

## ДВУХЪЯРУСНАЯ СИСТЕМА ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.И. Горбулин, В.И. Щербаков  
(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

*Представлен инженерный анализ двухъярусной системы транспортного обслуживания МКА. Верхний (орбитальный) сегмент транспортно-технологического обслуживания (хранение, подготовка и выведение, восполнение систем МКА, утилизация) представляет собой пилотируемую орбитальную станцию, оснащённую космической тросовой системой. Нижний ярус системы – это РН среднего класса для доставки экипажей и грузов на орбитальную станцию.*

**Ключевые слова:** МКА, транспортно-технологическое обслуживание, космическая тросовая система.

В середине 90-х годов прошлого столетия существенно изменились приоритеты в разработке космических аппаратов [1]. В результате интенсивно развивающегося процесса миниатюризации КА удалось снизить массы некоторых тяжёлых и больших КА и создать новые аппараты аналогичного назначения с массой в несколько сотен килограмм, т. е. появился класс малых космических аппаратов (МКА).

В России концепция использования МКА была принята на государственном уровне. В Федеральной космической программе (ФКП) 2006 – 2015 гг. специально предусмотрено создание целой серии МКА на базе унифицированной спутниковой платформы. По оценке специалистов наряду с миниатюризацией КА тяжёлые КА продолжают свое развитие в направлении комплексного применения.

Согласно сложившейся классификации [1 – 3], к тяжёлым, средним и легким КА относятся аппараты массой более 500 кг. Для спутников массой менее 500 кг принята следующая международная классификация: мини-спутники (100 – 500 кг); микроспутники (10 – 100 кг); наноспутники (1 – 10 кг); пикоспутники (0,1 – 1 кг); фемтоспутники – до 100 г.

МКА обладают заметными преимуществами перед большими КА [2]. Это экономическая эффективность целевого использования МКА на низких орбитах; адаптивные технологии создания МКА для решения широкого круга задач, предполагающие сокращение расходов и рисков; малые сроки разработки целевого МКА; возможность оперативного и скрытного запуска МКА при высокой оперативности подготовки к запуску; удешевление выведения и орбитальной эксплуатации МКА.

В целом круг задач, решаемых с помощью МКА, достаточно широк и включает в себя мониторинг окружающей среды; сбор и передачу данных; метеорологию; навигацию и связь; прогнозирование опасных явлений и оперативный контроль

чрезвычайных ситуаций; использование в интересах отработки новых технологий, образования, бизнеса и банковского дела; поиск и спасение людей, транспортных средств; контроль линий газо- и нефтепроводов; поиск полезных ископаемых; слежение за перемещением и сохранностью крупных и ценных грузов и т. д.

Высокая экономическая и целевая эффективность применения МКА способствует бурному росту услуг в этом сегменте рынка. Около 80% финансовых средств [4], которые вкладываются в развитие и эксплуатацию МКА, составляют частные инвестиции. Это приводит к увеличению доли МКА в составе орбитальной группировки КА. Отмеченная тенденция имеет устойчивый возрастающий характер, что подтверждается статистическими данными по запуску МКА за последние тридцать лет.

По оценке Л.А. Макриденко и К.А. Боярчука [5] количество МКА, выведенных на орбиты за период с 1981 по 2001 гг., составило 540 аппаратов, из которых 356 МКА были запущены в 1990-е годы. Наиболее интенсивными были запуски МКА [1, 6] во второй половине 1990-х годов (рис. 1).

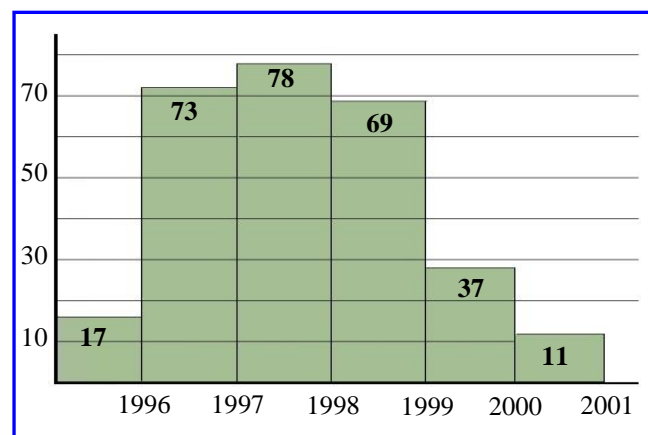


Рис. 1. Статистика запусков в мире всех типов МКА

По оценке корпорации Teal Group [4] в период с 2000 по 2010 гг. в мире ежегодно запускалось от 40 до 50 МКА, а по прогнозу на период с 2010 по 2014 гг. ожидается рост количества запусков на 38%, и будет выведено на орбиты более 400 МКА, среди которых доля нано- и пикоспутников будет максимальной.

