

PART II*

MICRO LAUNCH VEHICLES: THE SEGMENT IN THE LAUNCH SERVICES MARKET AND PROMISING PROJECTS

Valery Y. KLYUSHNIKOV,
Dr. Sci. (Tech), Senior Fellow, Chief Researcher,
FSUE "Central Research Institute of Machine
Building", ROSCOSMOS, Moscow, Russia,
wklj59@yandex.ru

ABSTRACT | The author analyses the perspectives of the commercial use of micro launch vehicles in the emerging small satellites launch market. The most promising projects of micro launch vehicles as well as technologies for improving their technical and economic indicators are considered.

Keywords: *micro launch vehicle, launch cost, cost of 1 kg of payload launch to orbit, payload mass*

*The first part of the article see: ASJ, No. 3 (100), 2019, pp. 58-72

РАКЕТЫ-НОСИТЕЛИ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА:

ЧАСТЬ II*

НИША НА РЫНКЕ ПУСКОВЫХ УСЛУГ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ



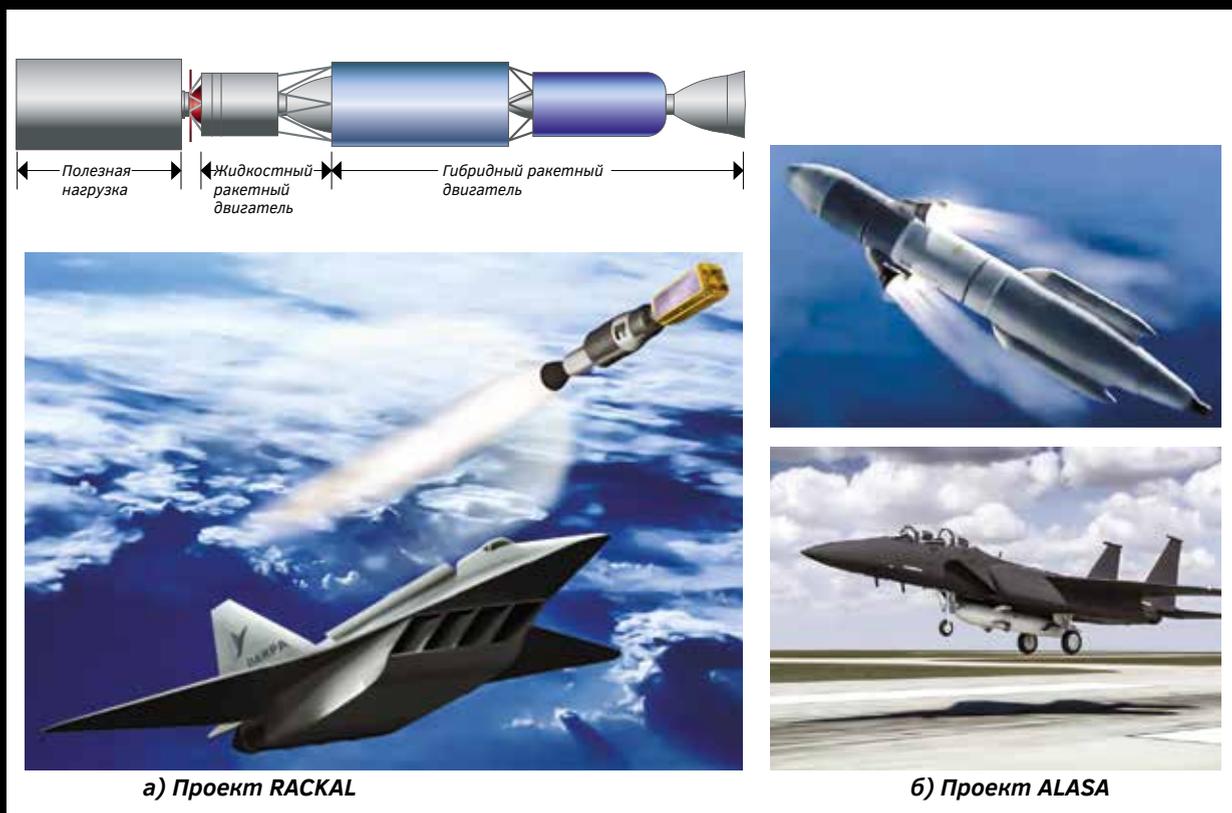
Валерий Юрьевич КЛЮШНИКОВ,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник ФГУП
«Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения», Роскосмос, Москва, Россия,
wkljs9@yandex.ru

АННОТАЦИЯ | В статье анализируются перспективы коммерческого использования ракет-носителей сверхлегкого класса на формирующемся рынке запусков малоразмерных космических аппаратов. Рассматриваются наиболее перспективные проекты сверхлегких носителей и технологии, позволяющие улучшить их технико-экономические показатели.

Ключевые слова: *ракета-носитель сверхлегкого класса, стоимость пуска, стоимость выведения на орбиту 1 кг полезного груза, масса полезного груза*

*Первую часть статьи см. в №3 (100), 2019, стр. 58-72

РИС. 9. Сверхлегкие носители, пускаемые с самолета, разрабатываемые по заказу DARPA



2.6. АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: СВЕРХЛЕГКИЕ НОСИТЕЛИ, ПУСКАЕМЫЕ С САМОЛЕТА

Следует заметить, что США начиная с 1958 года пытаются реализовать экономичные авиационно-космические средства выведения МКА. Правда, первые такие системы были предназначены для выведения на орбиту спутников-перехватчиков. Так, проект Pilot (другое название — система запуска искусственных спутников Земли NOTSNIK), предусматривал запуск 6-ступенчатой твердотопливной ракеты с полезным грузом массой чуть больше 1 кг с модифицированного палубного истребителя F-4D-1 Skyhawk. Масса ракеты-носителя — менее 1 т. Конечно, технологии начала 1960-х годов не позволяли реализовать заданные целевые функции в массе и габаритах КА, который ракета NOTS могла вывести на орбиту.

