

УДК 629.78

О. Л. Волошенко, А. В. Пирожено, Д. А. Храмов

Институту технічної механіки Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

КОСМИЧЕСКИЕ ТРОСОВЫЕ СИСТЕМЫ — ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Космічні тросові системи — системи космічних апаратів, з'єднаних протяжними гнучкими зв'язками. Більша довжина, у порівнянні із традиційними супутниками, обумовлює сильнішу взаємодію подібних систем із зовнішніми полями планети. Завдяки цьому космічні тросові системи дозволяють вирішувати широкий спектр завдань, пов'язаних з освоєнням космічного простору. Дослідження, проведені за останні 40 років, дозволяють перейти до використання переваг космічних тросових систем, зокрема для відведення з орбіти космічних об'єктів, що вже не експлуатуються, і як виносні елементи традиційних супутників.

Космической тросовой системой (КТС) называют систему искусственных космических объектов (спутников, кораблей, грузов), соединённых протяжными гибкими элементами, совершающую орбитальный полет. В простейшем виде КТС — это два спутника, соединённых тросом (рис. 1). (Для обозначения гибкой связи, соединяющей элементы КТС, в отечественной литературе используется термин «трос». На практике подобный трос имеет диаметр порядка единиц миллиметров и является скорее нитью). Более сложные системы могут состоять из множества объектов, соединённых в форме замкнутых колец, древовидных образований, объёмных многогранников [33, 37].

Основным отличием тросовых систем от традиционных космических объектов является их большая протяженность, которая может достигать десятков и сотен километров (а в отдельных случаях — даже тысяч и десятков тысяч километров) с сохранением при этом механической, энергетической и других связей между концевыми телами. Именно протяженность обуславливает ряд замечательных свойств этих систем, в

частности возможность более сильного взаимодействия с внешними полями планеты.

Известно [5], что момент гравитационных сил, действующий на систему двух связанных тел, зависит от квадрата длины связи. Это позволяет создать высокоустойчивую радиальную конфигурацию космической тросовой системы. При этом на концевых телах системы возникает искусственная сила тяжести \hat{g} , величина которой прямо пропорциональна длине троса:

$$\hat{g} = (3\Delta R/R)g,$$

где ΔR — вертикальное смещение тел относительно центра масс КТС, R — радиус орбиты центра масс относительно центра планеты, g — ускорение свободного падения на данной высоте.

Космические тросовые системы, в которых соединительный трос выполнен из электропроводных материалов, называют электродинамическими (ЭДКТС). Движущаяся по орбите ЭДКТС взаимодействует с магнитным полем Земли. В результате в тросе возникает электродвижущая сила E , пропорциональная его длине [1]:

$$E = -BIV_s,$$

где B — магнитная индукция, l — длина про-

водника, V_s — скорость движения проводника перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля.

Активное взаимодействие электропроводного троса с магнитным полем и ионосферой Земли может, в частности, использоваться для генерации электроэнергии или изменения орбиты системы.

Кинетический момент КТС зависит от квадрата длины троса [1], что даёт возможность аккумулировать большие величины кинетического момента и кинетической энергии. Накопленная энергия может использоваться для транспортировки полезной нагрузки, что позволяет рассматривать КТС в качестве альтернативы традиционным реактивным системам.

Возможность изменения конфигурации КТС путем выпуска или втягивания тросов позволяет регулировать взаимное положение, скорость и ориентацию соединенных тросами аппаратов, передвигать по тросам грузы, присоединять и отцеплять другие объекты.

Идеи использования тросовых систем в космическом пространстве имеют более чем вековую историю и восходят к работам К. Э. Циолковского [12, 13]. Для создания искусственной тяжести он предложил использовать вращающуюся связку обитаемой станции и балластной массы, соединенных цепью, а для перемещения грузов в космосе — цепочку, выпускаемую и втягиваемую лебедкой. Им же предложена идея транспортировки грузов в космос с помощью башни, основание которой находится на поверхности Земли, а вершина уходит за геостационарную орбиту. Тросовая система — аналог такой башни — получила название «космический лифт» [4].

Начало интенсивных работ над проектами по созданию КТС относится к 70-м гг. XX века и связано с именами итальянского ученого Дж. Колombo и М. Гросси (Смитсоновская астрофизическая обсерватория, США), разработавших ряд проектов практического применения КТС (в частности проекты TSS-1, TSS-2) и активно выступавших за развитие этого направления [7, 20]. Большой вклад в теоретический анализ динамики КТС внес В. В. Белецкий и его ученики [5].

К настоящему времени развитие КТС находится на стадии экспериментальной натурной

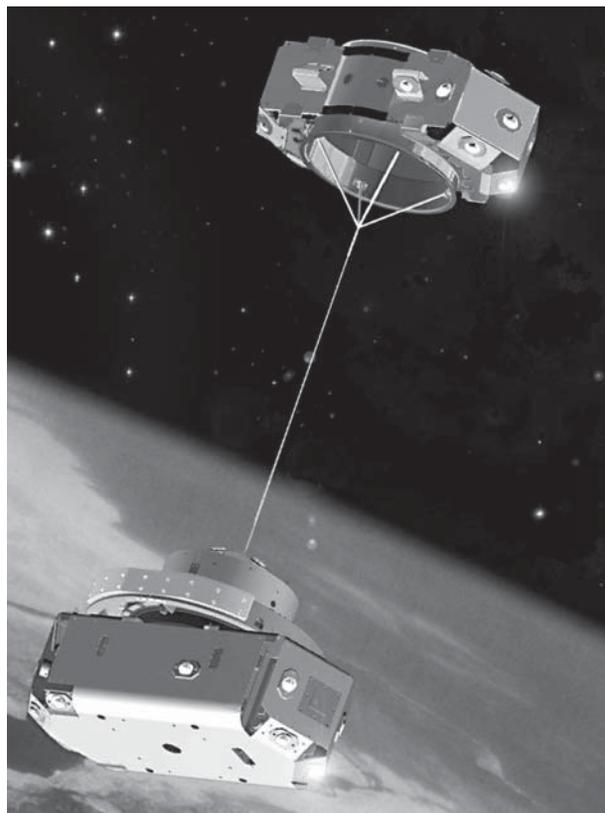


Рис. 1. Космическая тросовая система TiPS (projects.nrl.navy.mil/tips/)

отработки. После выполнения ряда полетов (таблица) достигнута определенная ясность в понимании принципиальных моментов поведения КТС. Обзоры проектов КТС и результатов полетов по состоянию на середину 1990-х гг. приведены в работах [5, 33].

