

Оценка спроса на запуски малых космических аппаратов и его влияние на технический облик систем выведения

© Ю.А. Матвеев¹, А.А. Позин², М.И. Юрченко²

¹Московский авиационный институт, Москва, 125993, Российская Федерация

²НПО «Гайфун», Калужская обл., Обнинск, 249038, Российская Федерация

Рассмотрены подходы к оценке экономического эффекта, достигаемого за счет создания космического ракетного комплекса. Выполнено сравнение вариантов развития средств выведения космических аппаратов по затратам на реализацию выделенных фрагментов прогнозируемого космического грузопотока, который приведен к типовым орбитам и разделен между средствами выведения разных классов. Представлены методы оценки будущего спроса на запуски малых космических аппаратов, которые помогут разработчикам уменьшить трудозатраты при формировании вариантов технического облика малоразмерных средств выведения — ракет-носителей сверхлегкого класса. Изложены методы анализа средств выведения космических аппаратов, в том числе методы анализа иерархий для решения задач сравнения разных вариантов средств выведения. Показаны результаты поэтапного анализа некоторых эксплуатируемых ракетных систем и варианты построения возможных систем критериев их сравнения на основании ряда групповых и частных показателей, учитываемых в общей оценке средств выведения.

Ключевые слова: рынок пусковых услуг, ракетно-космическая техника, ракета-носитель сверхлегкого класса

Аббревиатуры

ЗПГ — зона полезного груза
КА — космический аппарат
МКА — малый космический аппарат
НОО — низкая околоземная орбита
ПГ — полезный груз
РКН — ракета космического назначения

РН — ракета-носитель
СВ — средство выведения
СЛК — сверхлегкий класс
ССО — солнечно-синхронная орбита
ТКС — транспортная космическая система
ТО — технический облик

Введение. Задачи сравнительного анализа ракетно-космической техники усложняются по мере роста числа учитываемых факторов, разветвления многоуровневой системы критериев сравнения, построенных на основе неравноценных показателей и характеристик, которые имеют разные типы шкал измерения, нечисловую природу, высокую неопределенность, не поддаются количественной оценке ввиду отсутствия адекватных математических моделей и трудоемкости эксперимента. В этих случаях при сравнении остается полагаться на опыт, интуицию, субъективные предпочтения экспертов и лица, принимающего решение [1].

Применение новых разрабатываемых методов можно продемонстрировать на примере сравнительного анализа средств выведения (СВ) космических аппаратов (КА), отмечая актуальные вопросы модификации отдельных процедур.

Сравнение СВ требуется на всех этапах их жизненного цикла, в том числе при выборе вариантов создания и применения, в процессе оценки технического уровня, при анализе конкурентоспособности, вариантов запуска СВ КА, их технического облика (ТО) и т. д.













Целью настоящей работы является анализ развития СВ сверхлегкого класса (СЛК), прогноз изменения их характеристик в ближайшие годы, для чего необходимо также рассмотреть методические особенности определения рациональных параметров СВ СЛК, направления их эффективного развития. На примере анализа вариантов развития и применения СВ СЛК показываются возможности использования предлагаемого подхода при технико-экономическом обосновании проектно-перспективных космических ракетных комплексов и их систем.

Анализ развития космических систем. Развитие низкоорбитальных космических систем на основе достижений в миниатюризации КА обусловило появление множества проектов малоразмерных СВ, которые предназначены для реализации разнообразных целевых задач и программ, касающихся мини-, макро- и наноспутников. Аналитические данные [2, 3] свидетельствуют, что переносы запусков малых космических аппаратов (МКА) в большинстве случаев вызваны неготовностью основной полезной нагрузки или ракет-носителей (РН) к запланированному сроку. Доли этих факторов в суммарном среднестатистическом времени задержки старта составляют 40 % и 34 % соответственно. Это подтверждает актуальность целевых (выделенных) запусков МКА с помощью транспортных космических систем (ТКС) СЛК.

Перечень разработок ТКС СЛК постоянно обновляется, в 2021 г. насчитывалось 155 проектов, касающихся СВ до 1 т на низкую околоземную орбиту (НОО). Причем проекты имеют разный статус — от закрытия проекта до завершения создания ТКС и перехода к запускам КА. В частности, в 2015–2021 гг. уже состоялись пуски 11 новых РН СЛК; данные о них приведены в таблице.

С 2015 по 2019 г. наблюдалось пятикратное увеличение общего числа проектов, а в 2020–2022 гг. появились признаки спада: сокращение перечня активных разработок с 51 проекта до 48, других наблюдаемых проектов — с 46 до 43, количество закрытых проектов возросло с 33 до 45. Несмотря на эти меры, стал очевидным большой дефицит спроса на пусковые услуги многочисленных ракетных компаний — стартапов (за рубежом) и федеральных органов исполнительной власти РФ [4].

Ракеты-носители сверхлегкого класса, созданные в 2015–2021 гг.

Характеристика	Ракета-носитель											
Внешний вид												
Тип РН	Electron	Launcher-One	Astra 3.0	Firefly Alpha	CZ-11	KZ-1A	ZQ-1	SD-1	OS-M1	Hyperbola-1	Ceres-1	MN-300*
Страна-изготовитель	США				Китай							Россия
Стартовая масса, т	13	25	–	54	58	30	27	23	20	42	30	1,7
Масса полезной нагрузки, т												
НОО (высота, км)	0,31 (180×300)	0,5 (230)	0,05 (500)	1,0 (200)	0,7 (200)	0,4 (300)	0,3 (200)	0,34 (300)	0,2 (300)	0,52 (300)	0,35 (200)	0,01 (230)
СОО (высота, км)	0,2 (500)	0,3 (500)	–	0,64 (500)	0,43 (500)	0,25 (500)	0,2 (500)	0,2 (500)	0,1 (500)	0,3 (500)	0,23 (700)	–
Год первого пуска	2017	2020	2020	2021	2015	2017	2018	2019	2019	2019	2020	–
*Первая ступень РН MN-300 испытана в 2013 г.												

