

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.003>

УДК 629.788

**А. В. Пироженко, А. В. Мищенко**

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

## МАЛАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ТРОСОВАЯ СИСТЕМА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

---

*Предложена электрическая модель пассивной электродинамической космической тросовой системы (ЭДКТС), описывающая ее взаимодействие с магнитосферой и ионосферой Земли на низких околоземных орбитах, распределение потенциала и токов в системе. Рассматривается ЭДКТС двух тел, соединенных токопроводящим тросом. В качестве троса рассматривается либо цилиндрическая нить, либо лента. Модель основывается на зондовой теории и равенстве электронного и ионного токов, собираемых системой в ионосферной плазме, и позволяет рассчитывать параметры ЭДКТС, обеспечивающие существование анодной и катодной частей системы для выбранной орбиты, а также прогнозировать напряжения и токи в частях системы. Предлагаемая модель позволяет более просто проводить расчеты и оценки эффектов взаимодействия системы с плазмой, а также учитывать ряд дополнительных факторов, которые могут вносить значительные поправки в работу системы..*

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

---

Интерес к экспериментальным исследованиям с электродинамическими космическими тросовыми системами (ЭДКТС) на низких околоземных орбитах (НОО) сохраняется уже в течение десятков лет. Этот интерес обусловлен перспективностью использования ЭДКТС для транспортных операций и для увода космического мусора. Снижение стоимости таких экспериментов связано с использованием малых тросовых систем. Использование микроспутников, и в особенности технологии «CubeSat», позволяет существенно сократить расходы на экспериментальные исследования. Во многих странах разрабатываются проекты малых ЭДКТС на микроспутниках [5–7, 11]. Проведено около десятка экспериментов, однако неполное развертывание

тросового соединения во всех этих запусках не позволило провести требуемые измерения.

Ниже предложена электрическая модель пассивной ЭДКТС, т. е. такой ЭДКТС, в которой не предусмотрены дополнительные контакторы с плазмой. Эта модель описывает взаимодействие ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли на НОО, распределение потенциала и токов в системе. В отличие от известной модели [3, 8] предлагаемая модель позволяет более просто проводить расчеты и оценки эффектов такого взаимодействия для тросового соединения, а также учитывать дополнительные факторы, которые могут вносить значительные поправки в работу системы и в измерения.

Рассматривается ЭДКТС двух тел, соединенных токопроводящим тросом. В качестве троса рассматривается либо цилиндрическая нить,

---

© А. В. ПИРОЖЕНКО, А. В. МИЩЕНКО, 2018

либо лента. Система движется по почти круговой НОО. В расчетах, результаты которых приведены в статье, предполагается, что длина троса равна 1000 м, материал системы — алюминий, орбита близка к экваториальной. Концентрации заряженных частиц в ионосфере принимаются равными средней для данной высоты концентрации при средней солнечной активности.

**Распределение потенциала вдоль ЭДКТС.** Будем отсчитывать координату  $x$  линии троса от нижнего тела. Тогда напряжение на участках ЭДКТС можно описать с помощью дифференциального закона Ома [8]

$$\frac{dU}{dx} = E_{\text{л}} - \frac{I}{\sigma A_t}, \quad (1)$$

где  $U$  — электрический потенциал,

$$E_{\text{л}} = (\mathbf{F}_{\text{л}} \cdot \mathbf{e}_r) / q \approx [\mathbf{V}_{\text{орб}} \times \mathbf{B}] \cdot \mathbf{e}_r$$

— напряженность, обусловленная силой Лоренца  $\mathbf{F}_{\text{л}}$ , действующей на заряд  $q$ , и вызванная орбитальным движением системы в магнитном поле Земли,  $\mathbf{e}_r$  — единичный вектор, направленный вдоль линии троса от отрицательно заряженного тела к положительно заряженному (при прямом вращении ЭДКТС с вращением Земли направлен от нижнего тела к верхнему),  $\mathbf{V}_{\text{орб}}$  — скорость движения центра масс ЭДКТС в инерциальной системе координат, связанной с Землей [8],  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля Земли,  $I = I(x)$  — ток в данной точке троса,  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость материала троса,  $A_t$  — площадь поперечного сечения проводника (в случае цилиндрического троса  $A_t = \pi r_t^2 = p_t^2 / (4\pi)$ , в случае ленты  $A_t = d_t s = p_t s / 2$ , где  $d_t$  — ширина ленты,  $s$  — толщина ленты,  $p_t$  — периметр поперечного сечения троса).