В работе рассматриваются основные направления использования КТС, проблемы и перспективы развития данного направления. Основной упор сделан на результаты последнего десятилетия. Ограниченные рамки статьи не позволили сколько-нибудь подробно остановиться на ряде вопросов, в частности на проблемах функционирования ЭДКТС, многочисленных проектах транспортных КТС.

КЛАССИФИКАЦИЯ

В зависимости от способа стабилизации углового движения, КТС можно разделить на радиаль-

Запуски космических тросовых систем

Название КТС	Страна	Год пуска	Орбита	Длина	Комментарии
«Gemini-11»	США	1966	НЗО	30 м	Использование последней ступени ракеты-носителя «Agena» для стабилизации движения космического корабля. Стабилизация вращением 0.15 об/мин
«Gemini-12»	США	1966	НЗО	30 м	Стабилизация вдоль местной вертикали. Эксперименты на «Gemini-11, 12» показали как принципиальную возможность стабилизации, так и трудности ее практической реализации: плохая стабилизация, кручение ленты
H-9M-69	США	1980	Суб.	< 500 м	Неполное развертывание
S-520-2	США	1981	Суб.	< 500 м	Неполное развертывание
CHARGE-1	США, Япония	1983	Суб.	500 м	Полное развертывание
CHARGE-2	США, Япония	1984	Суб.	500 м	Полное развертывание
ECHO-7	США	1988	Суб.		Большой накопленный электрический заряд повредил электронное оборудование зонда.
OEDIPUS-A	США, Япония	1989	Суб.	958 м	Стабилизация продольным вращением концевых тел со скоростью 0.7 об/мин
CHARGE-2B	Канада, США	1992	Суб.	500 м	Полное развертывание
TSS-1	Италия, США	1992	НЗО	< 500 м	ЭДКТС. Вследствие зажима троса в лебедке его удалось выпустить всего на 265 м (вместо 20 км), после чего трос с привязным спутником были втянуты обратно
SEDS-1	США	1993	НЗО	20 км	Отработка безрасходного спуска груза с орбиты
PMG	США	1993	НЗО	500 м	ЭДКТС. Развертывание вдоль местной вертикали по направлению от Земли. Эллиптическая орбита
SEDS-2	США	1994	НЗО	20 км	Развертывание тросовой системы в вертикальное положение. Улучшенный, по сравнению с SEDS-1, закон управления развертыванием
OEDIPUS-C	Канада, США	1995	Суб.	1 км	Стабилизация продольным вращением концевых тел 0.7 об/мин
TSS-1R	Италия, США	1996	НЗО	19.6 км	ЭДКТС (генерация электроэнергии и научные исследования). Трос был размотан почти на всю длину, однако «пережегся» из-за короткого замыкания (вероятная причина — механическое повреждение изоляции). Привязной спутник был потерян
TiPS	США	1996	НЗО	4 км	Долговременный полет (исследование стойкости троса к воздействию метеорных частиц). По-видимому, проект использования тросовых антенн в космосе
ATEX	США	1999	НЗО	< 30 м	Неполное развертывание (полная длина троса: 6 км)
«Picosat-21», «Picosat-23»	США	2000	НЗО	30 м	Два спутника массами по 250 г, выполненные по технологии MEMS, созданы студентами Университета Санта-Клара, Калифорния. Трос обеспечивает возможность слежения за системой с помощью радаров
«Picosat-7», Picosat-8»	США	2001	НЗО	30 м	Два 250-граммовых спутника запущены Aerospace Corp./DARPA с борта спутника «Mightysat 2.1»
MEPSI	США	2002	НЗО	15 м.	Спутники массой по 1 кг с фотокамерой и миниатюрным передатчиком. Прототип спутника-инспектора состояния поверхности Международной космической станции (МКС)

Окончание табл.

Название КТС	Страна	Год пуска	Орбита	Длина	Комментарии
DTUSat-1	Дания	2003	НЗО	—	Студенческий спутник стандарта CubeSat с системой развертывания типа «йо-йо». На связь не вышел
MAST	США	2007	НЗО	< 10 м	Концевые тела — CubeSat'ы. Неполное развертывание
YES-2	ЕЭС, Россия	2007	НЗО	31.7 км	Неправильные показания датчика, измеряющего скорость размотки троса. Спускаемая капсула вошла в атмосферу, но не приземлилась в ожидаемом районе.
STARS	Япония	2009	НЗО	10 м	Прототип спутника-инспектора состояния поверхности МКС. Цель проекта: получить фотографии основного спутника (Mother) с борта привязного спутника. Трос удалось развернуть. В ходе полета наблюдались проблемы со стабилизацией обоих спутников.

Примечание. НЗО — низкая околоземная орбита; Суб. — суборбитальный запуск

ные и вращающиеся. Если система вращается вокруг центра масс синхронно с орбитальным движением, то при ее ориентации вдоль местной вертикали возникает режим гравитационной стабилизации. Такие системы называют радиальными. Если же средняя угловая скорость движения КТС превосходит орбитальную, то система называется стабилизированной вращением, или просто — вращающейся.

