

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.003>

УДК 629.78

**А. В. Пироженко, А. И. Маслова,  
А. В. Мищенко, Д. А. Храмов, О. Л. Волошенюк**

Институт технической механики Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины, Днепро, Украина

## ПРОЕКТ МАЛОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

---

*Представлены основные идеи проекта натурального эксперимента с малой электродинамической космической тросовой системой (ЭДКТС) на низких околоземных орбитах. Обоснована актуальность проведения эксперимента для создания на основе ЭДКТС эффективной системы увода отработавших свой срок космических аппаратов. Приведены основные результаты исследований вопросов, связанных с функционированием системы в космосе. Предложенный эксперимент направлен на решение основополагающих задач, необходимых для обоснования выбора параметров ЭДКТС для увода проектируемых космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** электродинамическая космическая тросовая система, система увода космических аппаратов, эксперимент.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины проведены разносторонние теоретические исследования задач, связанных с функционированием электродинамических космических тросовых систем (ЭДКТС) на низких околоземных орбитах (НОО). Эти исследования дают основания полагать, что на основе ЭДКТС возможно создание высокоэффективной системы увода отработавших спутников с НОО. Вместе с тем ряд особенностей динамики ЭДКТС требует проведения натуральных экспериментов для проверки основных теоретических положений и повышения качества моделирования взаимодействия системы с внешней

средой. В статье представлены основные идеи проекта натурального эксперимента с малой ЭДКТС. Обосновывается актуальность проведения эксперимента, и приводятся результаты исследований основных закономерностей движения малой ЭДКТС, полученные в институте. Целью статьи является ознакомление широкого круга специалистов с возможностями использования и особенностями функционирования ЭДКТС, привлечение их внимания к обсуждению проекта и участию в его реализации.

*Актуальность* работ, связанных с созданием ЭДКТС, во многом обусловлена необходимостью решения проблемы космического мусора на НОО. Решением этой проблемы в настоящее время активно занимаются во всех ведущих мировых космических агентствах. По мнению ряда специалистов [14, 17] предотвратить угрозу лавинообразного роста объема мусора, вызванного столкновением крупных объектов, возможно

---

© А. В. ПИРОЖЕНКО, А. И. МАСЛОВА,  
А. В. МИЩЕНКО, Д. А. ХРАМОВ, О. Л. ВОЛОШЕНЮК, 2018

только при условии значительного снижения числа таких объектов на НОО.

Одним из путей решения проблемы космического мусора является создание эффективной системы увода отработавших свой срок космических аппаратов (КА). В этой связи перспективной представляется система увода, основанная на использовании сил электродинамического торможения, возникающих в протяженных электропроводящих системах на НОО.

Идея использования в околоземном пространстве электропроводящих систем большой протяженности базируется на двух принципах:

- взаимодействие системы с гравитационным полем Земли обеспечивает высокую степень устойчивости движения относительно центра масс в окрестности местной вертикали (т. е. вдоль текущего радиуса орбиты);
- большая протяженность проводника обеспечивает большие силы взаимодействия текущего по нему тока с магнитным полем Земли (силы Ампера).

Естественным развитием идеи использования протяженных электропроводящих систем в околоземном пространстве послужили проекты ЭДКТС, в которых два концевых тела соединены тонкой и легкой связью, проводящей электрический ток. В зависимости от направления тока в проводнике ЭДКТС может работать как в режиме генерации электроэнергии, так и в режиме тяги, обеспечивая переход механической энергии орбитального движения в электрическую энергию и наоборот. Оценки [4, 15] показывают, что эффективность такого преобразования может достигать 90 % и более.

Столь высокая эффективность ЭДКТС вызвала достаточно широкий интерес к вопросам ее создания в 1970—1980-х гг. Успехи космонавтики в те годы, разработка программ космических челноков и космических станций, как представлялось [15], получали значительное развитие с применением ЭДКТС. В 1980—1990-х гг. космические тросовые системы (КТС) рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития космонавтики.

К настоящему времени проведено значительное количество теоретических исследований

различных аспектов функционирования КТС, и получены важные содержательные результаты. Отметим весомый вклад украинских ученых в эти исследования, который получил международное признание [1, 11].

