяся ракетная система;

2. Масштаб – высота около 13015 м, что существенно меньше коммерческих ракет и позволяет снизить затраты на испытания;

3. Двигательная установка- водородно-кислородный двигатель (более экологичный, но сложный в управлении для многоразового использования). Это обеспечивает отработку точного контроля тяги, необходимой для мягкой посадки.

3.3.4 Проект Callisto позволит Европе накопить собственный опыт в самой сложной части многоразовости – управляемом возврате. Его успех станет зелёным светом для интеграции этих технологий в будущие проекты с ракето-носителями.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

4.1 Ключевые проблемы реализации возвращаемых ступеней

4.1.1 Анализ эксплуатации многоразовых систем выявил пять фундаментальных технологических барьеров:

4.1.1.1 Массовый прирост конструкции:

а) Посадочные системы (рули, опоры, запас топлива) увеличивают сухую массу ступени на Δm = 15-20%;

б) Для Falcon9 это эквивалентно ≈6-8 т, что снижает полезную нагрузку (ПН) на $\Delta m_{пн} \approx$ 1,5-2,5 т;

в) Критический параметр: отношение массы посадочной системы к массе ступени $k_{пост} = m_{пост} / m_{ступ} \leq 0{,}12$.

4.1.1.2 Тепловые нагрузки при входе в атмосферу:

а) Пиковые температуры $T_{макс}$ = 1400-1600°C;

б) Тепловой поток q = 80-120 кВт/м^2;

в) Проблема неравномерного распределения температур вызывает термомеханические напряжения $\sigma_{терм} \geq$ 150 МПа.

4.1.1.3 Динамические нагрузки при посадке:

а) Вертикальное ускорение $a_z \leq 8g$ при касании;

б) Боковые смещения $\Delta x \approx$ 0,3-0,8 м из-за ветра;

в) Риск опрокидывания при угле наклона $\theta > 5°$;

4.1.1.4 Межполётное обслуживание:

а) Время обслуживания 7-14 суток (на примере Falcon9);

б) Ключевые моменты: дефектоскопия двигателей (рентген), замена теплозащитных плиток, калибровка инерциальных систем.

4.1.1.5 Атмосферные возмущения:

а) Влияние турбулентности $C'_L \approx 0{,}05$ при $Re > 10^7$;

б) Погрешность посадки $\sigma \approx$ 3-5 м без коррекции;

в) Сезонная изменчивость плотности воздуха $\delta_{p/p} \approx$ 5-8%;

4.2 Инженерные решения

4.2.1 Возможные возникающие сложности и возможные решения приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1.

Возникающие сложности и возможные решения

Ситуация	**Решение**
Оптимизация массы	Внедрение углеродопластиков – КМПМ (ρ = 1,6 г/см3, σразр > 2000 МПа), армированных непрерывными высокопрочными углеродными волокнами. Интеграция топливных баков и силовых элементов, при которой оболочки топливных баков (криогенных или для керосина) сами являются основным силовым элементом. Миниатюризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА).
Теплозащита	Пассивная теплозащита (с использованием керамических композиционных материалов). Абляционная теплозащита основана на фазовых и химических превращениях материала теплозащиты с его расходованием, сопровождающимся поглощением тепла. Активные системы охлаждения, основанные на отводе тепла от защищаемой поверхности с помощью рабочего тела.
Системы управления	Адаптивные PID-регуляторы с нейросетевой коррекцией. Многоантенные спутниковые системы навигации (GPS/ГЛОНАСС). Лидары для финального наведения (на заключительном этапе перед касанием).
Посадочные механизмы	Гидравлические амортизаторы с нелинейным демпфированием. Телескопические опоры с трёхпозиционной системой фиксации. Противоопрокидывающие алгоритмы коррекции вектора тяги.

6 ВЫВОДЫ

6.1 Возвращаемые ступени ракет-носителей представляют собой революционный шаг, сочетающий технологическую инновационность и

экономическую эффективность. Несмотря на существующие барьеры, их внедрение уже демонстрирует снижение стоимости запусков на ≈19-25%, увеличение частоты пусков в 2-3 раза, а также расширение доступности космоса для коммерческих и научных проектов.

6.2 Дальнейшее развитие этой технологии способно радикально изменить экономику космических полётов, открыв путь к устойчивому присутствию человечества за пределами Земли.

Использованные источники:

1. Стельмах С. Ф., Андронов В. Г., Коптев Д. С. «Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на примере ракеты-носителя FALCON 9 FT» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. — 2021. — Т. 11, №3. - С. 160–179.

2. Мошкин И. Ю., Мосейчук К. У., Чирков А. С., Биткин С. А. «Маршевый двигатель одноступенчатой многоразовой возвращаемой ракеты-носителя» // Межотраслевой научно-технический журнал «Конструкции из композиционных материалов». 2025. №2. С. 9–16.

3. К обоснованию выбора способа спасения блоков ракет носителей / А. С. Кретов, В. Н. Чижухин, М. М. Ковалевский, Ю. Г. Мехоношин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. №1. С. 3–11.

4. Коробочкин А. А. «Изучение подходов к возвращению летательного аппарата из космического пространства на Землю» // Современные научные исследования и инновации. 2023. №1.