Космические тросовые системы можно классифицировать также по длине тросового соединения и массе концевых тел. В качестве эталонных примем характеристики первых глубоко проработанных проектов КТС: TSS-1 и TSS-2 [33]. Длина троса в них составляет 20 км и 100 км соответственно, масса привязного спутника — около 500 кг. Кроме этого, можно выделить малые тросовые системы — протяженностью от десятка метров до нескольких километров, с массами привязных тел от единиц до десятков килограмм. Протяженные тросовые системы могут иметь длины тросового соединения порядка сотен или даже тысяч километров. К ним относятся некоторые проекты транспортных КТС. Длина связи в сверхпротяженных тросовых системах составляет десятки тысяч километров. К таким системам относится, в частности, «космический лифт».

НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Энергетика. Высокая устойчивость радиальной КТС позволила предложить ее использование в

качестве основного несущего элемента для многочисленных проектов солнечных электростанций космического базирования [5]. Такие электростанции в будущем (см. [19]), могут служить как для обеспечения энергетических потребностей Земли, так и для нужд освоения космоса.

Последний вариант представляется более перспективным, так как не сталкивается с необходимостью решения проблем, связанных с передачей энергии на Землю через атмосферу. Передача энергии от космической электростанции к космическому аппарату (КА) возможна как беспроводным, так и проводным способом. Последний случай предполагает создание специализированной КТС, состоящей из энергосилового модуля (одного или нескольких), связанного с основным КА кабелем-тросом.

В работе [14] рассматривается проект автономного энергосилового модуля, несущего блоки панелей солнечных батарей и соединенного с космической станцией тросом длиной 1.5—6 км. Такое размещение панелей обещает ряд преимуществ, в сравнении с их расположением непосредственно на станции (улучшение центровки станции, повышение жесткости конструкции, снижение затененности и увеличение обзора). Проект предполагает также различные ориентации модуля (на Солнце) и станции (на Землю) и различные точности этих ориентаций.

Еще одним вариантом использования КТС для обеспечения КА энергией является генерация тока с помощью ЭДКТС.

Искусственная гравитация. Искусственная тяжесть, возникающая на концевых телах радиальной КТС, составляет малые доли g . Тем не менее, даже микрогравитация позволяет существенно улучшить условия функционирования на орбите: избавиться от «плавающих» предметов, облегчить обращение с водой, упростить перекачку топлива и т. д. Микрогравитация также необходима для проведения ряда научных экспериментов и технологических процессов [5, 37].

Вращающиеся КТС могут использоваться для создания искусственной силы тяжести в длительных космических экспедициях будущего. Так, в проекте [25] для поддержания на космическом корабле ускорения, равного ускорению свободного падения на Земле, использована 640-метровая тросовая система, вращающаяся со скоростью два оборота в минуту.

Спуск грузов с орбиты. Особое место в истории развития КТС занимают американские орбитальные эксперименты SEDS-1 и SEDS-2 (Small Expendable Deployer System) выполненные в 1993—1994 гг. [17, 18]. В них впервые удалось развернуть тросовые системы на орбите (длина троса в обоих случаях составила 20 км). В экспериментах SEDS отрабатывался спуск грузов с орбиты без применения ракетных двигателей. Целью первого эксперимента было отработать технологию развертывания тросовое соединение. Во втором необходимо было, кроме того, добиться малых колебаний системы относительно местной вертикали [40]. В полете SEDS-2 проявилась одна из основных проблем КТС — через четверо суток полета трос был перерублен частицей космического мусора. Система развертывания SEDS и подобные ей использовались затем во многих проектах КТС (TiPS, ProSEDS, AIRSEDS).

В эксперименте со спутником «Young Engineers' Satellite 2» (YES2) (Второй спутник молодых инженеров) спускаемая на тросе капсула («Фотино») должна была опуститься в заданный район земной поверхности. Для этого на орбите разворачивалась КТС длиной более 30 км (YES2 // <http://ru.wikipedia.org/wiki/YES2>).

Эксперимент YES2 закончился частичным успехом. Трос был размотан на полную длину,

спускаемая капсула вошла в атмосферу, но в данном районе не приземлилась, и ее поиски оказались безрезультатными. К настоящему времени КТС YES2 является самым протяженным объектом, развернутым на околоземной орбите. Первоначально вследствие неправильных показаний датчика скорости размотки троса предполагалось, что размотано только 8.5 км [novostikosmonavtiki.ru/content/z12.11.07.shtml].

Генерация тока и изменение орбиты. Использование проводящих тросов, взаимодействующих с магнитным полем и ионосферой Земли, открывает перед создателями тросовых систем новые возможности. Предполагается, что ЭДКТС, за счет использования части кинетической энергии орбитального движения системы, смогут вырабатывать электроэнергию мощностью до 1 МВт. С другой стороны, электроэнергией, получаемой от бортового генератора, можно поддерживать или медленно повышать высоту орбиты тросовой системы без затрат топлива. В работе [21] предложен проект изменения орбиты МКС с помощью ЭДКТС.

Наиболее известным проектом по созданию ЭДКТС является американо-итальянский TSS-1 (Tethered Satellite System-1) [33]. В орбитальном эксперименте TSS-1 (1992 г.) предполагалось отвести от космического челнока «Атлантис» итальянский привязной спутник на электропроводном тросе длиной 20 км, и выполнить электродинамические и радиофизические исследования (рис. 2). Однако развернуть систему удалось всего на 265 м, затем трос зажалось в лебедке. На этом эксперимент был прекращен, и трос со спутником втянут обратно на борт челнока.

Попытка повторить такой эксперимент (TSS-1R) была предпринята в 1996 г. Трос был размотан почти на всю длину, однако «пережегся» из-за короткого замыкания (рис. 3), наиболее вероятной причиной которого стало механическое повреждение изоляции. В результате аварии дорогостоящий итальянский спутник вместе с тросом были потеряны.

Несмотря на относительную неудачу, в экспериментах проекта TSS-1 была проведена часть запланированных исследований, в частности подтверждена возможность использования тро-

совых систем для выработки электроэнергии — получен ток в тросе силой 0.5 А (TSS-1R).