Во многих случаях для ЭДКТС, в которых не предусмотрены дополнительные контакторы с плазмой, падение напряжения в тросе (второй член в выражении (1)) пренебрежимо мало влияет на изменение потенциала в системе. Это связано с большой удельной проводимостью материала троса и относительно небольшими токами в системе. Так, для рассматриваемой 1000-м системы ожидаемый ток составит приблизительно 5 мА, а удельная электрическая проводимость

алюминия  $\sigma = 3.5 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Поэтому уравнение (1) во многих случаях с большой точностью можно упростить и записать в виде

$$\frac{dU}{dx} = [\mathbf{V}_{\text{орб}} \times \mathbf{B}] \cdot \mathbf{e}_r. \quad (2)$$

Расчеты показывают, что замена (1) на (2) вносит погрешность 1–2 % в определение потенциала системы для пассивных ЭДКТС на НОО даже при их протяженности до 25 км.

Таким образом, можно считать, что электрический потенциал вдоль линии троса изменяется линейно. При этом предполагается, что изменения магнитного поля для разных частей системы и изменения скоростей частей ЭДКТС относительно магнитного поля в сравнении с орбитальной скоростью системы пренебрежимо малы.

Примем, что потенциал ионосферной плазмы равен нулю. Предположим, что на тросе имеется точка нулевого потенциала, разделяющая положительно и отрицательно заряженные относительно плазмы участки системы. Тогда уравнения (1) и (2) определяют потенциал точек системы относительно плазмы.

Обозначим координату точки нулевого потенциала на линии троса  $a$ , т. е.  $U(a) = 0$  (интервал  $[0, a]$  заряжен отрицательно,  $(a, l)$  — положительно,  $l$  — длина троса). Эта точка определяется равенством токов, собираемых из плазмы отрицательно и положительно заряженными участками системы. Следовательно, для расчета взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой и магнитосферой нужно определить токи, поступающие на положительно и отрицательно заряженные части системы в предположении линейного вдоль линии троса изменения их потенциала относительно плазмы. На основе равенства токов, поступающих из плазмы на разноименно заряженные части системы, нужно определить расположение точки нулевого потенциала на тросе, и лишь затем рассчитать потенциал и ток системы в различных ее частях.

**Токи анодной и катодной частей системы.** В этом подразделе выписаны соотношения для определения собирания токов из плазмы различными частями ЭДКТС. Эти соотношения получены на основе зондовой теории разреженной плазмы [1, 2].

Отметим, что тепловая скорость электронов значительно превосходит орбитальную скорость системы ( $V_e \gg V_{орб}$ ), и для расчета электронного тока на положительно заряженные части ЭДКТС применима теория неподвижного зонда. Вместе с тем орбитальная скорость в несколько раз превышает тепловую скорость ионов ( $V_{орб} \gg V_i$ ), поэтому для расчета ионного тока используется теория для зонда, находящегося в движущейся плазме [7].

Поток зарядов на трос рассчитывается по зондовой теории для цилиндров для орбитально ограниченного тока (ООТ) [3].

Ток электронов на положительно заряженную часть троса определяется формулой [5, 7]

$$I_{e1} = p_i j_{oe} \int_a^l i_{e1}^- dx, \quad (3)$$

где  $p_i$  — периметр поперечного сечения троса (в случае цилиндрического троса  $p_i = 2\pi r_i$ , в случае ленты  $p_i \approx 2d_i$ ),

$$i_{e1}^- = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eU}{kT_e} + 1}$$

— безразмерный электронный ООТ,

$$j_{oe} = en_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}$$

— плотность теплового электронного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток электронов),  $n_o$  — концентрация заряженных частиц в окружающей невозмущенной ионосферной плазме,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_e$  — температура электронов окружающей плазмы,  $m_e$ ,  $e$  — масса и заряд электрона.