Однако выход на экспериментальную проверку разработанных теорий столкнулся с рядом затруднений. Достаточно ярко это было продемонстрировано в рамках американо-итальянского проекта TSS (Tethered Satellite System), общие затраты на который в то время превысили миллиард долларов.

Орбитальный эксперимент TSS-1 был проведен 3 августа 1992 г. и завершился неудачей: вместо предполагаемых 20 км удалось выпустить лишь 265 м троса, после чего трос был зажат в лебедке. Усилия экипажа привели к тому, что привязной спутник удалось втянуть обратно в космический корабль. Попытки выяснить в наземных условиях причины заклинивания троса успехом не увенчались.

Повторная попытка эксперимента (TSS-1R) была предпринята в 1996 г. Трос был размотан почти на всю длину, однако «пережегся» из-за короткого замыкания. Вероятная причина замыкания — механическое повреждение изоляции. В результате аварии дорогостоящий итальянский спутник вместе с тросом были потеряны.

Можно сказать, что эксперимент TSS-1 подчеркнул первую особенность КТС, заключающуюся в необходимости развертывания протяженной гибкой нити в космосе, когда экспериментальные наземные исследования (а были размотаны сотни километров нити) не позволяют полностью подтвердить работоспособность системы развертывания.

Эксперимент TSS-1R подчеркнул еще одну особенность ЭДКТС: взаимодействие системы с ионосферной плазмой (и магнитосферой) требует экспериментальных исследований. Физика плазмы является во многом экспериментальной наукой, а в наземных условиях очень трудно воссоздать условия околоземного космического пространства, особенно когда речь идет о системах протяженностью в сотни метров.

Эксперимент TSS-1R показал возможность пассивного собирания больших токов с ионо-

сферной плазмы. Идея использования оголенного троса позволяет существенно увеличить площадь контакта с плазмой и тем самым собирать в плазме большой электронный ток [18]. Это, в свою очередь, открывает возможность эффективного использования ЭДКТС в режиме генерации тока, т. е. в режиме, когда энергия орбитального движения преобразуется в электрическую энергию.

На основе анализа возможностей ЭДКТС была предложена эффективная система увода отработавших спутников с НОО. Высокая потенциальная эффективность системы и возрастающая актуальность проблемы космического мусора привлекли широкое внимание к разработкам ЭДКТС для увода космических объектов с НОО. Работы проводились во многих странах, и к настоящему времени получены содержательные результаты по многим направлениям исследований вопросов, связанных с функционированием ЭДКТС как системы увода объектов. Но эти результаты требуют экспериментальной проверки. Здесь нужно отметить следующую особенность радиальной (гравитационно стабилизированной) ЭДКТС: положение равновесия системы резонансно неустойчиво, поскольку внешние воздействия приводят к резонансной подкачке энергии в колебания системы относительно местной вертикали. Поэтому вопрос выбора параметров ЭДКТС для каждой миссии увода является нетривиальным и должен базироваться на проверенных моделях и данных.

Таким образом, развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением экспериментальных данных их функционирования на НОО. Представляется, что потребуются целая серия натурных экспериментов, направленных на исследования различных вопросов взаимодействия ЭДКТС с внешней средой. Для проведения неоднократных и достаточно оперативных экспериментальных исследований наиболее подходят специализированные КА, создаваемые с этой целью. Снижение стоимости таких экспериментов обуславливает использование малых тросовых систем. Использование микроспутников, и в особенности технологии «CubeSat», позволяют существенно сократить расходы на экспериментальные исследования. К настоящему

времени во многих странах разрабатываются проекты малых ЭДКТС на микроспутниках [12, 13, 16, 20]. Уже запущено около десятка подобных систем, однако все эти запуски закончились неудачно. Основной причиной неудач проведенных экспериментов с малыми ЭДКТС являлось неразвертывание тросового соединения. Поэтому к настоящему времени базовые положения теории взаимодействия ЭДКТС со средой и ее динамики не проверены, и потребность в натурных экспериментальных данных продолжает оставаться очень высокой.

Серия натурных экспериментов с ЭДКТС позволит сформулировать условия создания эффективной системы увода отработавших свой срок КА и обосновать выбор ее параметров для конкретного КА. Кроме того, экспериментальные данные о функционировании ЭДКТС важны для создания перспективных транспортных космических систем, основанных на ЭДКТС, работающих в режиме повышения механической энергии орбитального движения за счет электрической энергии системы.