Большинство проектов по созданию ЭДКТС базируются на использовании радиальных систем. Однако для этой цели можно использовать и вращающиеся системы. Так, вращающаяся в магнитном поле КТС, подобная диполью Герца, может позволить генерировать переменный ток в отдельном проводнике [1]. Таким образом, открылась бы возможность создания ЭДКТС в вакууме, без создания замкнутого контура тока в ионосфере и необходимой для этого аппаратуры, а также на более высоких орбитах.

Увод с орбиты. В последние годы особую актуальность приобрела проблема космического мусора, скапливающегося на низких околоземных орбитах. Интенсивное развитие программ дистанционного зондирования Земли, систем спутниковой связи, рост числа запусков миниатюрных КА, без создания механизмов увода с орбиты по истечении срока эксплуатации может привести к тому, что загрязнение космического пространства на низких околоземных орбитах будет расти экспоненциально [2].

Одним из способов решения этой проблемы является увод отработавших КА с использованием тормозящей силы, создаваемой с помощью ЭДКТС. Под действием тока, текущего в неизолированном тросе, возникает сила Ампера, направленная против движения системы и обуславливающая электродинамическое торможение. Расчеты [24] показывают, что ЭДКТС массой около 2 % от массы КА позволяет в течение нескольких месяцев осуществить спуск КА с орбиты. Применение ЭДКТС возможно даже в случае потери КА управления и энергии. При этом нет необходимости в дополнительных запасах топлива на борту, что позволяет существенно уменьшить массу системы увода в сравнении с системами, основанными на реактивном движении.

Отработке увода с орбиты был посвящен проект ProSEDS (Propulsive SEDS), работы над которым координировались центром им. Маршалла НАСА [31]. Последняя ступень ракеты «Delta-II» соединяются с привязным телом тросом, состоящим из 10-км непроводящего и 5-км проводящего отрезков. В эксперименте предполагалось

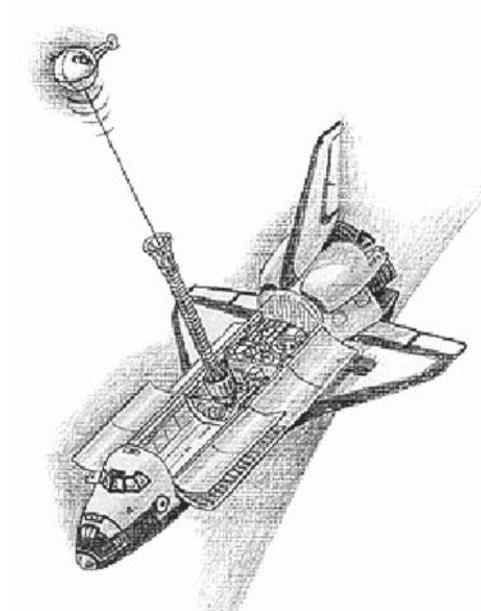


Рис. 2. Схема экспериментов TSS-1



Рис. 3. Оборванный фрагмент троса космической тросовой системы TSS-1R [www.youtube.com/watch?v=Q2D-Veil21gc]

достичь силы сопротивления около 0.4 Н, приводящей к быстрому снижению орбиты ступени. Система успешно прошла наземные испытания, однако запуск ее после неоднократных переносов был отменен.

Несмотря на это, работы в области создания систем увода с орбиты продолжают весьма активно. Один из основных разработчиков ProSEDS, американская компания Tether Unlimited разработала проект системы увода с

использованием ЭДКТС, названный «Terminator Tether™» [24]. Работы над сходным проектом EDOARD ведутся в Италии [39] компанией «Alenia Spazio», римским университетом «La Sapienza» и университетом Болоньи.

Натурные экспериментальные исследования по созданию систем увода предполагается проводить на малых ЭДКТС, концевыми телами которых являются миниатюрные спутники. Соответствующие проекты носят названия «nano-Terminator™» (концевые тела — пикоспутники стандарта CubeSat [44]) и «Micro-EDOARD» [42]. Тенденция к миниатюризации является характерной чертой натурных экспериментов, даже когда речь идет о протяженных системах. Если эксперименты серии TSS-1 в начале 1990-х гг. проводились со спутником массой около 500 кг, то уже в экспериментах SEDS во второй половине 1990-х гг. масса спутника составляла 20 кг, а современные проекты ориентируются на массы концевых тел порядка 1 кг.

Попытка исследования возможностей ЭДКТС для увода спутников с низких околоземных орбит предпринята в эксперименте на КА DTUSat-1, разработанном в Датском техническом университете (Technical university of Denmark) (dtusat1.dtu.dk). Спутник был выполнен в соответствии со стандартом CubeSat. Трос представлял собой неизолированную медную проволоку диаметром 0.2 мм и длиной 700 м, которую предполагалось разматывать с катушки, являвшейся второй концевой массой, подобно игрушке «йой» [10].

Запущенный на орбиту 30 июня 2003 г., DTUSat-1 на связь не вышел. Наблюдать с Земли его не удалось, что заставляет думать, что трос так и не был развернут.

Создание системы для увода КА с орбиты представляется одним из наиболее востребованных проектов использования КТС. Реализация такого проекта с использованием малых спутников видится наиболее дешевым и быстрым способом достижения цели.

Связь. Трос в качестве передающей антенны позволяет осуществлять эффективное излучение радиоволн низкочастотных диапазонов — этот принцип может найти применение в глобальных

системах связи, в частности, для связи с подводными лодками. Проект использования тросовых антенн в космосе, по-видимому, проходил практическую проверку в запусках тросовых систем TiPS (Tether Physics and Survivability, рис. 1 (projects.nrl.navy.mil/tips/)) и ATEx (Advanced Tether Experiment) (projects.nrl.navy.mil/atex/ATEx.html). Не случайно одним из основных разработчиков этих систем была Исследовательская лаборатория ВМФ США (Naval Research Lab). Эксперимент TiPS стал полностью успешным: четырехкилометровая тросовая система просуществовала на орбите около 12 лет (www.satobs.org/noss.html), продемонстрировав тем самым возможность долгосрочного функционирования КТС на низких околоземных орбитах.