Ток ионов на отрицательно заряженную часть троса определяется формулой [5, 7]

$$I_{i2} = j_{oi} \frac{p_i}{\pi} \int_0^a i_{i2}^+ dx, \quad (4)$$

где

$$j_{oi} = en_o \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi m_i}}$$

— плотность теплового ионного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток ионов),  $T_i$ ,  $m_i$  — температура и масса ионов окружающей ионосферной плазмы,

$$i_{i2}^+ = \frac{2}{\sqrt{\pi}} S_i \sqrt{1 + \frac{eU}{kT_i S_i^2}}$$

— безразмерный ионный ток,

$$S_i = \sqrt{\frac{m_i V_{орб}^2}{2kT_i}}$$

— скоростное отношение.

Соотношения ООТ (3), (4) справедливы для расчета собираемого тока цилиндрическим тросом, радиус поперечного сечения которого меньше или равен дебаевскому радиусу  $r_i \leq \lambda_D$ , или для тонкой ленты, толщина которой  $h_i \ll \lambda_D$  и ширина  $d_i \leq 4\lambda_D$  [10]. Если радиус троса больше, то для расчета тока при использовании соотношений ООТ необходимо вводить поправочные коэффициенты [9].

Потоки электронов на катодную и ионов на анодную части троса рассчитываются как токи отталкивающих частиц [7].

Ток электронов на катодную часть троса определяется формулой

$$I_{e2} = p_i j_{oe} \int_0^a \exp\left(-\frac{eU}{kT_e}\right) dx. \quad (5)$$

Токи ионов на анодную часть троса определяется формулой

$$I_{i2} = p_i j_{oe} \int_0^a \exp\left(-\frac{eU}{kT_e}\right) dx. \quad (6)$$

**Расчет тока на концевые тела** ЭДКТС основывается на моделях для больших сферических зондов [2, 9]. При этом концевые тела будем моделировать некоторыми эквивалентными сферами радиуса  $R_o$  ( $R_o \gg \lambda_D$ ).

Собирание электронного тока *положительно заряженным телом* при не очень высоких его потенциалах определяется формулой

$$I_{es1} = k_s I_{oe}, \quad (7)$$

где  $I_{oe} = en_o R_o^2 \sqrt{8\pi kT/m_e}$  — электронный ток в отсутствие электрического поля,  $R_o$  — радиус сферического зонда,  $k_s$  — коэффициент усиления тока, значения которого для различных потенциалов даны в [7].

Во многих случаях для рассматриваемых ЭДКТС потенциал положительно заряженного тела таков, что ток электронов достигает насыщения, и его величина не зависит от потенциала.

Ток насыщения в 1.47 раз превышает ток  $I_{oe}$  в отсутствие поля [7]:

$$I_{es2} = 1.47 I_{oe}. \quad (8)$$

Для собирания электронов при очень высоких потенциалах ( $eU/(kT_e) \geq (R_o/\lambda_D)^{4/3}$ ) применяется теория для тока, ограниченного слоем. Наиболее известные теории для расчета тока, ограниченного слоем — теория Альперта — Лема и теория Паркера — Мерфи. Обе эти теории проверялись в орбитальном эксперименте TSS-1R. Теория Паркера — Мерфи, в отличие от теории Альперта — Лема, учитывает влияние замагниченности плазмы на собирание тока, однако в эксперименте TSS-1R она не подтвердилась. Полученные экспериментальные данные лучше сошлись с теорией Альперта — Лема. Собираемый ток в этой теории определяется соотношением [10]:

$$I_{es3} = I_{AL} = I_{oe} H(\Phi_{AL}), \quad (9)$$

где

$$\Phi_{AL} = \frac{eU}{kT_e} \left( \frac{\lambda_D}{R_o} \right)^{4/3} = \Phi_w \left( \frac{\lambda_D}{R_o} \right)^{4/3}$$

— безразмерный потенциал в теории Альперта — Лема,  $H(\Phi_{AL})$  — безразмерная функция тока, ограниченного слоем.