Характеристика запусков МКА в период с 1996 по 2003 гг. по классам носителя и способам выведения представлена на рис. 2 и 3, которые составлены по данным [1, 2]. Запуски тяжёлых ракет-носителей и ракет-носителей среднего класса выполнялись, в основном, при групповом выведении МКА. Эта картина отражает достаточно острую проблему, которая выражается в отсутствии на рынке пусковых услуг недорогих и высоконадёжных средств выведения, без которых невозможно в полной мере использовать преимущества МКА. В настоящее время используются в основном два способа вывода малых спутников [3]: попутным запуском на среднем или тяжёлом носителе; на лёгком носителе, специально ориентированном на групповой запуск такого типа аппаратов. Основной недостаток попутного запуска МКА – это ожидание подходящего по срокам пуска

и параметрам планируемой орбиты вывода носителя.

Проблема разработки эффективных средств выведения МКА очевидна и безотлагательна. Возникают трудности с крайне низкими маневренными возможностями МКА. Дело в том, что массогеометрическая миниатюризация и повышение маневренности МКА на длительных интервалах его эксплуатации приходят к противоречию. В пределе это противоречие принципиально неразрешимо, так как реактивные двигательные установки требуют запаса рабочего тела, и по своему показателю энергомассового совершенства они, в рамках современных технологий, достигли своего предела. Таким образом, объективно возникает проблема орбитальных маневров МКА. Очевидно, что для решения этой проблемы нужны принципиально иные подходы, предполагающие комплексное рассмотрение всех этапов жизненного цикла МКА.

В работе [2] среди важнейших отмечается проблема устойчивости орбит и управления движением МКА. Это связано с тем, что находящиеся на низких орбитах МКА испытывают сопротивление разреженной атмосферы и требуют дополнительных