**Основные результаты теоретических исследований** динамики малых ЭДКТС, проведенных в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, представлены ниже. Для оценки величин внешних воздействий приведены их приблизительные значения, рассчитанные для ЭДКТС массой 3 кг и длиной троса 1 км.

**Гравитационные воздействия** создают основные силы и моменты, стабилизирующие движение системы.

Момент гравитационных сил обеспечивает существование единственного (с точностью до переворота всей системы) устойчивого положения равновесия, когда тросовая система вытянута вдоль местной вертикали.

Малые маятниковые колебания системы относительно местной вертикали характеризуются частотой колебаний в плоскости орбиты, которая близка к  $\sqrt{3}\omega_0$ , и частотой колебаний перпендикулярно к плоскости орбиты, равной  $2\omega_0$ , где  $\omega_0$  — частота орбитального движения. Следовательно, система имеет низкую динамическую

кую жесткость относительно периодических воздействий с орбитальной и удвоенной орбитальной частотами в плоскости орбиты, и резонансно неустойчива к периодическим воздействиям с удвоенной орбитальной частотой перпендикулярно к плоскости орбиты.

Гравитационные силы являются и основными растягивающими трос силами. Для малой тросовой системы эти силы весьма невелики. Так, в положении равновесия растягивающая трос сила не превосходит  $3r\omega_0^2 m_1 m_2 / M$ , где  $r$  — длина троса,  $m_1, m_2$  — массы материальных точек, расположенных на концах троса,  $M = m_1 + m_2$  — масса всей системы, (модель гантели, когда вся масса системы сосредоточена на концах троса). Для рассматриваемой малой КТС на высоте 700 км эта сила не превосходит 2.5 мН, т. е. приблизительно 0.25 грамм-силы.

Маятниковые колебания системы возле положения равновесия приводят к уменьшению силы натяжения, а при амплитуде колебаний, близкой к  $60^\circ$  натяжение троса внешними силами пропадает и происходит провисание троса. В ряде случаев это может привести к образованию петель и запутыванию троса, что, в свою очередь, приведет к уменьшению момента инерции системы, росту амплитуды колебаний и образованию еще большего числа петель. Представляется, что в этом случае начнутся процессы «схлопывания» тросовой системы.

**Электродинамические воздействия** на пассивную ЭДКТС, т. е. такую ЭДКТС, в которой не предусмотрены дополнительные контакторы с плазмой, по сравнению с гравитационными невелики. Если движение системы происходит с запада на восток, то верхняя часть системы заряжается положительно, а нижняя — отрицательно. Положительно заряженная часть будет собирать с ионосферной плазмы электроны, а отрицательная — ионы. В результате по тросу будет течь электрический ток. Максимальная величина тока будет проходить через трос в сечении, разделяющем положительно и отрицательно заряженные части троса (так называемая точка нулевого потенциала), а на краях системы ток будет близок к нулю. Для рассматриваемой экспериментальной системы максимальный ток составляет около 5 мА.

Оценка максимального тока в сечении троса позволяет оценить тормозящую силу Ампера, действующую на систему. Для орбиты высотой 650 км эта сила приблизительно равна  $5.5 \cdot 10^{-5}$  Н, то обеспечивает ускорение торможения трехкилограммовой системы  $1.9 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. На основании соотношений, приведенных в работе [7], нетрудно получить, что такое ускорение приведет к снижению высоты орбиты на 100 км примерно за 35 сут.

Изменения концентрации заряженных частиц, индукции магнитного поля Земли и ряд других факторов при орбитальном движении приводят к соизмеримости изменения амперовых сил с орбитальным движением. Это служит причиной изменения эксцентриситета орбиты и приводит, вообще говоря, к его увеличению. Однако для рассматриваемых орбит эти изменения незначительны, и в случае начальной почти круговой орбиты они остаются почти круговыми.

Влияние момента амперовых сил характеризуется двумя особенностями:

- большим плечом силы, обусловленным значительным смещением точки максимального тока (точки нулевого потенциала) к положительно заряженному телу;
- соизмеримостью (резонансом) изменений момента с малыми колебаниями системы перпендикулярно к плоскости орбиты, которые имеют удвоенную орбитальную частоту.