Распределенные измерения. Радиальную КТС предполагается использовать в качестве несущего элемента для различных вариантов орбитальных интерферометров с базой до нескольких километров [5, 32]. Большая база, и следовательно, большая разрешающая способность позволяют проводить тонкие радиоисследования Солнца и планет, в частности на тех длинах волн, которые не пропускает земная ионосфера.

С помощью КТС можно зондировать атмосферу Земли на высотах порядка 100–120 км, недоступных для исследования другими способами [5]: для метеорологических зондов эта высота слишком велика, а спутники и суборбитальные зонды находятся на ней слишком короткое время. Если же опустить с КА находящегося на орбите высотой около 200 км стокилометровый трос с зондом, то можно исследовать атмосферу существенно более долгое время. Большая работа в этом направлении проделана в рамках проекта TSS-2 в 1980-х гг. [43]. Несмотря на то, что после неудач пусков TSS-1 и TSS-1R проект был закрыт, на сегодняшний день он является одним из наиболее проработанных и ожидает своей реализации в будущем.

Работы по созданию атмосферного зонда проводились также в центре им. Маршалла НАСА в рамках проекта AIRSEDS [41]. Однако «в связи с изменением приоритетов» центра в 2003 г. проект был передан в ведение Министерства обороны США.

Проекты TSS-2 и AIRSEDS предполагали использование радиальной тросовой системы. Другой способ исследования атмосферы представляет собой использование вращающейся системы, которая, проходя в своем вращении сквозь разные слои атмосферы, как бы сканирует ее [1].

Малая КТС, стабилизированная вращением, может использоваться для исследования физики космической плазмы, верхней атмосферы и магнитосферы. Примером этому является канадский проект VICEPS [30]. Особый интерес представляет использование подобной КТС в качестве интегрального датчика для исследований полей Земли. Накапливая на полуобороте вращения относительно центра масс результаты воздействия в виде изменения угловой скорости вращения, система позволит получить интегральную оценку разности воздействий на привязные тела. Вращающаяся система с двумя пробными концевыми телами с разными баллистическими коэффициентами может быть использована для исследования широтных изменений плотности атмосферы.

В задачах исследования физики атмосферы эффективным может оказаться также проведение суборбитальных экспериментов с тросовыми системами.

Транспортные системы. Космические тросовые системы могут использоваться для выполнения транспортных операций в космосе в качестве альтернативы реактивным системам.

Создание углеродных нанотрубок — материала с прочностью, на два порядка превосходящей прочность стали, и в пять раз меньшим удельным весом — открывает возможности реализации проектов КТС, еще недавно казавшихся фантастическими. В первую очередь это относится к проекту «космического лифта», реализация которого сулит открытие качественно нового этапа освоения космического пространства.

Идея космического лифта основывается на возможности устойчивого радиального положения равновесия троса, один конец которого находится на поверхности Земли, а другой — на расстоянии около 100 тыс. км в космосе [4]. Центр масс системы находится на геостационар-

ной орбите. Поднимая полезную нагрузку по такой тросовой башне как по лифту, мы тем самым выводим ее в космос.

Для этого необходимо:

- для геостационарных орбит — просто отсоединить нагрузку от конструкции лифта;
- для более низких орбит — небольшая добавочная энергия для увеличения трансверсальной скорости полезной нагрузки;
- для гиперболических орбит — отсоединить полезную нагрузку от несущей конструкции на дальнем от Земли конце лифта.

Концепция космического лифта была выдвинута Ю. Арцутановым [4] в 1960-х гг. Однако уже первые исследования показали, что лифт, даже построенный из прочнейших на то время материалов, разрушился бы под тяжестью собственного веса [5]. Интерес к космическому лифту возродился с появлением в 1991 г. углеродных нанотрубок.

В конце 1990-х гг. группой американских ученых во главе с Б. Эдвардсом (B. C. Edwards) была предложена концепция создания космического лифта, включающая первоначальную конструкцию, способ развертывания и схему использования. В их работах (<http://www.niac.usra.edu/studies/studies.jsp>) был сделан вывод о принципиальной возможности создания лифта в ближайшие десятилетия за приемлемую стоимость (около 40 млрд дол.) и с приемлемым уровнем риска.

Использование космического лифта позволило бы на порядки снизить стоимость вывода полезной нагрузки в космос и открыло возможность вывода на орбиту качественно новых космических конструкций, а также полетов на Луну, Марс, Венеру и Юпитер без ракетно-стартовых ускорений и соответствующих затрат и рисков. В будущем космический лифт мог бы позволить существенно увеличить присутствие человека в космосе, включая создание геосинхронной станции, а также снижение риска и стоимости колонизации Марса.

Широкие исследования проблем создания и функционирования космического лифта и других сверхпротяженных тросовых систем еще только начинаются. Исследование динамики подобных

КТС связано с созданием новых математических моделей и методов их исследования. Простые оценочные модели, использовавшиеся на ранних этапах работ [22], здесь уже неприменимы, поскольку такие системы имеют уже истинно «космическую» протяженность, совпадающую по порядку с расстоянием от Земли до Луны.

Помимо космического лифта, появление сверхпрочных материалов позволяет рассматривать и другие проекты сверхпротяженных КТС, в частности проекты построения космических лифтов на тех участках космоса, где нет атмосферы: лунного лифта, орбитального лифта (т. е. лифта, нижний конец которого находится не на поверхности Земли, а в верхних слоях атмосферы) [en.wikipedia.org/wiki/Space_elevator].

Несмотря на большие преимущества, которые сулит создание лифтов, основанных на радиальных КТС, более реалистичными выглядят проекты использования для транспортных операций вращающихся КТС. Действительно, при балансе вывода масс на орбиты, с учетом сохранения кинетического момента под действием центральных сил, достаточно поместить на промежуточных орбитах «обменники» энергии — вращающиеся КТС. При этом дополнительная энергия потребуется только для компенсации рассеянной энергии (а в условиях космоса рассеивание энергии незначительно) и для управления ориентацией движения таких обменников. Предварительные оценки возможности транспортного использования вращающихся КТС [34] показывают, что они позволяют на порядок снизить стоимость вывода груза на высокие земные и межпланетные орбиты.