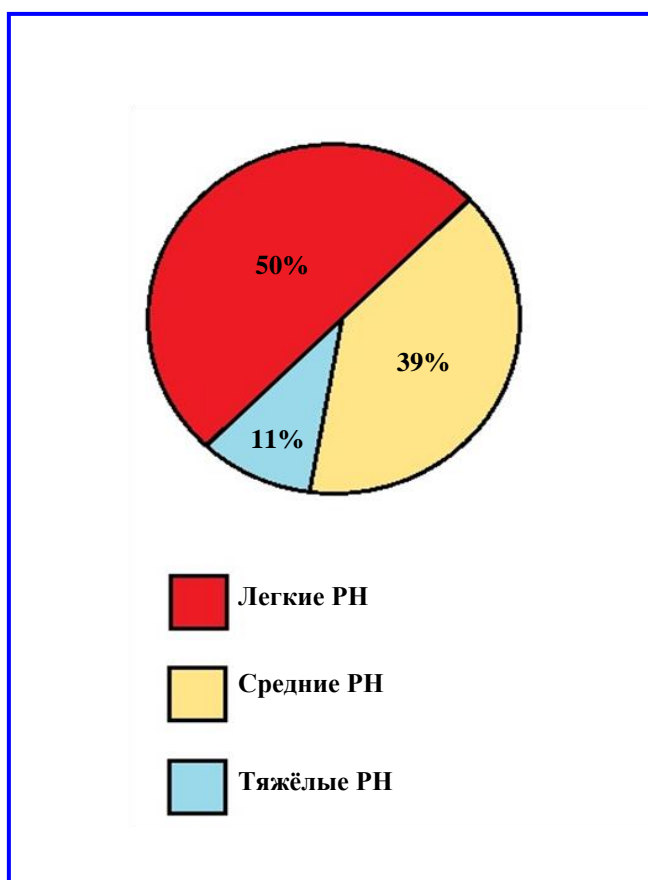


Рис. 2. РН для запуска МКА

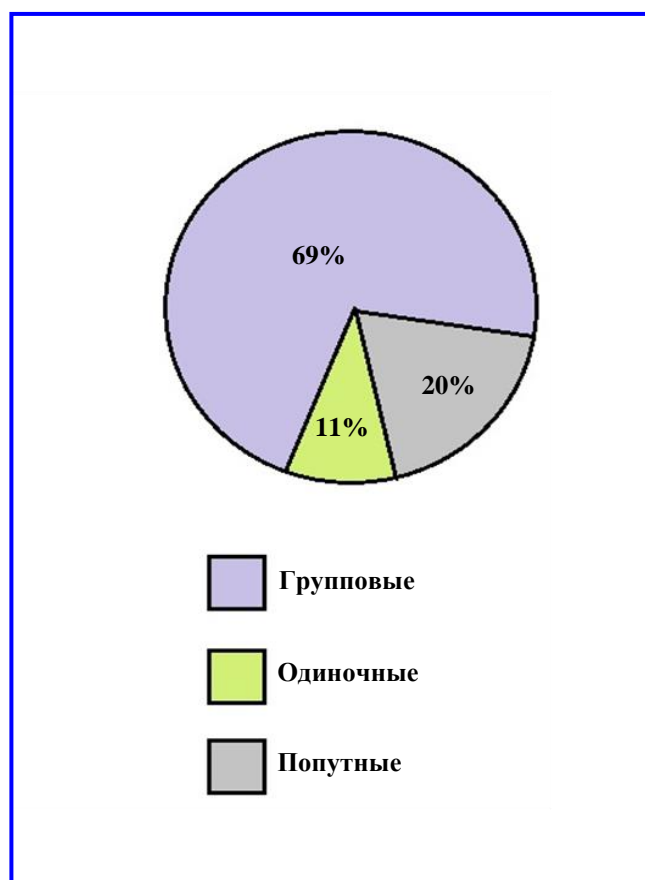


Рис. 3. Способы выведения МКА

усилий для периодического восстановления и поддержания параметров их орбит при известных ограничениях по массе рабочего тела и двигательных установок. Авторы [2] предлагают четыре основных направления решения данной проблемы:

1. Использование более высоких орбит за счёт совершенствования систем связи и спецпаратуры.

2. Разработка принципиально новых микродвигателей.

3. Удешевление запусков МКА и относительно частое восполнение орбитальной группировки.

4. Использование нетрадиционных подходов с применением больших станций, космических лифтов, солнечных парусов и др.

Выбор направления решения проблемы должен учитывать тенденции и перспективы развития космических технологий. В этом смысле научный поиск решения по третьему и четвертому направлениям может дать хорошие результаты. Остановимся на этом подробнее.

Продвижение в этом направлении приводит к новым задачам поддержания орбитальной группировки МКА с заданными целевыми требованиями путём планово-периодических дозапусков МКА. При этом МКА могут находиться на орбитальных станциях в законсервированном состоянии и выводиться на целевые орбиты по необходимости.

Такой подход, основанный на использовании космической тросовой системы (КТС) в составе международной космической станции (МКС), уже прошёл предварительные исследования в конце прошлого столетия [7]. Была рассмотрена концепция использования МКС как центра подготовки и управления эксплуатацией МКА, функционирующих в инфраструктуре МКС. В рамках концепции рассмотрены перспективы использования МКА различного назначения, в том числе периодически обслуживаемых с помощью технических средств МКС. Предложено применять космические тросовые системы как для осуществления межорбитальных переходов МКА, так и для организации экспедиций привязных субспутников. Полученные оценки показали эффективность применения тросовых систем с точки зрения существенной экономии (до 80%) бортовых запасов топлива МКА, что способно как значительно продлить срок его полёта, так и при необходимости дать возможность МКА осуществить активный манёвр по сближению и стыковке со станцией.

В случае организации экспедиций привязных МКА тросовая система позволяет проводить их многократно, свортывая трос, обслуживая МКА на базовом объекте системы и вновь разворачивая трос с привязным МКА.

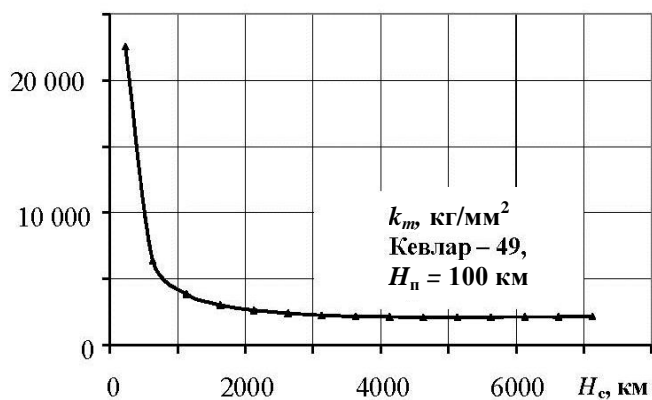
Если смотреть на это шире и рассматривать орбитальную станцию (ОС) с тросовой системой как верхний ярус и элемент системы транспортного обслуживания МКА, включающий и наземную компоненту, то можно найти экономически эффективные решения.