Относительная малость сил Ампера по сравнению с гравитационными силами обеспечивает сохранение колебательного режима движения системы относительно местной вертикали. Так, следует ожидать, что стационарная составляющая момента сил Ампера приведет к отклонению линии троса от местной вертикали на несколько градусов, а резонансная неустойчивость малых колебаний — к росту их амплитуды приблизительно до  $8^\circ$ . Это увеличение амплитуды колебаний приведет к изменению их частоты, и эффекты линейного резонанса (линейного роста амплитуды) пропадают. Система переходит в относительно стабильный режим долгопериодических изменений амплитуды колебаний.

**Аэродинамические воздействия** в связи с большой парусностью троса требуют внимательного их учета. Расчеты [6] показывают, что аэродина-

мическое влияние может приводить к существенному отклонению линии троса от местной вертикали, что необходимо учитывать при проектировании системы. Изменения плотности атмосферы вдоль орбиты вызывают возникновение вынужденных колебаний КТС относительно центра масс. Амплитуда этих колебаний в плоскости орбиты увеличивается пропорционально амплитуде изменений плотности атмосферы при орбитальном движении ЭДКТС, и в силу низкой динамической жесткости системы может достигать десятков градусов. Колебания ЭДКТС перпендикулярно к плоскости орбиты также резонансно неустойчивы из-за действия аэродинамического момента: изменения плотности атмосферы вдоль орбиты имеют удвоенную орбитальную частоту.

Вместе с тем расчеты показывают, что вполне можно подобрать такие значения параметров системы, что ее колебания относительно местной вертикали при совместном влиянии аэродинамического момента и момента амперовых сил составят  $15...20^\circ$ . При этом система уходит от линейного резонанса в область нелинейных колебаний, и вместо постоянного увеличения амплитуды наблюдается режим долгопериодических колебаний.

**Способ развертывания системы**, обеспечивающий устойчивое развертывание троса вдоль местной вертикали, к настоящему времени для малых тросовых систем не определен. Процесс развертывания малых тросовых систем характеризуется очень малыми внешними силами, распрямляющими (натягивающими) тросовое соединение. Процесс происходит практически в невесомости. Математическое моделирование процесса трудоемко и малоинформативно, а наземные эксперименты, ввиду большой протяженности системы, не могут создать подобных космосу условий развертывания.

Представляется, что способ развертывания, основанный на придании первоначального импульса развертывания конечным телам, обладает существенным недостатком: энергия, сообщаемая при таком способе тросовому соединению, достаточна для образования петель и запутывания гибкого троса. Приданная конечному телу

системы достаточно большая относительная скорость предполагает процесс торможения этого тела. Поскольку добиться высокой стабильности процесса развертывания очень трудно, то почти неизбежен этап, когда трос «провисает», так как растягивающие его силы предельно малы. На этом этапе и должна сказаться энергия, сообщенная тросу. Поскольку эластичный трос находится практически в невесомости, здесь уместна модель эластиков Аппеля [2]. Эти эластики имеют бесконечное множество положений равновесия с тем большим количеством петель, чем больше энергия эластика. Прямая линия эластика соответствует минимальной его энергии.

Кроме того, такой способ развертывания характеризуется значительной амплитудой колебаний системы относительно местной вертикали.

Способ развертывания, основанный на придании первоначального импульса развертывания конечным телам, хорошо себя зарекомендовал при развертывании более протяженных и тяжелых тросовых систем. В таких системах гравитационные силы на порядки больше, и окончание процесса развертывания осуществлялось за счет действия этих сил [15]. Многочисленные неудачные развертывания малых тросовых систем с помощью такого метода указывают на большие трудности его переноса на системы, где гравитационные силы весьма незначительны.

В представленном ниже проекте предлагается способ медленного развертывания ленты [9]. Первоначальное разведение конечных тел осуществляется медленным выдвиганием ленты с одновременным ее профилированием, а дальнейшее развертывание ленты осуществляется со скоростью, меньшей скорости расхождения свободных тел. Моделирование такого процесса развертывания показало его устойчивость и незначительные результирующие отклонения линии троса от местной вертикали [10].