Разработчики и операторы действующих СВ СЛК активно занимаются их улучшением, необходимым для окупаемости, т. е. снижением стоимости и наращиванием производительности. Например, интенсивность применения РН Electron (США) пока не превысила семи пусков в год (с 2017 г. по июнь 2022 г. выполнены семь пусков, из которых три были аварийными). Однако достигнутая расчетная производительность уже функционирующей ТКС заявляется на уровне 130 пусков РН Electron ежегодно, в том числе 120 — с комплексов в Новой Зеландии и 12 — с комплекса на о. Уоллопс (США).

В 2022 г. компания SpaceX запустила на орбиту 629 т полезной нагрузки, что составило 65 % общей массы полезных грузов (991 т), выведенных на орбиту всеми странами мира.

С января по апрель 2023 г. компания SpaceX вывела на орбиту более 200 т полезных грузов. Согласно планам И. Маска, в 2024 г. компания намерена произвести 100 орбитальных запусков, 27 из них уже проведены.

Начиная с 2020 г., резко возросла доля запущенных МКА, что обусловлено развертыванием многоспутниковых орбитальных группировок космических систем Starlink и OneWeb. Развертывание таких

орбитальных группировок осуществляется путем экономичных групповых запусков с использованием РН большой грузоподъемности. Для запуска КА Starlink применялись РН тяжелого класса Falcon 9, для запусков OneWeb — РН среднего класса «Союз» и «Союз-СТ». Планируются запуски РН тяжелого класса Atlas-5, Vulcan, Ariane-6 и др.

Выведение МКА осуществляется путем одиночных или групповых запусков. В 2017–2021 гг. большинство МКА выводилось групповыми запусками (рис. 1).

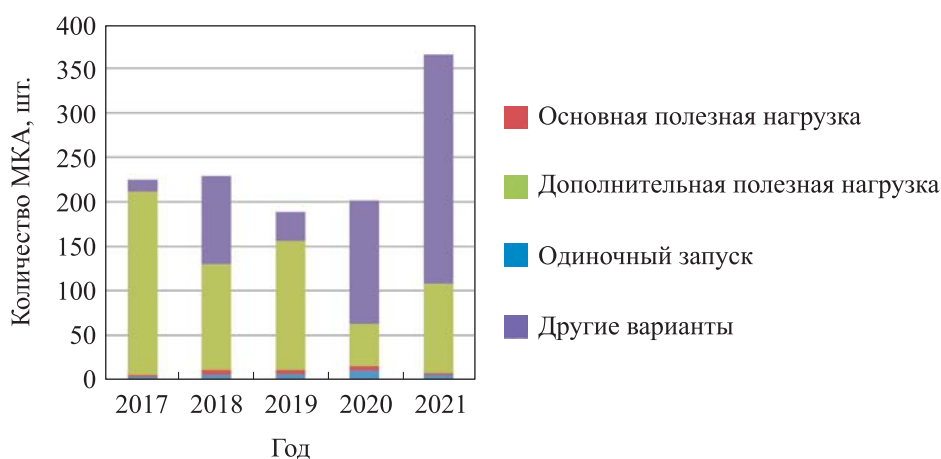


Рис. 1. Распределение МКА по вариантам запуска (2017–2021)

Возможны также следующие варианты запуска: основная полезная нагрузка; полезная нагрузка, дополнительная к основной; кластерный запуск однотипных МКА; групповой запуск разнотипных попутных полезных грузов без их формального распределения по приоритету (райдшеринг).

В 2017–2019 гг. большинство МКА (73 %) были запущены дополнительно к основной полезной нагрузке. В дальнейшем преобладающими стали райдшеринговые запуски, в том числе вследствие проведенных компанией SpaceX дешевых запусков «по расписанию» в рамках программы Smallsat Rideshare Program с помощью РН Falcon 9.

Для запуска МКА в 2017–2021 гг. были использованы в общей сложности 166 РН разной размерности. Чаще всего РН легкого класса, доля которых в общем числе пусков составила 46 %, а в общем грузопотоке — 49 %.

В размерности СЛК проведено 64 пуска (39 %) с обеспечением грузопотока 9,9 т, т. е. в среднем по 153 кг на одну РН. Средняя нагрузка РН СЛК по итогам этих пусков оценивается на уровне 58 %.

Весьма оптимистичны планы компании Astra Space (США): с 2018 г. по июнь 2022 г. она провела девять пусков РН, и только два

из них успешно, однако обещала в ближайшие годы поднять грузоподъемность с 50 до 200 кг (возможно, даже до 500 кг) и обеспечить в 2023 г. еженедельные, а в 2025 г. — ежедневные запуски. В аналитическом отчете беспрецедентные частота и дешевизна запусков компании Astra Space в сочетании с их пониженной надежностью расцениваются как необоснованные риски.

Можно отметить, что лидерство компаний Rocket Lab на рынке малых СВ поддерживается заказами на запуски американских МКА. На их долю приходится около 83 % общей численности и грузопотока спутников, запущенных с помощью ракеты Electron в 2018–2021 гг. Грузопоток таких американских МКА распределяется примерно поровну между государственными и прочими заказами, выполненными Rocket Lab.

Таким образом, повышается актуальность оценки будущего спроса на запуски МКА с помощью ТКС СЛК, а также потенциального возможного уровня их загрузки в условиях совершенствования уже применяемых СВ и активной разработки малоразмерных СВ.