ПРОЕКТ RASCAL

В марте 2002 года агентством DARPA была начата программа RASCAL — Responsive Access Small

Cargo Affordable Launch (рис. 9 а) [24]. Задачей было создание системы оперативного запуска военных спутников массой 75–100 кг. Стоимость запуска не должна была превышать 750 тыс. долл., период послеполетного обслуживания — 24 часа, оперативность запуска — 1 час. Конкурс выиграла фирма Space Launch. Предлагалось создать систему на основе самолета-разгонщика, получившего обозначение MPV (MIPCC-Powered Vehicle — аппарат с охлаждаемыми двигателями) с взлетной массой 36,3 т и максимальной скоростью порядка 4 М.

Позднее для разгона запускаемого носителя предлагалось использовать одноместный сверхзвуковой истребитель-перехватчик с дельтовидным крылом Convair F-106 Delta Dart.

Проект был закрыт в феврале 2005 года из-за несоответствия прогнозируемых технико-экономических характеристик требованиям DARPA (стоимость пуска 750 тыс. долл. достигалась при темпе пусков 155 в год, что далеко от реальности).

ПРОЕКТ ALASA

Один из последних по времени аналогичных проектов — ALASA (Airborne Launch Assist Space

Рис. 10. Многоразовое средство выведения малых КА на низкую околоземную орбиту Phantom Express



Access) был начат по соответствующей программе агентства DARPA в 2012 году (рис. 9 б) [25]. ALASA преследовала цель оперативного запуска спутников массой 45 кг на НОО в течение 24 часов после получения команды на пуск. Стоимость пуска РН с авиационного носителя (истребителя F-15E) не должна была превышать 1 млн долл.

В целях упрощения и удешевления конструкции РН четыре ЖРД на монотопливе NA-7 (смесь монопропилена, закиси азота и ацетилена) были установлены в передней части ракеты.

Однако в конце 2015 года проект был закрыт.

Причины закрытия программы:

— у конкурентов возникли претензии по рассмотрению других коммерческих вариантов носителей (проектов Virgin Galactic LauncherOne и XCOR Aerospace Lynx);

— имели место взрывы монотоплива NA-7 при наземных испытаниях.

На наш взгляд, одна из основных причин неудач при реализации подобных проектов заключалась все-таки в низких удельных экономических показателях сверхлегких РН. До последнего времени не удавалось получить стоимость выведения 1 кг

полезного груза на орбиту ниже 20 тыс. долл. (заявленная стоимость пуска РН Electron; реальная удельная стоимость пока в два раза больше).

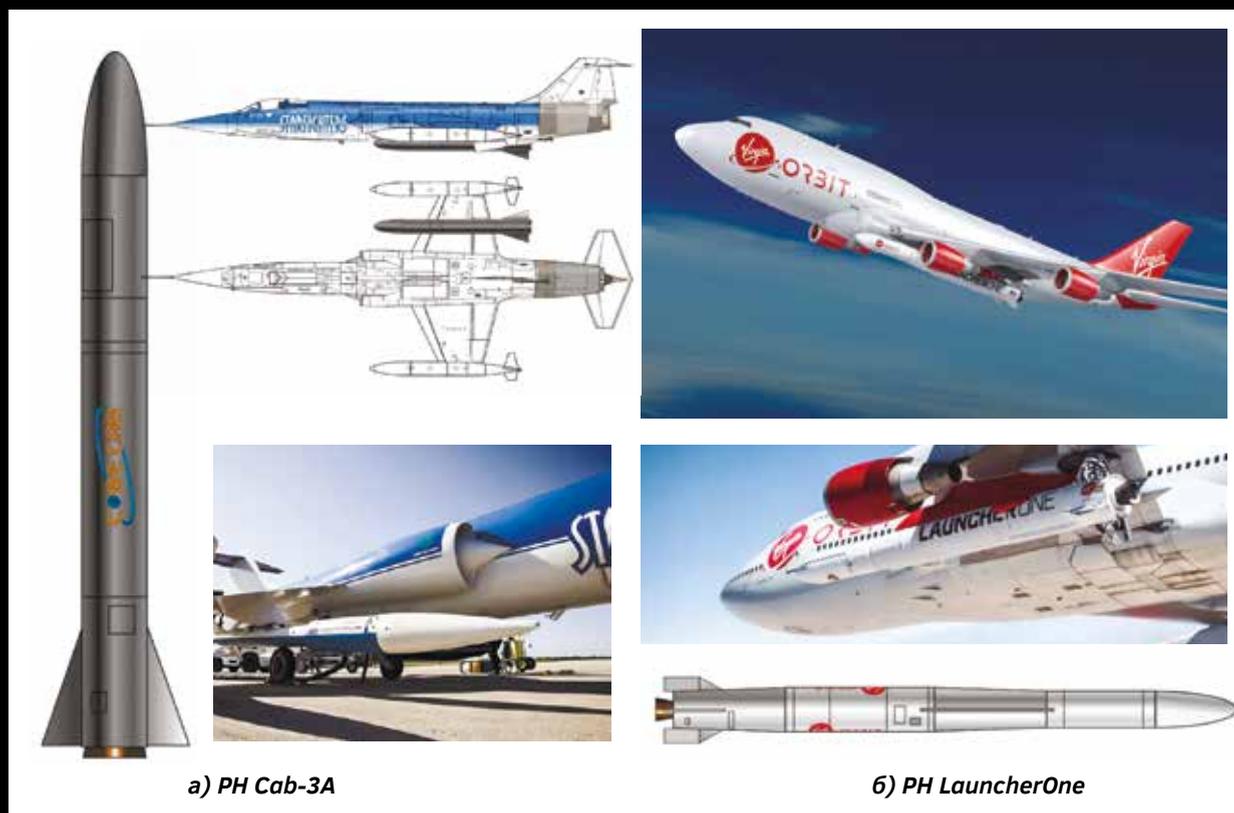
СВЕРХЛЕГКИЙ НОСИТЕЛЬ PHANTOM EXPRESS (XS-1)

После закрытия программы ALASA агентство DARPA заключило с аэрокосмическим концерном Boeing контракт на разработку, сборку и испытания многоразового космического беспилотного летательного аппарата для запуска МКА XS-1, получившего название Phantom Express (рис. 10) [26].