Вид функции  $H(\Phi_{AL})$  был уточнен по результатам эксперимента TSS-1R, после чего экспериментальные данные хорошо сошлись с теоретическими:

$$H(i_{AL}) = 4.5(\Phi_{AL})^{1/2}. \quad (10)$$

В эксперименте TSS-1R максимальный безразмерный потенциал Альперта — Лема был равен  $\Phi_{AL} \approx 10$ . Как утверждается в [9], для безразмерных потенциалов, лежащих в диапазоне  $\Phi_{AL} = 0.25...10$ , аппроксимация (10) дает погрешность менее 10%. Использование (10) для расчета тока при потенциалах  $\Phi_{AL} > 10$  не исключается, но требует экспериментальной проверки.

Расчеты показывают, что для рассматриваемых ЭДКТС в ряде случаев в зависимости от параметров системы и ее орбиты нужно использовать модели (9), (10) теории для тока, ограниченного слоем.

**Собирание тока ионов отрицательно заряженным телом** является одним из наиболее трудных

для моделирования процессов и наименее экспериментально проверенно. Поскольку орбитальная скорость ЭДКТС в несколько раз превышает скорость ионов, то используется теория для зонда, находящегося в движущейся плазме [7]. Эта теория отмечает значительные несимметричности возмущенной зоны плазмы, которые существенно затрудняют решение задачи [7].

Еще одной особенностью собирания ионного тока отрицательно заряженным спутником является неизотермичность плазмы. Для ионосферной плазмы на высотах  $h = 400...800$  м отношение  $T_i/T_e$  равно 0.57...0.73. Величина ионного тока на большой зонд при  $T_e > T_i$  отличается от величины тока в изотермической плазме [2] и определяется не температурой ионов, а температурой электронов.

Поскольку во многих случаях потенциал отрицательно заряженного тела очень высок ( $eU/(kT_e) \geq (R_o/\lambda_D)^{4/3}$ ), то для моделирования собирания ионов этим телом, как и в случае с электронами, будем использовать модели теории Альперта — Лема [9] для тока, ограниченного слоем. Ионный ток на отрицательно заряженное тело будем описывать выражением

$$I_{is} = I_{AL} = I_{oi} H(\Phi_{AL}), \quad (11)$$

где

$$I_{oi} = 2\pi R_o^2 S_i^2 e n_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_i}}$$

— ионный ток в отсутствие электрического поля.

При этом считаем, что вид функции  $H(\Phi_{AL})$  для ионного тока такой же, как и в случае с электронным током (10).

Отметим, что поскольку коэффициент функции  $H(\Phi_{AL})$  был найден эмпирически для электронного тока, то для ионного тока он может быть иным. Соотношения (11), (10) нуждаются в экспериментальной проверке.

Значимый вклад в баланс тока ЭДКТС может вносить фототок. Поскольку фототок пропорционален площади освещаемой поверхности, то вклад концевых тел в его величину для рассматриваемых ЭДКТС пренебрежимо мал. Также незначителен будет фототок с положительно заряженной части троса, поскольку, во-первых,

она достаточно короткая, и, во-вторых, при положительном потенциале, большем величины запирающей разности потенциалов ( $\varphi \approx 2$  В), фотоэлектроны, выбиваемые фотонами, будут сразу же возвращены на трос электрическим полем.

Ток электронов с катодной части троса будем описывать соотношением

$$I_{\phi} = \frac{p_t}{2} \int_0^a j_{\phi} dx = \frac{p_t}{2} (l-a) j_{\phi}, \quad (12)$$

где  $j_{\phi}$  — плотность фотоэлектронного тока при отрицательном потенциале поверхности.

Поскольку интенсивность солнечного излучения на орбите почти постоянна, то величина фототока определяется лишь материалом поверхности троса и затененностью этой поверхности. Основываясь на измерениях, выполненных спутником «Эксплорер-VIII» на НОО, плотность фотоэлектронного тока с алюминиевой поверхности при ее отрицательном потенциале равна  $j_{\phi} = 4.8 \cdot 10^{-9}$  А/см<sup>2</sup> [1, 4].

**Координата нулевого потенциала** определяется балансом электронного и ионного токов, поступающих на ЭДКТС. В рамках модели собирания тока (3)–(12) можно записать выражение для определения координаты нулевого потенциала:

$$\begin{aligned} I_{e1}(a) + I_{es}(a)_{(1,2)} - I_{i1}(a) = \\ = I_{i2}(a) + I_{\phi}(a) + I_{is}(a) - I_{e2}(a). \end{aligned}$$

В это выражение входят параметры орбиты, окружающей ионосферы и параметры самой ЭДКТС. Координата нулевого потенциала определяет длины анодной и катодной частей системы.