По оценкам авторов настоящей статьи, в 2023 г. грузопоток МКА возрос по сравнению с 2022 г. Только в январе РН SpaceX Transporter-6 вывела одним пуском 114 МКА. Расчет по массам полезной нагрузки приведен на рис. 2.

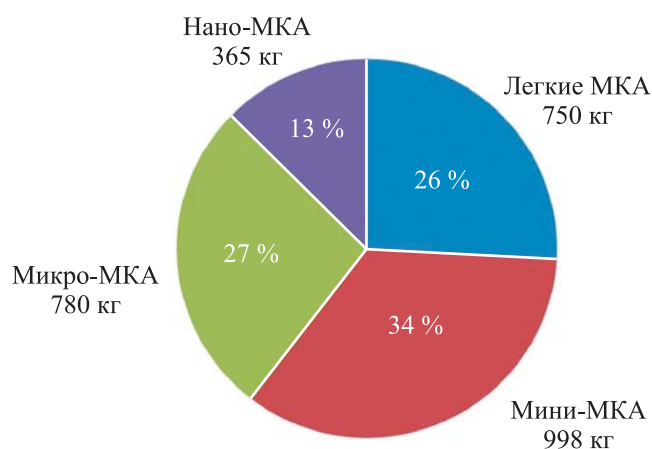


Рис. 2. Распределение полезной нагрузки миссии Transponder-7 по классам спутников (общая масса полезной нагрузки ~2900 кг) [5]

Миссия Transporter-7 вывела 51 МКА (15 апреля 2023 г.), а Transporter-8 отправила на орбиту 72 спутника StarLink (13 апреля 2023 г.). Эта миссия является юбилейной — многоразовый ускоритель успешно вернулся на Землю уже в двухсотый раз. По прогнозам, грузопоток этой компании будет расти, что подтверждают запуски в мае и июне 2023 г.

Компания SpaceX вывела 47 спутников связи StarLink, орбитальная группировка насчитывает свыше 4600 спутников, большинство из которых функционируют. Компания имеет разрешение на развертывание 12 000 спутников в формате МКА и планирует подать заявку на введение в эксплуатацию до 30 000 МКА. Появляются новые заказчики на рынке пусковых услуг, такие как Индонезия (Satira-1); правда, у них формат КА — 4,5 т, а запуск осуществляется РН Falcon 9.

С космодрома Восточный 27 июня 2023 г. стартовала РН «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат», которая доставила на орбиту КА «Метеор-М» № 2-3 и 42 российских и иностранных спутника: 16 МКА формата CubeSat проекта Space Pi, 9 МКА по программе «УниверСат» и 17 малых аппаратов в интересах российских и зарубежных коммерческих заказчиков. При этом среди российских аппаратов есть пикоспутник RuVDS, размеры которого 5×5×5 см — немногим больше спичечного коробка. В миссию КА входит проверка работы серверных систем на орбите, а также реализация проектов, связанных с популяризацией науки.

Китайская компания Space Pioneer совершила запуск РН Tianlong-2 и подала заявку в Международный союз электросвязи на план спутниковой группировки из 12 992 спутников. Масса большинства этих спутников 200...500 кг, и часто требуется 30–60 спутников для низкоорбитального запуска, т. е. оптимальная грузоподъемность ракеты составляет 10...17 т. С 2025 г. ее коммерческая пусковая способность достигнет 30 запусков в год.

Анализируя грузопотоки, убеждаемся, что они будут возрастать. Для России их рост в формате МКА составит более 60 %, что подтверждает потребность в СВ типа РН СЛК. Для этого планируется продолжить разработку и модернизацию ряда инновационных и гибких пусковых систем, таких как РН СЛК, и многоразовых пусковых установок, которые будут отвечать в основном потребностям оборонных ведомств. (Такие целевые задачи ставятся перед немецким спутником связи и французским военным КА, запускаемыми в интересах поддержания операций НАТО.)

Количество пусков РН с МКА, по нашим оценкам, возрастет на 20...25 %, а грузопоток в формате МКА — на 30...35 % при оптимистичном прогнозе (верхняя кривая на рис. 3) или на 18...20 % — при пессимистичном (нижняя кривая на рис. 3).

Анализ информации свидетельствует о том, что большинство грузопотоков будет формироваться в райдшеринговом режиме. А это означает, что используемые РН будут недогруженными, т. е. эксплуатационные характеристики СВ будут неоптимальными.

Любая РН оптимальна для конкретной орбиты и целевой полезной нагрузки. Существует длинный список уникальных технологий для перспективных космических систем, связанных с ТО РН,

и системы СВ в целом [6]. Например, чем дольше электроника подвергается воздействию интенсивной радиационной среды на НОО, тем больше вероятность ее повреждения. Высокие требования предъявляются к энергетическим характеристикам ракетных топлив, в том числе и твердых с высоким удельным импульсом, к тепловым режимам использования этих топлив, не говоря уже о долговечности электрических, силовых и прочих систем.