Аппарат будет стартовать вертикально, а приземляться при возвращении — по-самолетному. Аппарат будет нести дешевую одноразовую вторую ступень, которая довыводит запускаемые спутники на орбиту, возвращается в атмосферу и сгорает. Первая ступень при этом может двигаться по суборбитальной траектории — без выхода на орбиту. После того как сборка прототипа завершится, будут проведены его испытания: Boeing должен будет запустить КА 10 раз подряд в течение 10 дней.

По своим размерам XS-1 должен быть сопоставим с американским истребителем F-15 Eagle

РИС. 11. Ракеты-носители воздушного старта LauncherOne компании Virgin Orbit и Cab-3A фирмы CubeSat



а) PH Cab-3A

б) PH LauncherOne

(длина — 19,43 м, высота — 5,63 м, размах крыла — 13,05 м). Космический беспилотник будет использоваться как для военных запусков, так и в коммерческих целях.

К технологическим особенностям Phantom Express относятся:

- вертикальный старт, горизонтальная посадка;
- третье поколение теплозащиты (транспирационная?);
- сверхкомпактный горизонтальный турбонасосный агрегат на ракетной ступени.

Ожидается, что новый аппарат будет способен выводить на околоземную орбиту спутники массой до 1,4 т. При этом стоимость одного запуска не будет превышать 5 млн долл., а удельная стоимость выведения на орбиту 1 кг полезного груза, соответственно, 3,6 тыс. долл.

Описанные выше сверхлегкие носители воздушного старта предназначались в основном для запусков малых КА военного назначения.

Коммерческие перспективы на рынке гражданских запусков имеют перспективные сверхлегкие РН LauncherOne и Cab-3A, запускаемые с авиационных носителей (рис. 11).

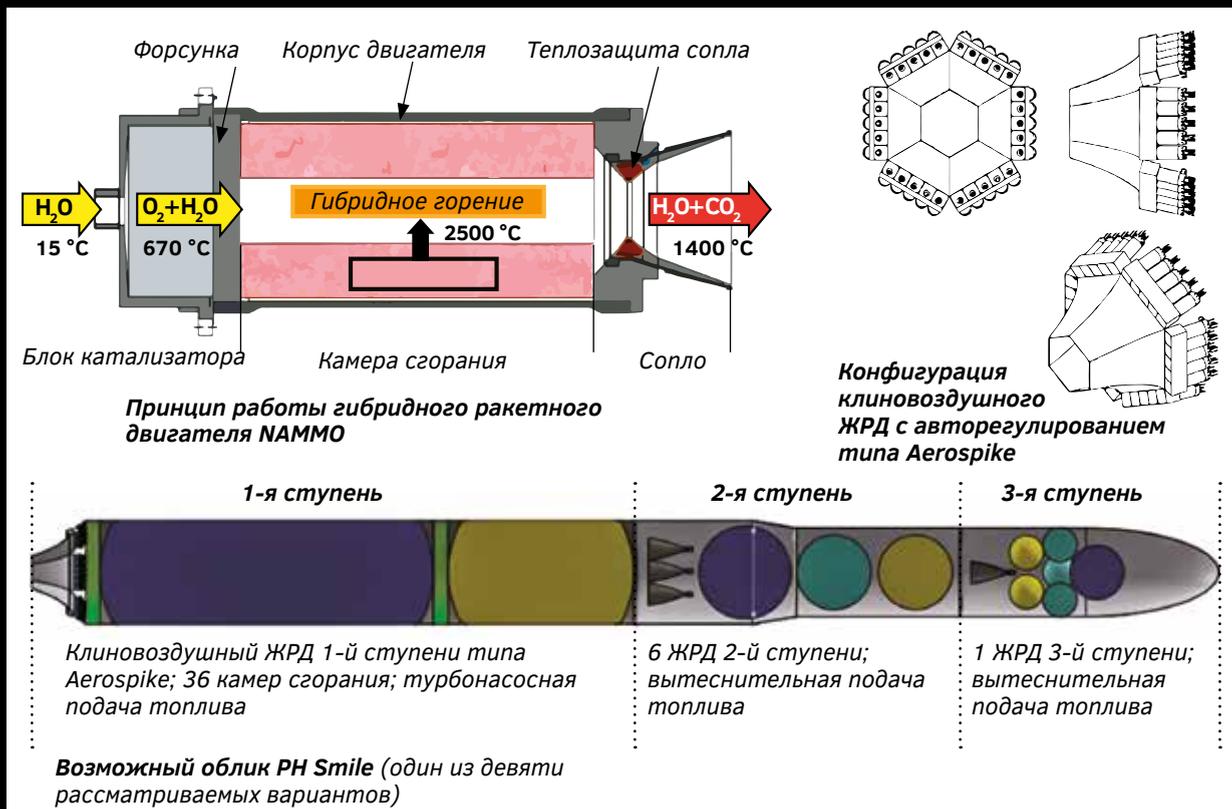
РН LAUNCHERONE

Двухступенчатая РН с воздушным стартом LauncherOne создается компанией Virgin Orbit (спин-офф от Virgin Galactic, США) с 2007 года. На ракете установлены керосин-кислородные ЖРД собственной разработки компании Virgin Orbit: на первой ступени — NewtonThree (N3) с тягой 33340 кг, на второй — NewtownFour (N4) с тягой в вакууме 2270 кг [12].

В процессе создания самолет-носитель WhiteKnightTwo, при запуске с которого РН LauncherOne могла вывести на НОО 225 кг полезного груза, был заменен на Boeing 747-400, получивший название Cosmic Girl. В результате энергетические возможности РН возросли: при пуске с Cosmic Girl в районе острова Гуам (Тихий океан), за счет близости к экватору, ракета будет способна выводить на экваториальные орбиты высотой 500 км более 450 кг полезного груза. При этом стоимость пуска не изменилась и составляет 10 млн долл.