В 1969 г. Ю. Арцутанов показал, что для вывода груза на орбиту с помощью троса совершенно не обязательно привязывать лифт к земной поверхности [4]. Можно так подобрать соотношение орбитального движения и вращения связки двух спутников вокруг центра масс, чтобы в какой-то момент нижний спутник завис на короткое время у самой поверхности Земли, забрал груз и затем вывел его на орбиту. Повторно изобретенная в 1975 г. американцем Г. Моравецом, эта система получила название «несинхронный космический лифт» [36].

К настоящему моменту разработан ряд проектов использования КТС для транспортных операций. В работах [15, 16, 34] показана возможность эффективного использования вращающихся КТС для многократной транспортировки грузов с низких околоземных орбит на геостационарную. В работах [26, 27, 29] предложен проект использования транспортных КТС для регулярной транспортировки грузов с Земли на Луну и обратно. Найдены условия движения трех вращающихся тросовых систем — на низкой и высокой околоземных орбитах и окололунной орбите — для перевода грузов практически без затрат топлива. В работах [28, 38] показана возможность эффективного использования КТС для доставки полезного груза на Марс и обратно, а также на другие планеты солнечной системы.

В проекте космические тросовые системы MXER (Momentum-Exchange/Electrodynamic Reboost) [35] предполагается совместное использование преимуществ вращающихся и электродинамических систем. Движущаяся по эллиптической орбите 100-километровая тросовая система вращается таким образом, чтобы расположенный на одном из ее концов схват мог захватить полезную нагрузку, и затем выпустить ее на более высокой орбите. Энергию и кинетический момент, затраченные на перевод полезной нагрузки, система может пополнить, используя взаимодействие протекающего по тросу тока с магнитным полем Земли.

Несмотря на продемонстрированные возможности эффективного использования транспортных КТС, рассмотренные схемы их применения [15, 16, 26—29, 34, 38] были достаточно упрощенными, и многие принципиальные вопросы функционирования и динамики таких КТС не проанализированы. Так, остаются открытыми вопросы динамики КТС с учетом упругости троса, в частности, динамика системы при отделении полезной нагрузки. Здесь упругие колебания системы могут иметь существенное значение. Использование КТС для транспортных операций предполагает длительное их вращение на орбитах. Здесь мы сталкиваемся с проблемой эволюции движения протяженных систем на орбитах. В работе [8] показано, что под действием

диссипативных сил, аэродинамики и рассеивания энергии в материале нити плоскость вращения КТС стремится расположиться перпендикулярно к плоскости орбиты. Возможности управления вращающейся КТС с огромным кинетическим моментом также требуют своего изучения. В работе [1] показано, что одним из перспективных направлений здесь является управление изменением длины троса в резонансных режимах.

Подсистемы традиционных спутников. Космические тросовые системы могут использоваться в качестве элементов традиционных КА и их систем. Ряд проектов КТС связан с применением радиальных систем на обитаемых станциях. Благодаря использованию тросов за пределы станции могут быть вынесены некоторые элементы, например резервуары с топливом, что повышает безопасность и работоспособность станции в аварийных ситуациях. Вынос узла для стыковки космических кораблей позволит существенно уменьшить толчок, который испытывает станция, а также достигнуть заметной экономии топлива. Более подробно эти проекты описаны в работе [5].

Однако реализация проектов использования КТС для создания выносных элементов сталкивается с существенными проблемами. Как показали предварительные расчеты [14], возмущения ориентации космической станции и выносного модуля, передаваемые по тросу, могут быть настолько велики, что осуществление подобных проектов становится бессмысленным.

В последнее десятилетие появился новый класс систем гравитационной стабилизации (СГС) углового движения КА. В них в качестве стабилизаторов вместо традиционных жестких штанг используются гибкие связи (тросы, ленты) [11]. Это позволяет снизить стоимость системы и уменьшить ее массу, что особенно важно для создания малых КА. Еще одним преимуществом использования тросового соединения является возможность технологически достаточно просто увеличить расстояние между спутником и стабилизирующим грузом — до нескольких километров, что на 2–3 порядка больше длины штанги. Соответственно увеличивается и восстанавли-

вающий момент градиента гравитационных сил, пропорциональный квадрату расстояния между спутником и грузом.

Однако реализация преимуществ СГС с гибкими элементами сталкивается с трудностями: малая изгибная жесткость нити делает невозможной передачу через нее моментов демпфирующих сил. В результате собственные колебания спутника с такой системой стабилизации демпфируются плохо, и используемые системы обеспечивают достаточно невысокую точность ориентации (10 против 2 у традиционных систем).

В работе [9] предложена схема тросовой СГС, проблема гашения собственных колебаний в которой решается тем, что трос крепится не непосредственно к спутнику, а к дополнительному телу (приставке), шарнирно связанному со спутником. Как показано в работе [3], такая схема позволяет эффективно стабилизировать угловое движение спутника.

Предложенный в работе [9] способ крепления троса к КА может найти применение и в других проектах КТС. Так, в уже упоминавшемся проекте энергосилового модуля [14], панели солнечных батарей могут быть отнесены от КА, и использоваться как стабилизирующий противовес с собственной точностью управления ориентацией.