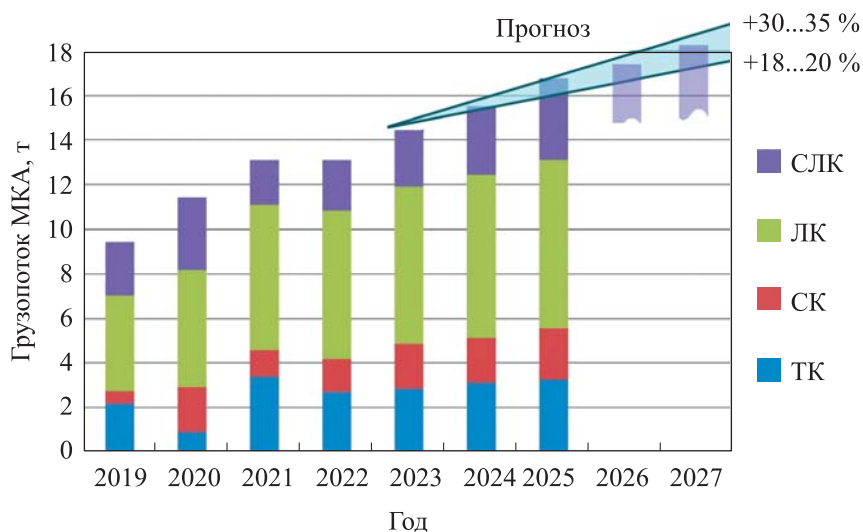


Рис. 3. Распределение грузопотока МКА по классам носителей и его прогноз: ЛК — легкий класс; СК — средний класс; ТК — тяжелый класс

И еще одно важное замечание: при выполнении необходимых маневров высокого уровня сложности требуются совершенные авионика и двигатель. Это обеспечивается уникальными и специализированными технологиями, которые не требуются для низкоорбитальных миссий, что позволяет упростить разработку РН СЛК, а также сделать их гораздо дешевле и запустить с менее сложной инфраструктурой, чем для ракеты космического назначения (РКН) тяжелого класса.

Методы анализа средств выведения МКА. В мировой практике применяются разные способы анализа систем СВ МКА [7]. Один из них — создание цифрового двойника технической системы.

В космических приложениях цифровой двойник — виртуальный прототип реального объекта, группы объектов (системы) или процессов — это сложный программный продукт, который создается на основе самых разнообразных данных (процессов), сопутствующих или соответствующих любой из стадий жизненного цикла изделия или системы. Цифровой двойник не ограничивается сбором данных, полученных на этапе разработки и изготовления продукта, он продолжает

собирать и анализировать данные во время всего жизненного цикла реального объекта, в том числе с помощью многочисленных IoT-датчиков (датчиков Интернета вещей). Технология дает разработчику изделия или системы любой размерности возможность моделирования самых разных ситуаций, которые могут возникать на производстве, при штатной либо нештатной эксплуатации изделия (системы). Таким образом, цифровой двойник — инструмент разработчика изделия (системы), позволяющий оптимальным (чаще всего рациональным) образом сконструировать изделие с учетом накопленного опыта (лучшие проверенные решения), подобрать наиболее адекватные сценарии реализации технологических и эксплуатационных процессов во избежание сбоев и возникновения (развития) форс-мажорных обстоятельств.

Для системного анализа сложных организационно-технических систем применяется также метод аналитических сетей [8]. Согласно процедуре этого метода, формируется исходная суперматрица, в которой все компоненты и их элементы размещаются сверху вниз по вертикали и слева направо по горизонтали. Соответствующие позиции блоков исходной матрицы заполняются столбцами-векторами приоритетов сравниваемых элементов, определяемыми по алгоритму методов анализа иерархий. Затем исходная матрица должна быть приведена к такому стохастическому виду, чтобы сумма элементов в каждом столбце равнялась единице.

Обратные связи придают динамику взаимному влиянию элементов, их приоритетам. Для получения однозначного решения суперматрица последовательно возводится в целочисленную степень, чтобы распространить влияние по всем маршрутам сети. После полной стабилизации результата элементы полученной предельной суперматрицы интерпретируются как итоговые приоритеты, позволяющие учесть совокупное влияние через все транзитные элементы сети.

Для ранжирования вариантов СВ принят критерий технического совершенства [1]. Общая техническая оценка формируется на основе комплексных показателей по семи критериям K_1 – K_7 : K_1 — энергетические характеристики, K_2 — размеры зоны полезного груза (ЗПГ), K_3 — нагружение полезного груза (ПГ) при запуске, K_4 — точность выведения ПГ на орбиту, K_5 — надежность запуска, K_6 — безопасность запуска, K_7 — возможности подготовки и проведения пусков. Данные критерии, соответствующие сложным свойствам, декомпозируются на субкритерии оценки согласно единичным показателям.

Оценка по критерию K_1 выполняется путем сравнения значений относительной массы ПГ, выводимого на типовую орбиту:

$$m = M_{\text{ПГ}}/M_{\text{ст}},$$

где $M_{\text{ПГ}}$ — максимальная масса ПГ; $M_{\text{ст}}$ — стартовая масса РКН.

В качестве типовых для малоразмерных РКН приняты НОО и солнечно-синхронная орбита (ССО), которым соответствуют показатели $m_{НОО}$ и $M_{ССО}$.

При сравнении по критерию K_2 (ЗПГ) анализируется показатель плотности компоновки ПГ и средств оснащения головной части в объеме зоны $V_{ЗПГ}$ под головным обтекателем:

$$R_{ПГ} = M_{ПГ}/V_{ЗПГ},$$

а также максимально возможный диаметр головного обтекателя $D_{ГО}$.

К показателям сравнения СВ по критерию K_3 (нагрузки на ПГ) относятся максимальные значения продольной n_x и поперечной n_y перегрузок, а также интегрального уровня звукового давления $I_{ак}$ в ЗПГ.

Для сравнения СВ по критерию K_7 соответствующий комплексный показатель детализируется с использованием показателей оперативности, производительности Π_1 и продолжительности выполнения заказа $T_{зак}$.