Virgin Orbit уже заключила ряд контрактов на запуски микро- и наноспутников с компаниями Cloud Constellation (12 пусков), Sky and Space Global

РИС. 12. Концепция сверхлегкой РН Small Innovative Launcher for Europe (SMILE) европейского консорциума [27]



(4 пуска). Компания OneWeb приобрела запуски для любого из своих 39 микроспутников.

В конце 2018 года компания Virgin Orbit провела тестовые полеты самолета-носителя Cosmic Girl с РН LauncherOne. К концу 2019 года будет осуществлен первый испытательный пуск ракеты LauncherOne.

РН САВ-3А

Одноступенчатая твердотопливная РН Сав-3А, создаваемая американской фирмой CubeCab, предназначена для запуска исключительно наноспутников размерности от 1U до 3U (общая масса полезного груза, выводимого на НОО, не превышает 5 кг) [12]. При изготовлении ракеты будут массово использоваться аддитивные технологии. Пуски планируется производить с самолета-носителя F-104 Starfighter, предоставляемого коммерческой фирмой Starfighters Aerospike (Космический центр имени Кеннеди во Флориде). Ракета-носитель будет подвешиваться под крылом F-104 аналогично ракете класса «воздух — воздух».

Орбита

Высота орбиты (км)	600
Орбитальная скорость (км/с)	7,56
Расчетное требуемое приращение характерной скорости при пуске с Земли (км/с)	9,5

Характеристики ракеты-носителя

Полная масса 1-й ступени (кг)	17 458
Полная масса 2-й ступени (кг)	2 981
Полная масса 3-й ступени (кг)	240,5
Масса орбитального модуля (кг)	107
Масса полезного груза (кг)	70
Полная масса пустой ракеты (кг)	2 338
Начальная стартовая масса (кг)	20 786
Полное приращение характерной скорости ракеты-носителя (км/с)	10,02
1-я ступень	3,73
2-я ступень	4,38
3-я ступень	1,91

Компания планирует запускать более 100 спутников в год. Время выполнения заказа на запуск составит до 30 дней. Прогнозируемая стоимость пуска — не более 250 тыс. долл.

В 2018 году компанией CubeSat достигнута договоренность с компанией BitcoinLatina Foundation о запуске в 2020–2022 годах 300 наноспутников орбитальной группировки, ориентированной на обеспечение непрерывной связи в интересах распределенных компьютерных сетей.

2.7. ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ СВЕРХЛЕГКОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ЕВРОПЕЙСКОГО КОНСОРЦИУМА SMILE

Летом 2018 года Еврокомиссией в рамках европейской программы Horizon 2020 был объявлен конкурс на создание дешевой европейской РН для запуска малых спутников (European Low-Cost Space Launch) Space-EICPrize — 2019. Победитель конкурса будет объявлен в четвертом квартале 2021 года и получит 10 млн евро [27].

В рамках проекта Horizon 2020 для участия в конкурсе свои усилия решили объединить 14 европейских компаний и институтов, создавших консорциум. Проект под названием SMILE (SMall Innovative Launcher for Europe) направлен на разработку сверхлегкого носителя для запуска спутников массой около 50 кг с европейского стартового комплекса в северной Норвегии.

COTS-технология — от англ. Commercial Off-The-Shelf — «готовые к использованию». Для построения систем специального назначения применяется специальный подход, согласно которому используются промышленные вычислительные модули, а крейты, стойки, блоки коммутации и кабели создаются в специальном исполнении и обеспечивают требуемые условия эксплуатации (например, устойчивость к климатическим, вибрационным, акустическим и другим воздействиям). В COTS-технологии применяются готовые аппаратные и программные технологии открытого типа, ранее широко апробированные и/или стандартизованные на рынке общепромышленных гражданских приложений.

В настоящее время общая концепция носителя до конца не определена (рис. 12). Рассматривается целесообразность использования в конструкции РН гибридных ракетных двигателей, ракетных двигателей типа AeroSpike с авторегулированием, применение в конструкции РН и ЖРД керамических матричных композитных материалов, а также спасения и повторного использования первой ступени РН или двигателей.

Гибридный ракетный двигатель разработала и испытала входящая в консорциум совместная норвежско-финская компания Nordic Ammunition Company (Nammo). Гибридный ЖРД Nammo работает на высококонцентрированной (87,5%) перекиси водорода H_2O_2 (окислитель) и полибутADIENE с гидроксильными концевыми группами — НТРВ (твердое топливо). На рис. 12 показан принцип работы гибридного двигателя Nammo. Поступающий жидкий окислитель разлагается через слой катализатора на горячий пар и газообразный кислород при температуре 670 °С. Через форсунки кислород поступает в камеру сгорания и самовоспламеняется при контакте с твердым топливом. Продукты сгорания выбрасываются через стандартное сопло, создавая тягу.

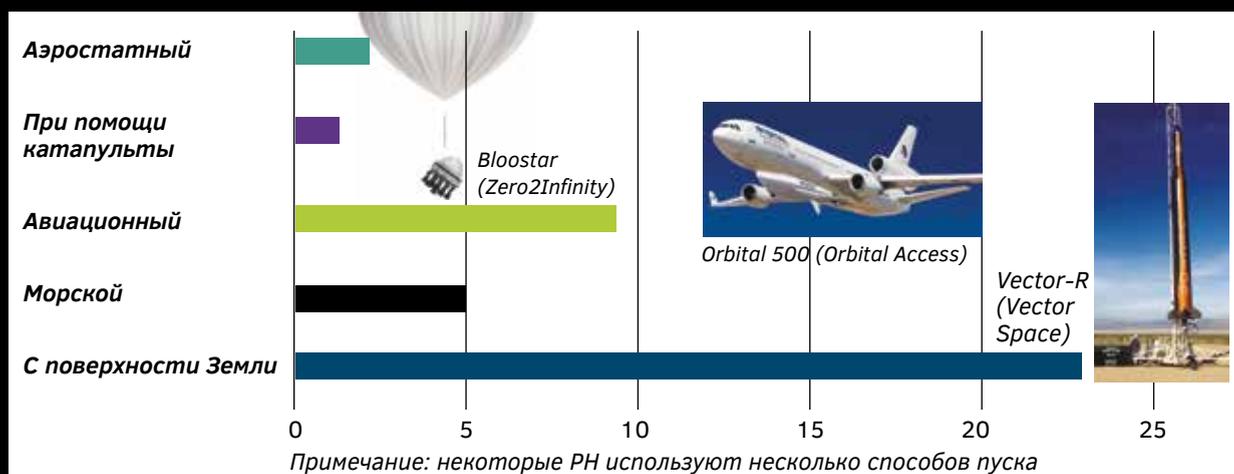
По сравнению с твердотопливными ракетными двигателями гибридный двигатель, разработанный Nammo, обладает такими преимуществами, как самовоспламенение топлива, повышающее надежность запуска двигателя и позволяющее осуществлять многократный повторный запуск, широкий диапазон регулирования тяги, экологичность, низкая стоимость и др.