Возможные применения тросовой СГС не ограничиваются пассивной стабилизацией. Известно, что одной из особенностей движения в космосе, с которой приходится сталкиваться при создании систем ориентации и стабилизации, является практически полное отсутствие реакции внешней среды на движение КА. Радиальная КТС как раз и представляет собой такую «точку опоры» — высокоустойчивую систему грубой ориентации. Тогда, создавая требуемый управляющий момент за счет взаимодействия с такой системой (отталкиваясь от нее), мы можем достигнуть высокой точности стабилизации и управления ориентацией спутника при помощи систем ориентации, аналогичных «земным». Таким образом, введение в такую систему активных управляющих моментов открывает возможности создания нового поколения высокоточных систем ориентации и стабилизации.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Надежность тросового соединения. Моноволоконный трос может быть легко поврежден микрометеоритом или частицами космического мусора, что и произошло с KTC SEDS-2. Увеличение диаметра нити само по себе не является решением проблемы, так как нить, имеющая большую площадь поверхности, собирает на себя больше частиц мусора [6]. Тем не менее, полет TiPS доказал возможность длительного функционирования КТС на орбите. Для повышения надежности в конструкции троса предлагается использовать ленты, тканевые трубки, а также нить специального плетения «Hoytether™» [6]. Согласно теоретическим расчетам [23] такая нить может находиться на низких околоземных орбитах несколько десятилетий.

Материалы. В настоящее время работы по созданию материалов из углеродных нанотрубок еще не вышли за пределы лабораторий. Тем не менее, прогнозируется [22], что промышленное производство будет налажено в течение ближайших 10—15 лет. Прочности современных углепластиков, таких как M5, Kevlar и Spectra (en.wikipedia.org/wiki/Tether_propulsion) достаточно, чтобы создать космические лифты на Луне и Марсе, но не на Земле.

Некоторые перспективные материалы (например, Spectra) требуют защиты от воздействия ультрафиолетового излучения и атомарного кислорода. Механизм воздействия этих факторов на свойства материала изучен недостаточно. Здесь требуется проведение натурных экспериментов.

Моделирование. Анализ возможностей реализации многих проектов протяженных и сверхпротяженных КТС опирался на весьма упрощенные модели динамики (например, модель безмассового троса [5]). Воплощение же этих проектов в жизнь потребует создания значительно более подробных моделей.

В то же время ряд задач динамики КТС исследованы достаточно подробно. В первую очередь это касается задач, связанных с проектами TSS: динамики радиальной КТС двух тел возле положения равновесия и разворачивания КТС в положение, близкое к радиальному.

Управление движением систем, имеющих низкую жесткость и многокилометровую протяженность, представляет собой не только техническую, но и теоретическую проблему. В частности, колебания КТС могут вызвать напряжения, приводящие к разрыву тросов. Захват груза вращающейся тросовой системой представляет собой сложную задачу, ошибка в решении которой может привести к катастрофе. Предложенные к настоящему времени системы захвата технически трудно реализуемы и недостаточно надежны.

Электродинамические космические тросовые системы. Эксперименты TSS-1R и PMG показали, что с помощью ЭДКТС на орбите можно генерировать киловатты энергии. Однако многие вопросы функционирования ЭДКТС остаются нерешенными.

Недостаточно исследованы вопросы определения условий устойчивости ЭДКТС на орбите (при взаимодействии ЭДКТС с магнитным полем Земли при определенных условиях может возникнуть опрокидывающий момент).

Модели взаимодействия тросов с ионосферной плазмой разработаны недостаточно. Так, величина тока, полученного в эксперименте TSS-1R, значительно превосходила расчетную.

Есть проблема отвода избыточного тепла в условиях вакуума, поэтому не исключена возможность повреждения тросов из-за перегрева.

В целом же можно отметить, что проведенные за последние 40 лет исследования позволяют перейти к использованию преимуществ КТС. Накопленный материал дает богатые возможности, с одной стороны для обоснованного выбора реальных на сегодняшний день целей экспериментальных полетов, а с другой стороны — для постановки новых задач, исследование которых ранее казалось неоправданным и преждевременным.

1. Алпатов А. П., Белецкий В. В., Драновский В. И. и др. Ротационное движение комических тросовых систем. — Днепропетровск: Ин-т технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2001. — 404 с.
2. Алпатов А. П., Гребенкин Ф. Н., Мищенко А. В., Пироженко А. В. Электродинамическая тросовая система увода космических аппаратов с орбит: исследование