При анализе оперативности, которая отражает продолжительность подготовки и проведения пусков средств доставки на космодром, проводится качественное сравнение исходя из совокупности заявленных, фактических и ожидаемых сроков подготовки, в частности, подготовки после прибытия КА, составных частей ракеты и средств наземного обеспечения и базирования на космодром и после сборки космической головной части, РКН и т. п. Производительность Π_1 оценивается по заявленным или ожидаемым уровням пропускной способности комплекса в виде годового числа пусков с помощью одной пусковой установки. Продолжительность выполнения заказа после подписания пускового контракта $T_{зак}$ принимается с учетом типового графика работ, заявленных или фактических временных затрат.

Методики анализа совершенствуются, и общая техническая оценка формируется по увеличенному числу показателей [9]. В качестве прототипа системы используется система мониторинга [10].

Вариант ТО проектируемого летательного аппарата определяется в результате решения задачи структурно-параметрического синтеза, который в общем случае представляет собой многошаговый процесс уточнения облика и снятия неопределенностей. Практикуется метод декомпозиции задачи выбора ТО на локальные подзадачи — субоптимизации части переменных при зафиксированных остальных параметрах. Общее решение находится по схеме итерационного уточнения частных решений до устранения рассогласования между ними.

Параметрический синтез ТО в большинстве случаев сводится к формально разрешимой задаче поиска решений, удовлетворяющих метрическим критериям. Для оптимизации конечного множества непрерывных оптимизируемых основных проектных параметров на бесконечном множестве их значений часто применяются методы

нелинейного программирования. Кроме основных проектных параметров, при параметрическом синтезе учитывается множество других независимых параметров, влияющих на характеристики летательного аппарата СВ.

Согласно системному подходу, лучший вариант ТО должен обеспечить максимальную эффективность системы более высокого уровня, в которую входит СВ. В связи с трудностями формализации эффективности таких сложных макросистем на начальном этапе проектирования обычно используют частные показатели сравнения. Хотя возведение любого скалярного показателя в ранг критерия оптимизации приводит к «обострению» ТО, к сосредоточению всех резервов на улучшении одного показателя ценой пренебрежения остальными, такой параметрический синтез дает и ценные результаты — уровни важнейших характеристик на пределе возможного. К числу наиболее известных частных критериев СВ относятся критерии массовой отдачи, например критерий максимума относительной массы ПГ, выводимого на характерную орбиту. Этот критерий согласуется с экономическими критериями при сравнении СВ, имеющих схожие принципы устройства и функционирования. Если исходные данные позволяют оценить экономические показатели, часто применяется критерий минимума удельной стоимости выведения ПГ на орбиту.

Влияние потребностей рынка на средства выведения рассмотрим на примере схемы воздушного старта РН СЛК (рис. 4).

По сравнению с наземным и морским стартами у воздушного старта есть ряд преимуществ.

1. Территориальные:

- выбор точки старта, включая приэкваториальные широты, что позволяет сделать наклонения орбит всеазимутальными;
- трассы полета и районы падения отделяющихся частей РН выносятся с территории РФ в районы Мирового океана;
- запуск становится более безопасным и экологичным, поскольку выделяются зоны отчуждения под падающие ступени;
- запуск существенно меньше зависит от погодных и климатических условий, проводится в строго запланированное время;
- можно установить КА на ракету на территории, наиболее приближенной и удобной заказчику пуска.

2. Технические и экономические:

- повышение критерия массовой эффективности РН;
- снижение экономических затрат на вывод КА, на постановку и восполнение орбитальной группировки;
- динамичность варьирования высоты орбиты и массы ПГ;
- возможность многоразового использования платформы;
- высокая оперативность пусков.

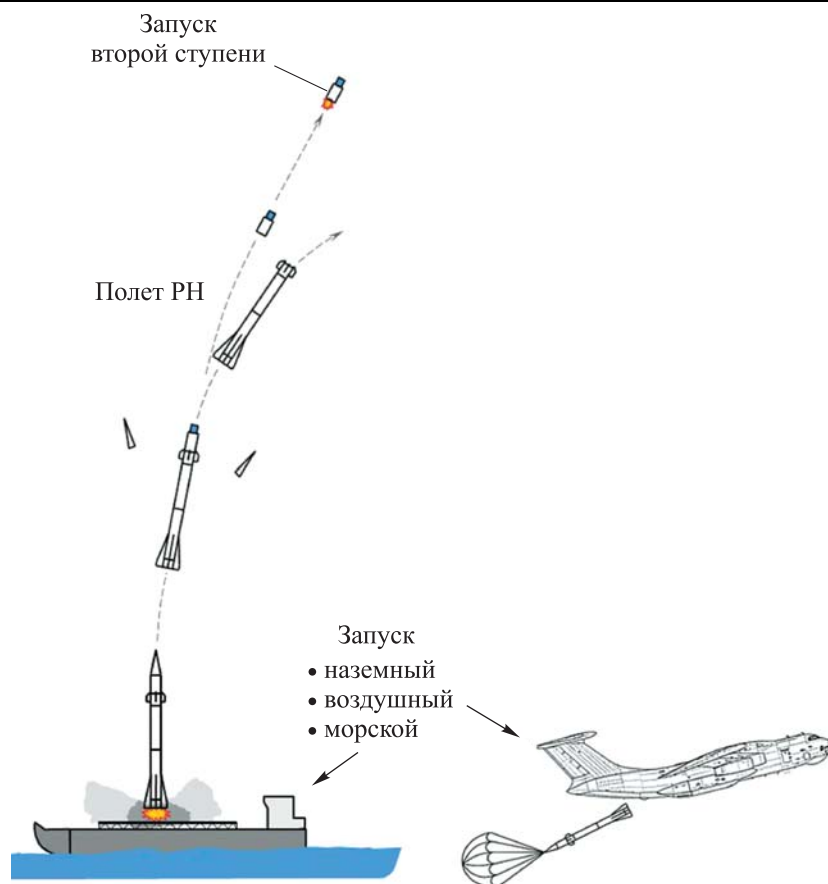


Рис. 4. Схема воздушного старта ракеты-носителя сверхлегкого класса

У общества формируется все больше запросов, которые может покрыть перспективная космическая система на основе воздушного старта. Они обусловлены следующими причинами:

- по мере внедрения беспилотного транспорта и роботизированных систем, в том числе для логистических операций, распространяются новые виды цифровых услуг в регионах;
- на фоне ухудшения экологической обстановки возрастают потребности в отслеживании опасных объектов, выбросов парниковых газов, развития чрезвычайных ситуаций;
- космические данные необходимы для мониторинга, обеспечения безопасности научных исследований и ряда других задач;
- для решения долгосрочных социально-экологических задач в Арктическом регионе и районе Северного морского пути требуются услуги связи, мониторинга и позиционирования;
- пандемия COVID-19 стала дополнительным фактором повышения спроса на услуги спутниковой связи и Интернета.

По оценкам авторов настоящей статьи, запуск орбитальной группировки в составе 30–50 КА, базирующихся на МКА, может быть оперативно развернут на орбите в течение примерно 6–7 самолетовылетов с РН СЛК.

Оценка проводилась следующим образом. Грузоподъемность самолета Boeing 747-400, носителя РКН воздушного старта LauncherOne, составят до 128,5 т. Грузоподъемность Ан-124-100 схожая — до 120 т. Характеристики ракеты LauncherOne: масса 30 т, заявленная полезная нагрузка на ССО высотой 500 км — 300 кг. Примем массу МКА 40...60 кг, тогда одна РН СЛК сможет вывести на ССО 5–7 таких спутников за один пуск, а 30–50 аппаратов — за шесть-семь пусков.

В ближайшие годы доступ к информации, получаемой с помощью спутниковых технологий, станет не просто вопросом качества жизни людей, конкурентоспособности компаний или продуктов, но и критически важным условием функционирования инфраструктуры транспортной системы управления, связи и безопасности любого развитого государства.

Анализируя вышеперечисленные потребности потенциальных заказчиков, а также возможности и проблемы каждого подходящего СВ, можно подобрать оптимальный технический облик СВ.

Модель синтеза технического облика СВ. Концептуальное проектирование модели СВ схематически изображено на рис. 5. Массово-геометрическая модель и модель двигательной установки обеспечивают набор исходных данных для расчета траектории выведения при заданной схеме. Результаты аэродинамического и траекторного анализа позволяют рассчитать силовые и тепловые нагрузки в ходе полета, а в совокупности с геометрической моделью — массовую сводку [1]. На заключительном шаге концептуального проектирования оцениваются стоимостные показатели СВ.

В условиях дефицита исходных данных для оценок стоимости и эффективности вариантов ТО СВ эти варианты часто оптимизируются по энергомассовому критерию с применением массово-габаритной и баллистической моделей, а также упрощенной аэродинамической модели, обеспечивающий баллистический расчет. Задача решается в детерминированной постановке, а оценки возможных отклонений целевой функции и ограничений от номиналов переносятся на следующие этапы работ, как и более полный учет факторов и связей [7].

Особенности СВ определяют алгоритмический характер моделей и, соответственно, необходимость использования численных методов при оптимизации ТО. Большой арсенал таких методов обуславливает широкие возможности выбора тех из них, которые в наибольшей степени отвечают типам целевой функции и дисциплинирующих условий в рамках задач параметрического синтеза ТО СВ.

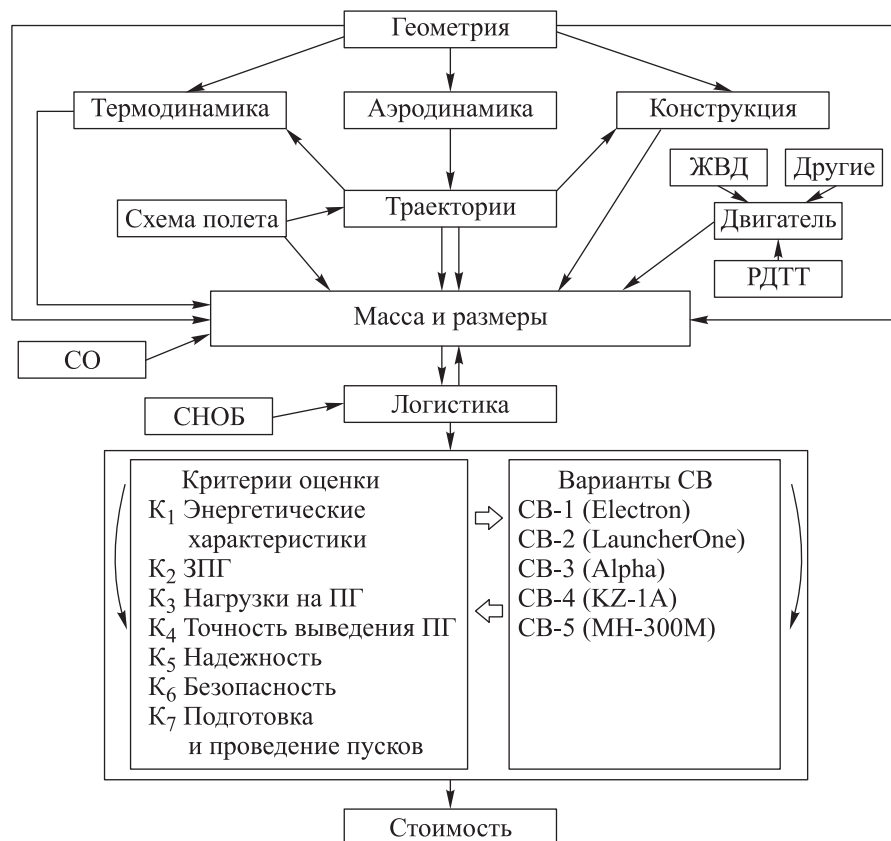


Рис. 5. Факторы, подлежащие учету при концептуальном проектировании и параметрическом синтезе технического облика средств выведения:

ЖРД — жидкостный ракетный двигатель; РДТТ — ракетный двигатель на твердом топливе; СНОБ — средства наземного обеспечения и базирования; СО — средства оснащения

Заключение. Проведен анализ развития средств выведения легкого и сверхлегкого класса, основных направлений их совершенствования. Эти данные позволили сделать краткосрочный прогноз изменения характеристик СВ СЛК до 2025 г. На развитие СВ СЛК влияет динамика предъявляемых к ним требований и определение области их применения.