ЖРД на жидком кислороде и керосине Jet A-1, сочетающий технологию транспирационного охлаждения и использование керамических матричных композитных материалов, разработан и изготовлен Проектно-конструкторским институтом DLR (Institute of Structures and Design, Штутгарт, Германия). По сравнению с ЖРД из традиционных конструкционных материалов двигатель DLR обладает меньшей массой, большими долговечностью, термостойкостью, термоциклическостью, надежностью и устойчивостью к повреждениям и другими преимуществами. ЖРД, созданный DLR, позволяет также регулировать тягу в очень широком диапазоне (от 5 до 100%) и может также запускаться повторно.

В качестве возможного решения для первой ступени РН рассматривается клиновоздушный ЖРД с авторегулированием типа AeroSpike с керамическим соплом шестиугольной конфигурации и 30 камерами сгорания гибридных РД или обычных ЖРД (рис. 12).

Консорциум SMILE пришел к выводу о целесообразности использования при изготовлении борто-

РИС. 13. Способы пуска сверхлегких РН [13]



вых электронных и электромеханических систем РН (инерциальных измерительных устройств, систем преобразования и распределения электропитания, бортовых компьютеров и др.) коммерческих COTS-технологий (Commercial Off-The-Shelf), по аналогии с одним из идеологических принципов создания малых КА. Заметим, что COTS-компоненты (микросхемы и другие аппаратные компоненты, технологии, а также программное обеспечение) существенно дешевле, чем используемая в настоящее время элементная компонентная база классов military или space.

3. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВЕРХЛЕГКИХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В последние годы в мире между разработчиками сверхлегких РН наблюдается соревнование, направленное на максимальное снижение стоимости выведения 1 кг полезного груза на орбиту. Победителю достанется большая доля коммерческих запусков малых КА.

Анализ проектов сверхлегких РН, упомянутых в выше приведенном обзоре, показал, что добиться улучшения удельных экономических показателей сверхлегких носителей можно самыми различными способами, отнюдь не замыкаясь в традиционной парадигме конструктивного исполнения ракеты. Основными направлениями дальнейшего развития конструктивных схем и технологий сверхлегких РН являются:

1. Совершенствование технологий изготовления силовых элементов конструкции РН, топливных баков и ракетных двигателей. Такие технологии

должны быть адаптированы к выпуску малосерийной или даже уникальной продукции, приспособлены к быстрой перенастройке технологического процесса и, конечно, должны быть ориентированы на использование легких и прочных материалов.

Первое требование в настоящее время успешно реализуется за счет использования аддитивных технологий. Различные технологии 3D-печати используются не только для изготовления практически любых элементов конструкции РН и ракетных двигателей, но и для получения твердотопливных зарядов гибридных ракетных двигателей (американская компания Rocket Crafters в 2017 году получила патент на 3D-печать топливных зарядов для гибридных ракетных двигателей, устанавливаемых на сверхлегкую РН Intrepid [28]).

Второе требование может быть реализовано главным образом на основе использования углеродных композитов для изготовления элементов конструкции РН и двигателей. Очевидно, что, чем меньше сухая (без топлива) масса конструкции РН, тем выше конструктивное совершенство ракеты и тем ниже стоимость выведения 1 кг полезного груза на орбиту. Правда, стоимость углеродных композитов достаточно высока и существенно зависит от объемов их производства. Так, даже в США цена углеродного волокна начинается с 135 долл. за 1 кг; при раскрое до 35% материала уходит в утиль, что повышает расходы до 200 долл. за 1 кг [12]. Тем не менее использование углеродных композитов оправданно именно для изготовления элементов конструкции сверхлегких РН.

2. Выбор типа ракетного двигателя и топлива. Для тяжелых РН стоимость ЖРД может составлять свыше 50% от стоимости ракеты. Для РН

Несмотря на то, что стоимость углеродных композитов достаточно высока и при раскрое до 35% материала уходит в утиль, использование углеродных композитов оправданно именно для изготовления элементов конструкции сверхлегких ракет-носителей.

сверхлегкого класса доля стоимости двигателя меньше, но, так или иначе, по нашим оценкам, не менее 30–40%.

Конечно, в сверхлегкой РН можно использовать простой ЖРД открытой схемы с вытеснительной системой подачи топлива, имеющий менее напряженные характеристики и пониженный износ турбины, более высокую надежность и меньшую стоимость по сравнению с мощными ЖРД для более тяжелых ракет.

Наряду с таким решением, с точки зрения удешевления РН в целом, интерес представляют также клиновоздушные ЖРД типа Aerospike. Во-первых, такие двигатели за счет регулирования давления истекающей газовой струи в зависимости от изменения атмосферного давления по мере набора высоты (авторегулирование) позволяют сэкономить порядка 25–30% топлива. Во-вторых, за счет использования керамических матричных композитных материалов можно существенно упростить технологию изготовления сопла двигателя (плоский клин или клинообразный многогранник) и его массу, одновременно решив проблему охлаждения сопла (термостойкая керамика плюс, в случае необходимости, транспирационное охлаждение).

Возможно, по совокупности технических характеристик, стоимость РН может быть снижена при использовании гибридных ракетных двигателей, в частности за счет применения аддитивных технологий для изготовления зарядов твердых горючих [27, 28] и отказа от криогенных окислителей.