**Примеры расчетов для экспериментальной ЭДКТС и основная особенность взаимодействия системы с магнитосферой и ионосферой.** Проведем оценки собираемого тока для малых ЭДКТС протяженностью 1000 м с радиусами концевых тел  $R_0 = 10$  см. Будем рассматривать два вида систем: с цилиндрическим тросом ( $r_t = 3$  мм) и с лентой ( $d_t = 2$  см).

Максимальные токи (в точке нулевого потенциала) в ЭДКТС с тросом составляют: 27 мА для дневной и 1.6 мА для ночной частей орбиты высотой 300 км соответственно, 4.1 и 1.5 мА для орбиты высотой 650 км.

Максимальные токи в ЭДКТС с лентой составят: 50 и 3.3 мА для орбиты высотой 300 км, 8.4 и 3.0 мА для орбиты высотой 650 км.

Основной особенностью взаимодействия рассматриваемой ЭДКТС с ионосферной плазмой является сравнительно короткая положительно заряженная ее часть. Расчеты показывают, что при произвольных длинах троса положительно заряженная часть не превосходит 2 % всей длины.

Это происходит вследствие того, что масса ионов значительно превышает массу электронов. При примерно равных энергиях скорость электронов почти на порядок больше скорости ионов и в несколько раз превышает орбитальную скорость. С учетом направленности потока ионов хаотический ток ионов на цилиндрический трос в  $\sqrt{m_e / (\pi m_i)}$  раз меньше электронного тока. Для средней массы ионов, находящихся на орбите высотой 600 км, это отношение равно  $\sqrt{m_e / (\pi m_i)} \approx 3.45 \cdot 10^{-3}$ .

Длина положительной части ЭДКТС зависит от многих факторов, в том числе от параметров троса (его длины и площади поперечного сечения) и наклона орбиты к магнитному экватору. Вполне возможным является случай, когда в системе нет положительно заряженной части, и потенциал всех ее частей относительно окружающей плазмы отрицателен. В этом случае ток в системе будет крайне мал. Представляется, что экспериментальные исследования в таких случаях теряют свой смысл. Расчеты показывают, что для успешного проведения эксперимента длина троса должна превосходить 400 м даже для низко наклоненных орбит.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена модель пассивной ЭДКТС, описывающая ее взаимодействие с магнитосферой и ионосферой Земли на НОО, распределение потенциала и токов в системе. В отличие от известной модели [3, 8] предлагаемая модель позволяет проводить расчеты на основе решения алгебраического, а не дифференциального уравнения, а также позволяет учитывать ряд дополнительных факторов, которые могут вносить значительные поправки в работу системы и в измерения.

2. Модель позволяет рассчитывать параметры ЭДКТС для проведения орбитального эксперимента, обеспечивающие существование анодной и катодной части системы для выбранной орбиты, а также прогнозировать напряжения и токи в частях системы.

3. Модель удобна для расчета динамики ЭДКТС с учетом других внешних воздействий.

*Авторы выражают благодарность профессору В. А. Шувалову за идеи и ценные советы, положенные в основу модели.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бойд Р.* Зонды Ленгмюра на космическом корабле // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 506—538.
2. *Козлов О. В.* Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969. — 290 с.
3. *Ahedo E., Sanmartin J. R.* Analysis of bare-tether systems for deorbiting low-Earth-orbit satellites // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2002. — **39**, N 2. — P. 198—205.
4. *Chu C. K., Gross R. A.* Alfvén waves and induction rag on long cylindrical satellites // *AIAA J.* — 1966. — **4**, N 12. — P. 2209—2214.
5. *HTV-KITE Experiment*. — URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
6. *Johnson L., Fujii H. A., Sanmartin J. R.* Electrodynamic Propulsion System Tether Experiment (T-REX) [Электронный ресурс] // NASA Technical Reports Server (NTRS). — 2010. — 20100024214. — 30 p. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
7. *Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE)*. — URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
8. *Sanmartin J. R., Estes R. D.* Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime // *J. Phys. Plasmas*. — 2000. — **7**, N 10. — P. 4320—4325.
9. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C.* Spherical collectors versus bare tethers for drag, thrust, and power generation // *AIAA 2005-4434 - 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 - 13 July 2005, Tucson, Arizona* — P. 1—7.
10. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M.* Electrodynamic tether applications and constraints // *J. Spacecraft and Rockets*. — 2010. — **47**, N 3. — P. 142—156.