Рассмотрены методические особенности определения рациональных параметров СВ СЛК. На выбор решения влияют приоритеты критериев функциональной эффективности в перспективе. Прогноз приоритетов при разработке перспективных СВ, а также прогноз динамики определяющих параметров — массовых и стоимостных коэффициентов — будут влиять на выбор рациональных параметров этих СВ, в том числе СЛК.

В постановочном плане рассмотрены направления эффективного развития СВ СЛК. Проведен комплексный анализ предлагаемой

технологии на этапах разработки, производства и эксплуатации с целью снижения затрат на реализацию проектов.

Выделены приоритетные направления совершенствования характеристик РН СЛК:

– применение ракетных двигателей на твердом топливе (одна из ключевых технологий), что позволит улучшить эксплуатационные характеристики СВ СЛК;

– использование авиационной техники как платформы для запуска СВ СЛК и реализация проектов создания унифицированных СВ СЛК;

– модернизация комплексов и создание модификаций СВ СЛК для расширения области их применения;

– реализация массовых запусков МКА и повышение требований к эффективному их применению, что повышает требования к «интеллектуальным» способностям таких КА и их возможности самостоятельно встраиваться в систему и эффективно работать при разных начальных (стартовых) условиях;

– совершенствование технологий проектирования, испытаний и производства СВ, в том числе с использованием средств компьютерного моделирования (электронные макеты, цифровые двойники, виртуальные испытания и т. д.), для повышения технико-экономической эффективности проектов на всех этапах жизненного цикла ТКС с ускорением разработок, улучшением показателей качества, надежности и безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Биркин А.И., Зацерковный С.П., Медведев А.А., Осадченко А.С., Шаповалов Р.В. Определение важности критериев при сравнительной оценке средств выведения космических аппаратов методом аналитических сетей. *Космонавтика и ракетостроение*, 2022, вып. 5 (128), с. 95–107.
- [2] Niederstrasser C.G. The small launch vehicle survey a 2021 update (The rockets are flying). *The Journal of Space Safety Engineering*, 2022, vol. 9, iss. 3, pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jsse.2022.07.003
- [3] Kulu E. Small Launchers — 2021 Industry Survey and Market Analysis. In: *Proceedings of 72nd International Astronautical Congress, Dubai, Arab Emirates, 25–29 October 2021*. IAC-21-D2.9-D6.2.3, 2021. URL: https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2021_Erik-Kulu_IAC2021.pdf.
- [4] Биркин А.И., Зацерковный С.П., Кузнецов И.И., Медведев А.А., Юрченко В.С. Оценка мирового спроса на запуски космических аппаратов посредством малых ракет-носителей. *Космонавтика и ракетостроение*, 2022, вып. 5 (128), с. 82–94.
- [5] В рамках миссии SpaceX Transporter-6 на орбиту будут запущены 114 малых космических аппарата из 22-х стран мира. *aboutspacejournal.net*, 14:56, 03/01/2023, с. 4–9.
- [6] Тори Бруно раскрывает секреты ракетостроения. *aboutspacejournal.net*, 19:42 16/03/2023, с. 20–27.

- [7] Митрошин А.С., Останюк А.И., Приклонский В.И., Францев Р.К. Технология цифровых двойников как средство повышения качества изделий ракетно-космических технологий. *Космонавтика и ракетостроение*, 2022, вып. 5 (128), с. 146–150.
- [8] Балухто А.Н., Твердохлебова Е.М. Современный подход к исследованию эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли. *Космонавтика и ракетостроение*, 2022, вып. 3 (126), с. 122–136.
- [9] Матвеев Ю.А., Позин А.А., Шершаков В.М. Ракетные технические средства геофизического мониторинга, их развитие и возможности. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2017, № 8, с. 26-31.
- [10] Матвеев Ю.А., Позин А.А., Шершаков В.М. Системные вопросы создания ракет-носителей сверхлегкого класса. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2019, № 2, с. 37–43.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Матвеев Ю.А., Позин А.А., Юрченко М.И. Оценка спроса на запуски малых космических аппаратов и его влияние на технический облик систем выведения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 9. EDN IVXQFP

Матвеев Юрий Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры № 601 Института № 6 МАИ; автор более 100 печатных работ и ряда монографий, а также патентов на изобретения. Область научных интересов: ракетно-космическая техника, прогноз развития и управление разработками сложных организационно-технических систем. e-mail: matveev_ya@mail.ru

Позин Анатолий Александрович — д-р техн. наук, заведующий лабораторией № 6 «Экологические и геофизические исследования ракетно-космических технологий» ИЭМ ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета; автор свыше 100 печатных работ, монографий и более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов: постановка и проведение ракетно-космических экспериментов, проектирование ракетно-космической техники и управление ее разработкой. e-mail: pozin@rpatyphoon.ru