**Воздействия космических частиц** на тросовое соединение рассчитывались с помощью известных компьютерных моделей ORDEM и MASTER и предложенных методик определения вероятности выживания троса ЭДКТС [3, 5]. Полученные оценки времени выживания троса для рассматриваемых тросовых систем показывают, что

среднего времени выживания с большим запасом достаточно для проведения экспериментальных исследований и что использование ленты гораздо предпочтительней, чем использование моноволоконной нити при тех же массовых характеристиках.

**Влияние тепловых потоков** на движение тросовой системы рассчитывалось для алюминиевой ленты с учетом вхождения системы в тень Земли. Расчеты показали, что тепловое воздействие не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на динамику малых КТС, т. е. систем с длиной связи порядка единиц километров. Изменение температуры троса происходит относительно плавно и приводит к периодическому изменению длины троса приблизительно на 0,3 % с орбитальной частотой. Такие изменения длины троса приведут лишь к незначительным дополнительным колебаниям системы около местной вертикали.

#### **Выводы теоретических исследований:**

- ЭДКТС предоставляет возможность создания эффективной системы увода отработавших спутников с НОО;
- реализация этой возможности связана с необходимостью проведения натурных экспериментов;
- минимизация рисков и затрат на экспериментальные исследования предполагает использование малых ЭДКТС, базирующихся на микроспутниках;
- для широкого диапазона орбит можно подобрать параметры малой ЭДКТС, обеспечивающие успешность проведения натурных экспериментов.

**Проект малой экспериментальной ЭДКТС.** Основные *задачи проекта*, предложенного в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, следующие:

- проверка моделей взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой;
- отработка устойчивого способа развертывания тросового соединения — токопроводящей ленты.

Под проверкой моделей взаимодействия ЭДКТС и ионосферной плазмой понимается

проверка соответствующих математических моделей, построенных на основе зондовой теории. Дело в том, что известные модели построены на не вполне обоснованных предположениях [8]. В частности, предполагается мгновенно установившийся стационарный процесс, не учитываются ни емкостные, ни индукционные свойства ЭДКТС. Особую проверку требует модель собирания ионов концевым телом ЭДКТС с высоким потенциалом. В ходе эксперимента TSS-1R теория Паркера — Мерфи, учитывающая влияние замагничности плазмы на собирание тока, не подтвердилась. Для собирания электронного тока с плазмы по результатам этого эксперимента принята модифицированная модель теории Альперта — Лема [19]. Распространение этой модели на ионный ток требует экспериментальной проверки.

Таким образом, в рамках проекта предполагается решение первоначальных и относительно простых задач, являющихся основополагающими для создания функциональных ЭДКТС.

В ходе работ над проектом список задач может быть дополнен задачей исследования влияния дополнительных контакторов с плазмой на взаимодействие ЭДКТС со средой и ее динамику.

**Содержание проекта** заключается в создании малой ЭДКТС путем развертывания с микроспутника тросового токопроводящего соединения, и последующих измерениях силы тока в тросе. Экспериментальная ЭДКТС будет состоять из концевых тел: микроспутника и противовеса, соединенных токопроводящей лентой протяженностью в сотни (до 1000) метров.

Длина троса, необходимая для проведения эксперимента, определяется наличием в системе положительно и отрицательно заряженных частей троса. Выполнение этого условия зависит от наклона и высоты орбиты, площади поверхности троса и концевых тел, концентрации зарядов в плазме и других факторов.

Зависимость необходимой длины троса от других параметров системы позволяет настраивать эксперимент для достаточно широкого диапазона орбит. Предполагается, что высота орбиты для проведения исследований может варьироваться от 550 до 1000 км (лучше 650...750 км),

наклонение до  $60^\circ$  или больше  $120^\circ$ ; первоначальная орбита почти круговая.

Для проверки моделей собирания ЭДКТС тока с ионосферы достаточно определить ток, протекающий в тросе. Для построения модели тока, протекающего в тросе, достаточно измерить ток на ряде отрезков, включающих точку нулевого потенциала, где ток максимален (ожидаемая величина тока — десятки миллиампер). Согласно модельным расчетам положительно заряженная часть троса будет составлять порядка 1.5 % от всей длины троса. Поэтому, для проверки моделей достаточно разместить на тросе ряд амперметров на относительно небольшом расстоянии от положительно заряженного концевое тела. Например, представляется, что размещение пяти амперметров через пять метров на положительно заряженной части троса позволит определить общую картину собирания ЭДКТС тока из плазмы.