Нужно сказать, что выбор в качестве ракетного топлива традиционной пары «керосин + жидкий кислород» — далеко не единственное возможное решение. Альтернативой керосину может быть пропилен (пропен или метилэтилен), метан или сжиженный природный газ, а в качестве окислителя может использоваться концентрированная перекись водорода. В рассмотренных выше проектах имеются попытки использовать и не совсем традиционные пары химических веществ, например, скипидар + азотная кислота или закись азота + ацетилен.

3. Модульность конструкции РН, позволяющая, в плане снижения стоимости пуска, во-первых, унифицировать элементы конструкции ракеты, а во-вторых — более точно масштабировать энергетические возможности носителя для запуска конкретной полезной нагрузки.

Унификация позволяет повысить серийность производства элементов конструкции РН (двигателей, ракетных блоков), а значит снизить их стоимость. Потенциал масштабирования энергетических возможностей, достигаемый, как правило, за счет изменения количества унифицированных ракетных блоков в стартовой конфигурации РН, позволяет более полно использовать энергетику ракеты (очевидно, что переразмеренность энергетики эквивалентна повышению стоимости выведения на орбиту 1 кг полезного груза) и более оперативно, в случае необходимости, выполнять заказ по запуску конкретного КА (а это позволяет более полно реализовать преимущества сверхлегких РН — запуск по требованию).

Из всех рассмотренных выше проектов сверхлегких РН наиболее полно и в определенной степени прямолинейно концепция модульности реализуется в проекте Neptune американской фирмы Interorbital Systems Corporation. В результате такого прямолинейного подхода к модульности конструкции РН удельные экономические показатели минимальной конфигурации РН Neptune N1 с морским стартом лишь немного лучше показателей, к примеру, РН Sab-3A с воздушным стартом (см. табл. 3 в № 3(100), 2019, стр. 62).

4. Выбор способа пуска РН также может оказать существенное влияние как на стоимость пуска, так и на реализацию технических преимуществ сверхлегких РН. Проектные проработки РН сверхлегкого класса предусматривают пуски ракет как с традиционных наземных стационарных и подвижных стартовых пусковых установок, так и с авиационных, аэростатических носителей и с морских платформ (рис. 13).

Стартовая пусковая установка сверхлегкой ракеты существенно проще, чем пусковые установки более тяжелых ракет-носителей, и может представлять собой наклонную ферменную конструкцию на подвижной платформе. Однако выполнение такого требования к сверхлегким РН, как возможность запусков КА на широкий спектр наклонов орбит, в этом случае проблематично — наклонение орбиты ограничено шириной места размещения пусковой установки. Поэтому представляется более перспективным пуск сверхлегкой РН с подвижного основания. Наиболее просто это решается в проекте Neptune фирмы IOS: пуск РН производится на заданной широте из полузатапливаемого

морского контейнера. Правда, в этом случае невозможно обеспечить оперативный запуск КА: требуется время для доставки контейнера с РН к месту старта.

Гораздо более привлекателен пуск с авиационного или аэростатического носителя: в этом случае обеспечиваются ненулевые значения начальной скорости и начальной высоты полета РН, что позволяет вывести большую полезную нагрузку, располагая меньшей энергетикой РН. Однако, как показывает практика, обеспечить приемлемую стоимость пуска, а тем более высокие удельные экономические показатели авиационно-космических или аэростатно-космических комплексов сложно по целому ряду причин. В первую очередь, очевидно, из-за сложности транспортировки и пуска РН с ЖРД, особенно в случае заправки РН криогенными компонентами топлива (твердотопливные РН, как показал опыт Pegasus XL, оказываются еще более дорогими).

5. Повторное использование РН или элементов конструкции РН, в первую очередь двигательной установки первой ступени как наиболее дорогого элемента ракеты, способно снизить стоимость пуска только при достаточно высоком темпе запусков КА: порядка нескольких десятков в год. Как раз такой высокий темп пусков и способны обеспечить сверхлегкие РН.

Наиболее сложную проблему представляет спасение ракетного блока (двигательной установки). Это связано с затратами массы и энергии РН на средства спасения и посадки, а также с необходимостью обеспечить отсутствие повреждений при приземлении или приводнении элементов конструкции РН.

В настоящее время по крайней мере в двух проектах сверхлегких РН предусматривается спасение и повторное использование ракетных блоков первой ступени:

— New Line 1 (частная компания Link Space Aerospace Technology Group, Китай), ступень спасается методом ракетно-динамической (вертикальной) посадки [12];

— Arion 2/Miura 5 (компания PLD Space, Испания), выбирается метод спасения ступени: парашют, парашют, надувное тормозное устройство, ракетно-динамическая посадка [12, 20].

6. Использование при изготовлении бортовых электронных и электромеханических систем РН (инерциальных измерительных устройств, систем преобразования и распределения электропитания, бортовых компьютеров и др.) коммерческих COTS-технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вывод из проведенного анализа заключается в следующем: принимая во внимание сформулированные выше направления улучшения удельных экономических показателей сверхлегких РН, необходимо в то же время продолжать поиск путей, методов и средств улучшения технико-экономических показателей сверхлегких РН, не замыкаясь в традиционных проектно-конструкторских решениях. Технико-экономическая эффективность реализации найденных проектных решений определяется не только собственно решениями, но и их взаимной системной интеграцией, а также технологиями их реализации.

Пуск с авиационного или аэростатического носителя гораздо более перспективен, чем пуск с поверхности Земли: в этом случае обеспечиваются ненулевые значения начальной скорости и начальной высоты полета ракеты-носителя, что позволяет вывести большую полезную нагрузку, располагая меньшей энергетикой.

По состоянию на сегодняшний день основные требования к РН сверхлегкого класса могли бы быть сформулированы следующим образом:

- масса полезного груза, выводимого на НОО высотой порядка 500 км, — от 50 до 300 кг;
- стоимость пуска — не более 4–6 млн долл. ;
- стоимость выведения на орбиту 1 кг полезного груза — не более 3–3,5 тыс. долл.