Анализ рынка коммерческих запусков показывает, что орбиты с наклоном в диапазонах  $51 - 63^\circ$  и  $90 - 98^\circ$ , включая полярные и солнечно-синхронные орбиты, пользуются максимальным спросом. Таким образом, две орбитальные станции транспортно-технологического обслуживания МКА, оснащённые космической тросовой системой, способны перекрыть эти диапазоны. При этом функция наземной транспортной компоненты остается неизменной.

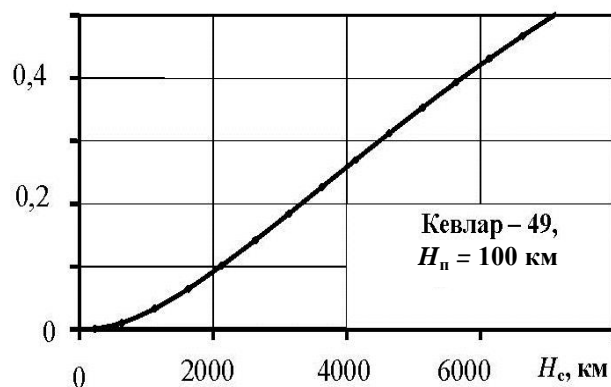
Необходимо отметить ещё один очень важный аспект, который, к сожалению, исследователями не актуализируется. Массовое применение МКА и частое восполнение орбитальных группировок МКА приводит к техногенному загрязнению космической среды. В связи с этим по степени важности проблемы выведения и утилизации МКА должны быть равнозначными.

Исследование маневренных возможностей тросовых систем показывает [8, 9], что по эквивалентным затратам характеристической скорости они более чем в 60 раз эффективнее ракетодинамических импульсных манёвров. Манёвры тросовых систем базируются на принципе обмена механической орбитальной энергией между связанными телами. В связи с этим параметры орбиты станции обслуживания легко восстановить путём организации транспортного потока выведение – утилизация.

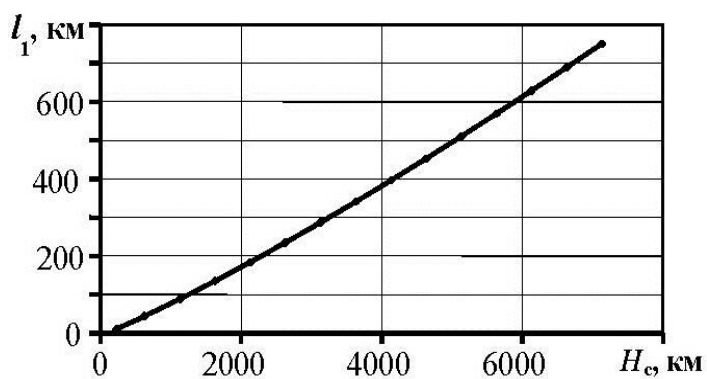
Конфигурация устройства разворачивания тросовой системы определяется многими факторами. Наиболее важными являются: соотношение масс концевых элементов; длина и механические свойства троса; условия разделения и относительного движения концевых элементов; способы укладки троса. Известны устройства выпуска троса, выполненные в виде не вращающихся («безынерционных») катушек. Такие катушки могут использоваться только для выпуска тросов малого диаметра с небольшим натяжением. Известны также устройства выпуска троса, выполненные в виде лебёдок, содержащих



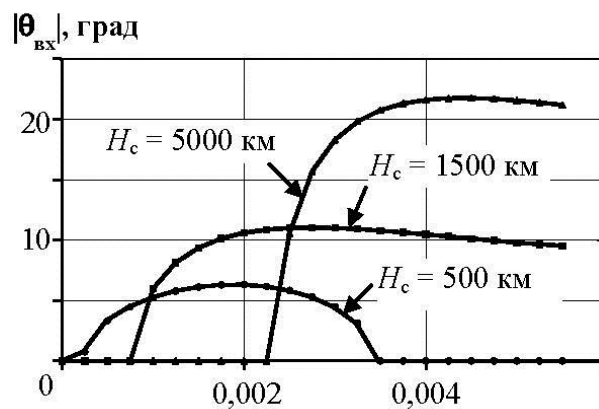
Коэффициента максимальной массы МКА



Функция относительной массы троса



Потребная длина троса



Функция угла входа в атмосферу на высоте  $H_{УГА} = 100$  км для разных стартовых орбит (УГА – условная граница атмосферы)

Рис. 4. Графические характеристики манёвра спуска МКА

вращающийся барабан с тросом и автоматизированным электроприводом.