Предполагается сбор информации о силе тока в тросе в течение нескольких витков системы по орбите (минимум 2-3 витка). Частота сбора информации определяется частотами колебаний в движении системы и по предварительным оценкам составляет десятки секунд. Желательно прохождение системы через тень Земли, т. е. в режиме «день — ночь».

Для уточнения проблемной модели собирания ионов концевым телом (противовесом), находящимся под высоким напряжением (порядка 100 вольт), может быть осуществлено заданное изменение его площади поверхности.

Предполагается, что параметры малой экспериментальной ЭДКТС будут подобраны для проведения эксперимента на базе наноспутника формата «CubeSat 3U», т. е. небольшая по размерам система с малой потребляемой мощностью. Это, на наш взгляд, позволит выйти на серию недорогих натуральных экспериментов с ЭДКТС, которые определяют условия создания эффективной системы увода отработавших свой срок КА и выбор параметров такой системы для конкретного КА.

**Новизна предлагаемого проекта** заключается в постановке задач эксперимента: исследование взаимодействия безконтактной ЭДКТС с ионосферной плазмой, и проверка пригодности

математических моделей зондовой теории для описания такого взаимодействия.

В проекте также предлагается оригинальный способ развертывания токопроводящей ленты. Предлагаемая система развертывания предполагает медленное выдвигание ленты с одновременным ее профилированием для придания разводящего напряжения концевому телу на начальном этапе развертывания. В дальнейшем осуществляется медленное выталкивание непрофилированной ленты со скоростью, меньшей скорости расхождения свободных тел. Для снятия остаточных напряжений в ленте предполагается создание ее «цепочной структуры» с достаточно протяженными (до десятков метров) звеньями.

## ВЫВОДЫ

Предложен простой и малозатратный проект малой экспериментальной ЭДКТС, направленный на решение основополагающих задач, необходимых для создания на основе ЭДКТС системы увода отработавших свой срок КА. Задачи проекта определены исходя из опыта и проблем проводимых ранее экспериментов и обоснованы проведенными исследованиями.

Выполнение проекта предполагает получение новых фундаментальных знаний в области взаимодействия протяженных проводников с ионосферой и магнитосферой Земли на НОО, механики космического полета и динамики космических систем. С практической точки зрения представляется, что создаваемое в результате эксперимента устройство увода будет обладать коммерческой привлекательностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов А. П., Белецкий В. В., Драновский В. И., Заржевский А. Е., Пироженко А. В., Трогер Г., Хорошилов В. С. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями. — Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. — 559 с.
2. Анпель П. Теоретическая механика: В 2 т. — М.: Физматгиз, 1960. — Т. 2. — 487 с.
3. Асланов В. С., Пироженко А. В., Волощенко О. Л., Кислов А. В., Яцук А. В. Определение времени выживания космической тросовой системы // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2010. — 12, № 4. — С. 138—143.

4. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. — М.: Наука, 1990. — 330 с.
5. Волошениук О. Л., Храмов Д. А. Оценка вероятности выживания космических тросовых систем при столкновении с частицами космического мусора // Техн. механика. — 2008. — № 1. — С. 3—12.
6. Маслова А. И. Колебания малой космической тросовой системы под действием аэродинамического момента // Техн. механика. — 2016. — № 3. — С. 57—67.
7. Маслова А. И., Пироженко А. В. Изменение орбиты под действием малого постоянного торможения // Космічна наука і технологія. — 2016. — 22, № 6. — С. 20—25.
8. Мищенко А. В., Пироженко А. В. Анализ модели взаимодействия электродинамической тросовой системы с магнитосферой и ионосферой Земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 4. — С. 5—13.
9. 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.
10. Храмов Д. А. Схемы и модели развертывания космических тросовых систем // Техн. механика. — 2014. — № 4. — С. 198—204.
11. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., Khoroshilov V. S., Pirozhenko A. V., Troger H. Dynamics of tethered space system. — Taylor & Francis Group, 2010. — 223 p.
12. HTV-KITE Experiment. URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
13. Johnson L., Fujii H. A., Sanmartin J. R. Electrodynamic propulsion system tether experiment (T-REX) // NASA Techn. Repts Server. — 2010. — 20100024214. — 30 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
14. Liou J. C., Johnson N. L. A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO // Acta Astronautica. — 2009. — 64, N 2. — P. 236—243.
15. Lorenzini E. C., Cosmo M. L. Tethers in space handbook. — 3rd edition. — Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997. — 241 p.
16. Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE). URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
17. Pearson J., Carroll J., Levin E., Oldson J. EDDE: ElectroDynamic Debris Eliminator for active debris removal // NASA-DARPA: International Conference on Orbital Debris Removal (December 8—10, 2009). — URL: [http://www.star-tech-inc.com/papers/edde\\_for\\_debris\\_conference.pdf](http://www.star-tech-inc.com/papers/edde_for_debris_conference.pdf).
18. Sanmartin J. R., Martinez-Sanchez M., Ahedo E. Bare wire anodes for electrodynamic tethers // J. Propulsion and Power. — 1993. — 9, N 3. — P. 353—360.
19. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C. Spherical collectors versus bare tethers for drag, thrust, and power generation // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2006. — 34, N 5. — P. 2133—2139.
20. Tether Electrodynamic Propulsion CubeSat Experiment (TEPCE). — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_tether\\_missions#CubeSat\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Space_tether_missions#CubeSat_technology).

Стаття надійшла до редакції 25.10.17

## REFERENCES

1. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., Zakrzhevskii A. E., Pirozhenko A. V., Troger H. et al. (2007). *Dinamika Kosmicheskikh Sistem s Trosovymi i Sharnirnymi Soedineniyami [Dynamics of Space Systems Joined by Tethers and Hinges]*. Moskva-Izhevsk: NITs “Rehuliarnaia i Khaoticheskaiia dinamika” [in Russian].
2. Appel P. (1960). *Teoreticheskaiia mekhanika [Engineering mechanics]*. P. Appel. (Vols. 1-2). Moskva: Fizmathiz [in Russian].
3. Aslanov V. S., Pirozhenko A. V., Volosheniuk O. L., Kislov A. V., Yashchuk A. V. (2010). Opredeleniie vremeni vyzhivaniia kosmicheskoi trosovoi sistemy [Definition of a survival time of space tethered system]. *Izvestiia Samar-skoho nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. — Izvestiya of the Samara Russian Academy of Sciences scientific center*, Vol. 12, 4, 138—143 [in Russian].
4. Beletsky V. V., Levin E. M. (1993). *Dynamics of space tether systems*. San Diego: American Astronautical Society.
5. Volosheniuk O. L., Khramov D. A. (2008). Otsenka veroiatnosti vyzhivaniia kosmicheskikh trosovykh sistem pri stolknovenii s chastitsami kosmicheskoho musora [Estimation of the space tethered systems survival probability at collision with particles of the space debris]. *Tekhnicheskaiia mekhanika. — Technical mechanics*, 1, 3—12 [in Russian].
6. Maslova A. I. (2016) Kolebaniia maloi kosmicheskoi trosovoi sistemy pod deistviem aerodinamicheskogo momenta [Oscillations of the small space tethered system under the action of aerodynamic moment]. *Tekhnicheskaiia mekhanika. — Technical mechanics*, 3, 57—67 [in Russian].
7. Maslova A. I., Pirozhenko A. V. (2016). Izmeneniie orbity pod deistviem malogo postoiannogo tormozheniia [Orbit changes under the small constant deceleration]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia. — Space science and technology*, 22 (6), 20—25 [in Russian].
8. Mishchenko A. V., Pirozhenko A. V. (2011). Analiz modeli vzaimodeistviia elektrodinamicheskoi trosovoi sistemy s mahnitosferoi i ionosferoi Zemli [The analysis of interaction model of electrodynamic tether systems with the earth’s magnetosphere and an ionosphere]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia. — Space science and technology*, 17 (4), 5—13 [in Russian].