Приведенные цифры будут уточняться по мере развития технологий и рынка пусковых услуг малых КА.

Литература

1. **Timo Wekerle et al.** Status and Trends of Smallsats and Their Launch Vehicles — An Up-to-date Review // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2017. Vol. 9. No. 3. Pp. 269-286. DOI: 10.5028/jatm.v9i3.853
2. **Сенькин В. С.** Оптимизация проектных параметров ракеты-носителя сверхлегкого класса // *Техническая механика*. 2009. № 1. С. 80-88.
3. *To Reach the High Frontier: A History of U.S. Launch Vehicles*. 1st Edition, University Press of Kentucky, 2002. 525 p.
4. *Encyclopedia Astronautica* [Электронный ресурс]. URL: <https://everipedia.org> (Дата обращения: 20.04.2019).
5. *Smallsat Launch Vehicle Markets* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsr.com/research/smallsat-launch-vehicle-markets/> (Дата обращения: 30.03.2019).
6. **Hertzfeld H. R.** The State of Space Economic Analyses: Real Questions, Questionable Results // *New Space*. 2013. No. 1(1). Pp. 21-28.
7. *2018 Nano/Microsatellite Launch History & Market Forecast (1-50 kg)* [Электронный ресурс]. URL: <https://twitter.com/SpaceWorksSEI/media> (Дата обращения: 28.03.2019).
8. **Sweeting M.** ICT Business with Micro/Mini-Satellites [Электронный ресурс]. URL: http://www.soumu.go.jp/main_content/000462909.pdf (Дата обращения: 29.03.2019).
9. *Smallsat constellations* [Электронный ресурс]. URL: <https://satelliteobservation.net/2017/02/11/smallsat-constellations/> (Дата обращения: 28.03.2019).
10. *Micro-launchers: what is the market? Quick and flexible delivery of small payloads*. February 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2017/02/micro-lanceurs_dec2016.pdf (Дата обращения: 30.03.2019).
11. *Surplus missile motors. Sale Price Drives Potential Effects on DOD and Commercial Launch Providers*. Report to Congressional Addressees // *United States Government Accountability Office (GAO-17-609)*, August 2017. 58 p.
12. *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*. Federal Aviation Administration, January 2018, Washington. 255 p.
13. **Carlos Niederstrasser.** *Small Launch Vehicles – A 2018 State of the Industry Survey* // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC18-IX-01 [Электронный ресурс]. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4118&context=smallsat> (Дата обращения: 01.03.2019).
14. *Japan's SS-520 CubeSat Launch Vehicle Achieves Success on Second Try* [Электронный ресурс]. URL: <http://spaceflight101.com/japan-ss-520-5-launch-success/> (Дата обращения: 01.03.2019).
15. **SPARK (Super Strypi)** [Электронный ресурс]. URL: <http://spaceflight101.com/spacerockets/spark-super-strypi/> (Дата обращения: 01.03.2019).
16. **Max Polyakov.** *Relaunches Firefly with High Hopes to Bridge Gap between CubeSats and Space* [Электронный ресурс]. URL: <https://noosphereventures.com/max-polyakov-relaunches-firefly-aerospace-with-high-hopes-to-bridge-gap-between-cubesats-and-space/> (Дата обращения: 01.03.2019).
17. *Firefly Payload User's Guide*. August 10, 2018. Austin (Texas): Firefly Aerospace Inc. 64 p.
18. *Electron. Payload User's Guide*. Version 6.2, Rocket Lab. New Zealand, 2018. 53 p.
19. *Vector-H Forecasted Launch Service Guide – VSS-2017-023 - Version 2.0*. Tucson (Arizona): Vector Space Systems, 2017. 14 p.
20. *Arion-2 Miura-5* [Электронный ресурс]. URL: http://www.b14643.de/Spacerockets_3/PLD-Space/Description/Frame.htm (Дата обращения: 01.03.2019).
21. *ARCA to Perform Historic First Flight of AeroSpike*. Press Release: June 15th, 2017 [Электронный ресурс]. URL: http://www.arcaspace.com/en/ARCA_Space_Corporation_Demonstrator_3_Press_Release.pdf (Дата обращения: 01.03.2019).
22. *IOS Neptune* [Электронный ресурс]. URL: http://www.b14643.de/Spacerockets_3/Interorbital-Systems/Description/Frame.htm (Дата обращения: 01.03.2019).
23. **Kieran Hayward, José Mariano López.** *Small satellite launch vehicle from a balloon platform / 13th Reinventing Space Conference*. 9-12 November 2015. Oxford, UK (BIS-RS-2015-60) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zero2infinity.space/wp-content/uploads/2017/08/RISpace-Paper-KH-Final.pdf> (Дата обращения: 01.03.2019).
24. *Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) Independent Performance Evaluation* David Young AE8900. Special Project Report May 3, 2004, School of Aerospace Engineering Space System Design. Laboratory Georgia Institute of Technology. Georgia 30332-0150 [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/1853/8372> (Дата обращения: 01.03.2019).
25. *ALASA* [Электронный ресурс]. URL: https://space.skyrocket.de/doc_lau/alasa.htm (Дата обращения: 01.03.2019).
26. *US Military's XS-1 Space Plane Will Be Built by Boeing* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.space.com/36985-darpa-xs-1-spaceplane-boeing-phantom-express.html> (Дата обращения: 01.03.2019).
27. **Bertil Oving, Arnaud Van Kleef, Bastien Haemmerl, Adrien Boiron, Markus Kuhn, Ilja Müller, Ivaylo Petkov, Marina Petrozzi, Ana-Maria Neculaescu, Tudorel Petroneel Afilipoae.** *Small Innovative Launcher for Europe: achievement of the H2020 project SMILE / 7th European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS)*. Milan, Italy, 3-6 July 2017. DOI: 10.13009/EUCASS2017-600
28. *New patent granted to 3D printed hybrid rocket fuel engines for low cost access to space* [Электронный ресурс]. URL: <https://room.eu.com/news/new-patent-granted-to-3d-printed-hybrid-rocket-fuel-engines-for-low-cost-access-to-space> (Дата обращения: 15.04.2019).