Юрченко Максим Игоревич — инженер-конструктор лаборатории № 6 «Экологические и геофизические исследования ракетно-космических технологий» ИЭМ ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета. Область научных интересов: космические аппараты, проектирование и конструирование новых образцов ракетно-космической техники. e-mail: yurchenko@rpatyphoon.ru

Assessing the demand in small spacecraft launches and its influence on the launch system technical appearance

© Yu.A. Matveev¹, A.A. Pozin², M.I. Yurchenko²

¹ Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993, Russian Federation

² RPA “Typhoon”, Obninsk, Kaluzhskaya District, 249038, Russian Federation

The paper considers approaches to assessing economic effect achieved by creation of a space rocket complex. It compares options in design and development of the spacecraft launch vehicles (LV) by costs in implementing selected fragments of the predicted space cargo flow reduced to the typical orbits and divided between the LVs of different classes. The paper presents methods for assessing the future demand in launching the small spacecraft, which would assist developers in reducing labor costs while forming the options for technical appearance of the small launch vehicles, i.e. the ultra-light launch vehicles. Various analysis methods are presented, including the hierarchy analysis methods for solving the problems of comparing the spacecraft LVs. The paper demonstrates results of systematic analysis of certain operating rocket systems and options in constructing a possible system of criteria for their comparison based on a number of group and particular indicators taken into account in the LV overall assessment.

Keywords: launch services market, rocket and space technology, ultra-light launch vehicle

REFERENCES

- [1] Birkin I.A., Zatserkovny S.P., Medvedev A.A., Osadchenko A.S., Shapovalov R.V. Opredelenie vazhnosti kriteriev pri sravnitelnoy otsenke sredstv vyvedeniya kosmicheskikh apparatov metodom analiticheskikh setey [Calculation of criteria priorities in the comparative evaluation of space launch vehicles using the analytic network process]. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Science*, 2022, iss. 5 (128), pp. 95–107.
- [2] Niederstrasser C.G. The small launch vehicle survey a 2021 update (The rockets are flying). *The Journal of Space Safety Engineering*, 2022, vol. 9, iss. 3, pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jsse.2022.07.003
- [3] Kulu E. Small Launchers – 2021 Industry Survey and Market Analysis. In: *Proceedings of 72nd International Astronautical Congress, Dubai, Arab Emirates, 25–29 October 2021*. IAC-21-D2.9-D6.2.3, 2021. Available at: https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2021_Erik-Kulu_IAC2021.pdf
- [4] Birkin I.A., Zatserkovny S.P., Kuznetsov I.I., Medvedev A.A., Yurchenko V.S. Otsenka mirovogo sprosa na zapuski kosmicheskikh apparatov posredstvom malykh raket-nositeley [Evaluation of the world demand for space launches by small rockets]. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Science*, 2022, iss. 5 (128), pp. 82–94.
- [5] V ramkakh missii SpaceX Transporter-6 na orbitu bydut zapushcheny 114 malykh kosmicheskikh apparatov iz 22-kh stran mira [As part of the SpaceX Transporter-6 mission, 114 small spacecraft from 22 countries will be launched into orbit]. *aboutspacejournal.net*, 14:56, 03/01/2023, pp. 4–9.
- [6] Tori Bruno raskryvaet sekrety raketostroeniya [Tory Bruno reveals the secrets of rocket science]. *aboutspacejournal.net*, 19:42, 16/03/2023, pp. 20–27.
- [7] Mitroshin A.S., Ostanyuk A.I., Priklonsky V.I., Frantsev R.K. Tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov kak sredstvo povysheniya kachestva izdeliy raketno-kosmicheskikh tekhnologiy [Technologies of digital twins as a mean of increasing

- the quality of productions of rocket and space technologies]. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and rocket science*, 2022, iss. 5 (128), pp. 146–150.
- [8] Balukhto A.N., Tverdokhlebova E.M. Sovremenniy podkhod k issledovaniyu effektivnosti kosmicheskikh sistem dstantsionnogo zondirovaniya Zemli [Modern approach to research of the effectiveness of space systems of remote sensing of the Earth]. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Science*, 2022, iss. 3 (126), pp. 122–136.
- [9] Matveev Yu.A., Pozin A.A., Shershakov V.M. Raketnye tekhnicheskie sredstva geofizicheskogo monitoringa, ikh razvitiye i vozmozhnosti [Rocket technical means of geophysical monitoring, their development and capabilities]. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal "Polet" — All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" (Flight)*, 2017, no. 8, pp. 26–31.
- [10] Matveev Yu.A., Pozin A.A., Shershakov V.M. Sistemnye voprosy sozdaniya raket-nositeley sverkhlegkogo klassa [System level issues of the ultralight class launchers development]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina — Journal "Vestnik "NPO im. S.A. Lavochkina"*, 2019, no. 2, pp. 37–43.

Matveev Yu.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department 601, Institute no. 6, Moscow Aviation Institute (National Research University); author of over 100 publications, monographs and invention patents Specializes in aerospace technology, predicting and controlling development in complex logistical systems. e-mail: matveev_ya@mail.ru

Pozin A.A., Dr. Sc. (Eng.), Head of Laboratory no. 6 “Ecological and Geophysical Research in Aerospace Technology”, Institute of Experimental Meteorology, Research and Production, Association Typhoon, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; author of over 100 publications, monographs and over 30 invention certificates and patents. Specializes in setting up and conducting aerospace experiments, aerospace systems design, development and control. e-mail: pozin@rpatyphoon.ru

Yurchenko M.I., Design engineer, Laboratory no. 6 “Ecological and Geophysical Research in Aerospace Technology”, Institute of Experimental Meteorology, Research and Production, Association Typhoon, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Specializes in spacecraft, design and development of the modern aerospace equipment. e-mail: yurchenko@rpatyphoon.ru