9. Pirozhenko A. V., Khramov D. A. (2007). Skhema razvertyvaniia maloi kosmicheskoi trosovoi sistemy [Scheme of deployment of the small space tethered system]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu: Raketno-kosmichna tekhnika*. — *Visnyk of Dnipropetrovsk University: Rocket and space technology*, 9/2, 198–204 [in Russian].
10. Khramov D. A. (2014). Skhemy i modeli razvertyvaniia kosmicheskikh trosovykh sistem [Schemes and models of deployment of a small space tethered systems]. *Tekhnicheskaiia mekhanika*. — *Technical mechanics*, 4, 198—204 [in Russian].
11. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., Khoroshilov V. S., Pirozhenko A. V., Troger H., et al. (2010). *Dynamics of Tethered Space System*. Taylor & Francis Group.
12. HTV-KITE Experiment. URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
13. Johnson L., Fujii H. A., Sanmartin J. R. (2010). Electrodynamic propulsion system tether experiment (T-REX). NASA Technical Reports Server (NTRS), 20100024214. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
14. Liou J. C., Johnson N. L. (2009). A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO. *Acta Astronautica*, 64 (2), 236—243.
15. Lorenzini E. C., Cosmo M. L. (1997). *Tethers in Space Handbook*. Smithsonian Astrophysical Observatory.
16. Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE). URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
17. Pearson J., Carroll J., Levin E., Oldson J. (2009). EDDE: ElectroDynamic Debris Eliminator for Active Debris Removal, NASA-DARPA: International Conference on Orbital Debris Removal, Chantilly, VA (December 8—10, 2009). URL: [http://www.star-tech-inc.com/papers/EDDE\\_for\\_Debris\\_Conference.pdf](http://www.star-tech-inc.com/papers/EDDE_for_Debris_Conference.pdf)
18. Sanmartin J. R., Martinez-Sanchez M., Ahedo E. (1993). Bare wire anodes for electrodynamic tethers. *J. Propulsion and Power*, 9 (3), 353—360.
19. Sanmartin J. R., Lorenzini E. C. (2006). Spherical Collectors Versus Bare Tethers for Drag, Thrust, and Power Generation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34 (5), 2133—2139.
20. Tether Electrodynamic Propulsion CubeSat Experiment (TEPCE). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_tether\\_missions#CubeSat\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Space_tether_missions#CubeSat_technology).

Received 25.10.17

О. В. Пироженко, А. І. Маслова,  
О. В. Міщенко, Д. О. Храмов, О. Л. Волошенюк  
Інститут технічної механіки  
Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України,  
Дніпро, Україна

#### ПРОЕКТ МАЛОЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ КОСМІЧНОЇ ТРОСОВОЇ СИСТЕМИ

Представлено основні ідеї проекту натурного експерименту з малою електродинамічною космічною тросовою системою (ЕДКТС) на низьких навколосезних орбітах. Обґрунтовано актуальність проведення експерименту для створення на основі ЕДКТС ефективної системи відводу космічних апаратів, що відпрацювали свій термін роботи. Наведено основні результати досліджень питань, пов'язаних із функціонуванням системи у космосі. Запропонований експеримент направлено на вирішення основних задач, які необхідні для обґрунтування вибору параметрів ЕДКТС для відводу космічних апаратів, що проєктуються.

**Ключові слова:** електродинамічна космічна тросова система, система відводу космічних апаратів, експеримент.

A. V. Pirozhenko, A. I. Maslova,  
A. V. Mishchenko, D. A. Khramov, O. L. Volosheniuk  
Institute of Technical Mechanics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and the State Space Agency  
of Ukraine, Dnipro, Ukraine

#### PROJECT OF A SMALL EXPERIMENTAL ELECTRODYNAMIC SPACE TETHER SYSTEM

We present the main ideas of the full-scale space experiment project with a small electrodynamic space tethered system (EDSTS) in the low Earth orbits. We substantiate actuality of this experiment to develop an effective removal system on EDSTS basis for spacecraft that had run out its term. The main results of research, which we discuss, are aimed to solve the fundamental problems of the system's functioning in the space. The proposed experiment is needed to justify the choice of EDSTS parameters for the removing of spacecraft, which should be taken into account at the stage of spacecraft's design.

**Keywords:** electrodynamic space tethered system, spacecraft removal system, experiment.