References

1. **Timo Wekerle et al.** Status and Trends of Smallsats and Their Launch Vehicles — An Up-to-date Review. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 269–286. DOI: 10.5028/jatm.v9i3.853
2. **Sen'kin V. S.** Optimizatsiya proektnykh parametrov rakety-nositelya sverkhlegkogo klassa. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2009, no. 1, pp. 80–88.
3. **To Reach the High Frontier: A History of U.S. Launch Vehicles.** 1st Edition, University Press of Kentucky, 2002. 525 p.
4. *Encyclopedia Astronautica.* Available at: <https://everipedia.org> (Retrieval date: 20.04.2019).
5. *Smallsat Launch Vehicle Markets.* Available at: <https://www.nsr.com/research/smallsat-launch-vehicle-markets/> (Retrieval date: 30.03.2019).
6. **Hertzfeld H. R.** The State of Space Economic Analyses: Real Questions, Questionable Results. *New Space*, 2013, no. 1(1), pp. 21–28.
7. **2018 Nano/Microsatellite Launch History & Market Forecast (1-50 kg).** Available at: <https://twitter.com/SpaceWorksSEI/media> (Retrieval date: 28.03.2019).
8. **Sweeting M.** ICT Business with Micro/Mini-Satellites. Available at: http://www.soumu.go.jp/main_content/000462909.pdf (Retrieval date: 29.03.2019).
9. *Smallsat constellations.* Available at: <https://satelliteobservation.net/2017/02/11/smallsat-constellations/> (Retrieval date: 28.03.2019).
10. **Micro-launchers: what is the market? Quick and flexible delivery of small payloads.** February 2017. Available at: https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2017/02/micro-lanceurs_dec2016.pdf (Retrieval date: 30.03.2019).
11. **Surplus missile motors. Sale Price Drives Potential Effects on DOD and Commercial Launch Providers.** Report to Congressional Addressees. United States Government Accountability Office (GAO-17-609), August 2017. 58 p.
12. **The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018.** Federal Aviation Administration, January 2018, Washington. 255 p.
13. **Carlos Niederstrasser.** Small Launch Vehicles – A 2018 State of the Industry Survey // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC18-IX-01. Available at: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4118&context=smallsat> (Retrieval date: 01.03.2019).
14. **Japan's SS-520 CubeSat Launch Vehicle Achieves Success on Second Try.** Available at: <http://spaceflight101.com/japan-ss-520-5-launch-success/> (Retrieval date: 01.03.2019).
15. **SPARK (Super Strypi).** Available at: <http://spaceflight101.com/spacerockets/spark-super-strypi/> (Retrieval date: 01.03.2019).
16. **Max Polyakov.** Relaunches Firefly with High Hopes to Bridge Gap between CubeSats and Space. Available at: <https://noosphereventures.com/max-polyakov-relaunches-firefly-aerospace-with-high-hopes-to-bridge-gap-between-cubesats-and-space/> (Retrieval date: 01.03.2019).
17. **Firefly Payload User's Guide.** August 10, 2018. Austin (Texas): Firefly Aerospace Inc. 64 p.
18. **Electron. Payload User's Guide.** Version 6.2, Rocket Lab. New Zealand, 2018. 53 p.
19. **Vector-H Forecasted Launch Service Guide – VSS-2017-023 - Version 2.0.** Tucson (Arizona): Vector Space Systems, 2017. 14 p.
20. **Arion-2 Miura-5.** Available at: http://www.b14643.de/Spacerockets_3/PLD-Space/Description/Frame.htm (Retrieval date: 01.03.2019).
21. **ARCA to Perform Historic First Flight of Aerospike.** Press Release: June 15th, 2017. Available at: http://www.arcaspace.com/en/ARCA_Space_Corporation_Demonstrator_3_Press_Release.pdf (Retrieval date: 01.03.2019).
22. **IOS Neptune.** Available at: http://www.b14643.de/Spacerockets_3/Interorbital-Systems/Description/Frame.htm (Retrieval date: 01.03.2019).
23. **Kieran Hayward, José Mariano López.** Small satellite launch vehicle from a balloon platform / 13th Reinventing Space Conference. 9-12 November 2015. Oxford, UK (BIS-RS-2015-60). Available at: <http://www.zero2infinity.space/wp-content/uploads/2017/08/RISpace-Paper-KH-Final.pdf> (Retrieval date: 01.03.2019).
24. **Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) Independent Performance Evaluation David Young AE8900.** Special Project Report May 3, 2004, School of Aerospace Engineering Space System Design. Laboratory Georgia Institute of Technology. Georgia 30332-0150. Available at: <http://hdl.handle.net/1853/8372> (Retrieval date: 01.03.2019).
25. **ALASA.** Available at: https://space.skyrocket.de/doc_lau/alasa.htm (Retrieval date: 01.03.2019).
26. **US Military's XS-1 Space Plane Will Be Built by Boeing.** Available at: <https://www.space.com/36985-darpa-xs-1-spaceplane-boeing-phantom-express.html> (Retrieval date: 01.03.2019).
27. **Bertil Oving, Arnaud Van Kleef, Bastien Haemmerl, Adrien Boiron, Markus Kuhn, Ilja Müller, Ivaylo Petkov, Marina Petrozzi, Ana-Maria Neculaescu, Tudorel Petronel Afilipoe.** Small Innovative Launcher for Europe: achievement of the H2020 project SMILE / 7th European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS). Milan, Italy, 3-6 July 2017. DOI: 10.13009/EUCASS2017-600
28. **New patent granted to 3D printed hybrid rocket fuel engines for low cost access to space.** Available at: <https://room.eu.com/news/new-patent-granted-to-3d-printed-hybrid-rocket-fuel-engines-for-low-cost-access-to-space> (Retrieval date: 15.04.2019).

© Ключников В.Ю., 2019

История статьи:

Поступила в редакцию: 23.08.2019

Принята к публикации: 19.09.2019

Модератор: Дмитрюк С. В.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Ключников В. Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. №4. С. 64-75.