Развёртывание троса может происходить в активном или пассивном режимах. В первом случае предполагается активное управление относительным движением объектов КТС на всём этапе развёртывания системы. В качестве управляющего воздействия используется сила натяжения троса. Альтернативой является пассивное разведение, при котором конечное фазовое состояние системы обеспечивается параметрами разделения объектов (начальными условиями движения). При пассивном развёртывании троса параметры траектории развёртывания определяются начальными условиями на момент разделения объектов и перехода их на свободные траектории движения со свободной подачей троса. Пример такой схемы развёртывания в задаче спуска с орбиты МКА рассмотрен в [8, 9]. Основные этапы спуска: импульсное отделение МКА от ОС против вектора скорости; разведение объектов на заданную длину троса; переход в маятниковый режим движения; отделение МКА в момент прохождения им местной вертикали. Механика манёвра выведения МКА на высокую орбиту аналогична, при этом ориентация импульса скорости «выталкивания» МКА с ОС изменяется на  $180^\circ$ .

На рис. 4 представлены массовые характеристики и характеристики маневренных возможностей МКА при использовании тросовой системы в задаче спуска МКА на Землю (высота условного перигея  $H_p = 100$  км).

С помощью коэффициента максимальной массы МКА  $k_m$  устанавливается связь между массой МКА  $m_{\text{МКА}} = k_m S$  и минимально допустимым сечением троса  $S$  при старте МКА с ОС, находящейся на круговой орбите высотой  $H_c$ . Функция относительной массы троса характеризует массовое соотношение МКА – трос. Функция угла входа МКА в атмосферу характеризует условия входа МКА в задаче спуска (утилизации). Аргументом этой функции является безразмерный импульс скорости «выталкивания» МКА, отнесённый к местной круговой скорости.

Например для довыведения МКА с помощью тросовой системы с борта ОС, находящейся на орбите с высотой  $H_c = 400$  км, на орбиту с высотой апогея 1000 км, параметры тросовой системы должны быть: длина троса – 41 км, импульс «вы-

талкивания» – 2,6 м/с, время манёвра довыведения около 3 ч.

Для спуска МКА на Землю с орбитальной станции потребуется 22 км троса при импульсе скорости отделения 1,4 м/с.

Для МКА массой менее 500 кг потребный диаметр троса, изготовленного из арамидного волокна Кевлар-49, не превышает 0,5 мм.

Таким образом, предложенная концепция двухъярусной системы транспортно-технологического обслуживания МКА содержит в себе большие потенциальные возможности комплексного решения проблемы выведения МКА. Существующий научно-технический и технологический задел позволяет уже сегодня переходить к экспериментальной фазе создания и внедрения космических тросовых систем.

### Литература

1. Анализ космического рынка малых спутников и средств их выведения / В. В. Вахниченко, А. С. Осадченко, А. М. Ромашкин // 3-я Международная конференция – выставка по малым спутникам. – Королев. – 2002.
2. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. П. Ходненко, С. А. Золотой // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – С. 15 – 26.
3. Овчинников М. Ю. Малые мира сего / М. Ю. Овчинников // Компьютерра – 2007. – № 15 – С. 37 – 43.
4. <http://www.engagingnews.us/select/Teal+Group+Corp.html>.
5. Макриденко Л. А., Боярчук К. А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение / Л. А. Макриденко, К. А. Боярчук // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102. – С. 12 – 27.
6. Анализ основных особенностей рынка малых КА / В. В. Бобылев, В. К. Кузьминов, С. А. Кучеров, А. П. Соловьева // Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении. – Таруса. – 2004. – С. 349 – 361.
7. Использование орбитальных тросовых систем при выведении малых КА на рабочие орбиты и в ходе операций по возвращению МКА с целью их последующего повторного использования / В. И. Лукьященко, В. В. Борисов, Г. Р. Успенский [и др.] // Космос и человек. – Выпуск 6. – М. : ЗАО «Центр передачи технологий», 2000. – С.45 – 51. – (Московский космический клуб).
8. Щербаков В. И. Орбитальные манёвры космической

тросовой системы / В. И. Щербаков. – СПб. : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 185 с.  
9. Щербаков В. И. Спуск с орбиты малого КА с помощью

космической тросовой системы / В. И. Щербаков. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 224 с.

*Поступила в редакцию 18.12.2012*

**Валерий Иванович Щербаков**, канд. техн. наук, доцент,  
т. 8 (960) 257-49-44, e-mail: vka114@mail.ru.  
**Владимир Иванович Горбулин**, д-р техн. наук, профессор,  
т. (812) 347-97-22, e-mail: v\_gorbulin@mail.ru.