- на наноспутниках // Вісник Дніпропетровського ун-ту. — 2006. — № 2/2. — С. 5—10.
3. Алпатов А. П., Пироженко А. В., Храмов Д. А. Резонанс тросовой системы гравитационной стабилизации спутника // Техническая механика. — 2005. — № 2. — С. 90—98.
 4. Арцутанов Ю. Н. В космос на электровозе // Знание-сила. — 1969. — № 7. — С. 25.
 5. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. — М.: Наука, 1990. — 329 с.
 6. Волощенко О. Л., Храмов Д. А. Оценка возможностей столкновения космических тросовых систем с объектами космического мусора // Техническая механика. — 2008. — № 1. — С. 21—30.
 7. Коломбо Дж., Бергамаша С., Бевилакуа Ф. О текущем состоянии работ по привязному спутнику // Астронавтика и ракетодинамика: Экспресс-информация / ВИНТИ. — 1983. — № 27. — С. 1—7.
 8. Пироженко А. В. Управление движением связки двух тел в гравитационном поле изменением длины связи // Космические исследования. — 1992. — 30, вып. 4 — С. 473—482.
 9. Пироженко А. В., Храмов Д. А. Схема гравитационной стабилизации космической тросовой системы со сферическим шарниром // Техническая механика. — 2001. — № 1. — С. 136—148.
 10. Пироженко А. В., Храмов Д. А. Схема развертывания малой космической тросовой системы // Вісник Дніпропетровського ун-ту: Ракетно-космічна техніка — 2007. — № 9/2. — С. 198—204.
 11. Храмов Д. А. Гравитационная стабилизация космических аппаратов с использованием гибких связей // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2005. — № 8. — С. 16—22.
 12. Циолковский К. Э. Свободное пространство. Собрание сочинений. — М.: АН СССР, 1954. — Т. 2.
 13. Циолковский К. Э. Путь к звездам. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 360 с.
 14. Alpatov A. P., Khoroshilov V. S., Pirozhenko A. V., Voloshenjuk O. L. Study of the basic variables of a cable-tether system intended as an electromechanical linkage between space vehicles // Космічна наука і технологія. — 2000. — 6, № 4. — С. 129—131.
 15. Bangham M. E., Lorenzini E. C., Vestal L. Tether Transport System Study. — NASA; TP-1998-206959. — 1998.
 16. Carroll J. A. Preliminary Design of a 1 km Tether Transport Facility: Final Rept. / NASA, NASW-4461. — 1991.
 17. Carroll J. A. SEDS Deployer Design and Flight Performance // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 593—600.
 18. Carroll J. A., Oldson J. C. SEDS Characteristics and Capabilities // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 1079—1090.
 19. Chobotov V. A. Gravitationally stabilized satellite solar power station in orbit // J. Spacecraft and Rockets. — 1977. — 14, N 4. — P. 249—251.
 20. Colombo G., Gaposchkin E. M., Grossi M. D., Weiffenbach G. C. The «Skyhook»: a Shuttle-borne tool for low-orbital-altitude research // Meccanica. — 1975. — 10, N 1. — P. 3—20.
 21. Crouch D. S., et al. An update to proposed space tether applications for International space station Alpha // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 1501—1512.
 22. Edwards B. C. Design and deployment of a space elevator // Acta Astronautica. — 2000. — 47, N 10. — P. 735—744.
 23. Forward R. L., Hoyt R. P. Failsafe multistrand tether SEDS technology // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 1151—1159.
 24. Forward R. L., Hoyt R. P., Uphoff C. W. Terminator Tether: A Spacecraft Deorbit Device // J. Spacecraft and Rockets. — 2000. — 37, N 2. — P. 187—196.
 25. Glaese J. R. The dynamics of tethers in artificial gravity applications // Second International Conference on Tether In Space, Venice, Italy, October 4—8, 1987. — Venice, 1987.
 26. Hoyt R. P. LEO-Lunar Tether Transport System // 33rd AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, Seattle, WA 1997. — Seattle, 1997. — Paper AIAA-97-2794.
 27. Hoyt R. P., Forward R. L. Tether Transport from Sub-Earth-Orbit to the Moon... And Back! // International Space Development Conference, Orlando FL, May 1997. — Orlando, 1997.
 28. Hoyt R. P., Forward R. L., Nordley G. D., Uphoff C. W. Rapid Interplanetary Tether Transport // 50th International Astronautical Congress, Netherlands, Amsterdam, Oct 1999. — Amsterdam, 1999.
 29. Hoyt R. P., Uphoff C. W. Cislunar Tether Transport System // J. Spacecraft and Rockets. — 2000. — 37, N 2. — P. 177—186.
 30. James H. G., Yau A. W., Tyc G. Space research in the BI-CEPS experiment // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 1585—1598.
 31. Johnson L., Ballance J. The propulsive small expendable deployer system (ProSEDS) experiment // Proceeding of the Tether Technology Interchange Meeting. — NASA CP-1998-206900. — P. 103—108.
 32. Lorenzini E. C., Bombardelli C. Participation in the Analysis of the Far-Infrared/Submillimeter Interferometer / NASA, Center for AeroSpace Information (CASI). — ID 20050701. — 2005.
 33. Lorenzini E. C., Cosmo M. L. Tethers in Space Handbook. — 3rd edition. — Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997. — 241 p.

34. *Lorenzini E. C., Cosmo M. L.* Mission analysis of spinning systems for transfers from low orbits to geostationary // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2000. — **37**, N 2. — P. 165—172.
35. *Marshall L., Finkenor M.* Space tethers // *Aerospace America*. — 2004. — N 12. — P. 92.
36. *Moravec H.* A Non-Synchronous Orbital Skyhook // *J. Astron. Sci.* — 1977. — **25**, N 4. — P. 307—322.
37. *Napolitano L. G., Bevilacqua F.* Tethered constellations, their utilization as microgravity platforms and relevant features // 35-th International Astronautical Congress (October 7—13, 1984). — Lausanne, Switzerland, 1984. — P. 84—439.
38. *Nordley G. D., Forward R. L.* Mars-Earth Rapid Interplanetary Tether Transport System: Initial Feasibility Analysis // *J. Propulsion and Power*. — 2001. — **17**, N. 3. — P. 499—507.
39. *Pardini C.* Overview of Space Tether Applications: State-of-the-art Knowledge and Tools // 21st IADC Meeting, 10—13 March 2003, Bangalore, India. — Bangalore, 2003.
40. *Rupp Ch. C., et al.* Flight data from the first and second flights of the Small Expendable Deployer System (SEDS) // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 133—148.
41. *Santangelo A. D.* AIRSEDS-1™: A Proof-of-Concept Tether Mission into the Earth's Upper Atmosphere // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — P. 1527—1542.
42. *Tortora P., Somenzi L., Iess L., Licata R.* Small Mission Design for Testing In-Orbit an Electrodynamic Tether Deorbiting System // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2006. — **43**, N 4. — P. 883—892.
43. *Van Pelt M.* Space tethers and space elevators. — Praxis Publ., 2009. — 215 p.
44. *Voronka N. R., et al.* Technology Demonstrator of a Standardized Deorbit Module Designed for CubeSat and RocketPod Applications // 19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, India, Logan, August 2005. — Logan, 2005.

Надійшла до редакції 14.10.10

O. L. Volosheniuk, A. V. Pirozhenko, D. A. Khramov

SPACE TETHERS AS A PERSPECTIVE DIRECTION OF SPACE TECHNIQUE AND TECHNOLOGY

Space tethers are the systems of spacecrafts joined by flexible extended links. Larger extent, in comparison with conventional spacecrafts, causes stronger interaction of such systems with planetary external fields. Thanks to this, the space tethers allow one to solve a wide range of problems on space development. Some results of the researches for the last 40 years enable us to use the advantages of the space tethers. In particular, the space tethers can be used for waste space vehicle deorbit and for offset devices of conventional satellites.