11. *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. *Boyd R. L. F.* Zondi Lengmura na kosmicheskom korable [Langmuir probes on a spacecraft]. *Methods of plasma research*. Moskva : Mir (1971) [in Russian].
2. *Kozlov O. V.* Elektricheskiy zond v plazme [Electrical probe in plasma]. Moskva.: Atomizdat (1969) [in Russian].
3. *Ahedo E., Sanmartin J. R.* Analysis of Bare-Tether Systems for Deorbiting Low-Earth-Orbit Satellites. *J. Spacecraft and Rockets*. **39** (2). 198—205 (2002).
4. *Chu C. K., Gross R. A.* Alfvén waves and induction rag on long cylindrical satellites. *AIAA J.* **4** (12). 2209—2214 (1966).
5. *HTV-KITE Experiment*. *spaceflight101.com*. — URL: <http://spaceflight101.com/htv-6/htv-kite-experiment/>.
6. *Johnson L., Fujii H. A., Sanmartin J. R.* Electrodynamic Propulsion System Tether Experiment (T-REX) // NASA Technical Reports Server (NTRS). — 20100024214. — 30 p. (2010). — URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100024214.pdf>.
7. *Miniature Tether Electrodynamics Experiment (MiTEE)*. *digitalcommons.usu.edu*. — URL: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3293&context=smallsat>.
8. *Sanmartin J. R., Estes R. D.* Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime. *J. Physics of Plasmas*. **7** (10). 4320—4325 (2000).
9. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C.* Spherical Collectors Versus Bare Tethers for Drag, Thrust, and Power Generation // *AIAA 2005-4434 - 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 - 13 July 2005, Tucson, Arizona* — P. 1—7.
10. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M.* Electrodynamic tether applications and constraints. *J. Spacecraft and Rockets*. **47** (3). 142—156 (2010).
11. *Tether Electrodynamic Propulsion CubeSat Experiment (TEPCE)*. *en.wikipedia.org*. — 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, О. В. Мищенко

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро, Україна

МАЛА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА  
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА КОСМІЧНА ТРОСОВА  
СИСТЕМА. ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ

Інтерес до експериментальних досліджень з електродинамічними космічними тросовими системами (ЕДКТС) на низьких навколосезних орбітах (ННО) зберігається вже протягом декількох десятиків років. Цей інтерес обумовлений перспективністю використання ЕДКТС для транспортних операцій та відведення космічного сміття. Зниження вартості таких експериментів пов'язане з використанням малих тросових систем. Метою статті є розробка електричної моделі пасивної ЕДКТС, тобто такої ЕДКТС, в якій не передбачені додаткові контактори з плазмою. Дана модель ґрунтується на зондовій теорії та рівності електронного та іонного струмів, що збираються системою в іоносферній плазмі. Модель дозволяє розраховувати параметри експериментальної ЕДКТС, що забезпечують існування анодної та катодної частин системи для обраної орбіти, а також прогнозувати напругу та струми в частинах системи. Розглядається ЕДКТС двох тіл, з'єднаних струмопровідним тросом. Як трос розглядається або циліндрична нитка, або стрічка. Потік зарядів на трос розраховується за зондовою теорією для циліндрів для орбітально обмеженого струму. Розрахунок струму на кінцеві тіла ЕДКТС ґрунтується на моделях для великих сферичних зондів. Збирання струму іонів негативно зарядженим тілом є одним з найбільш складних для моделювання процесів і найменш експериментально перевіреним. Для його розрахунку в доповіді використано модель Альперта—Лема для струму, обмеженого шаром. Відзначимо, що оскільки коефіцієнти цієї теорії були знайдені емпірично для електронного струму, то для іонного струму вони можуть бути іншими і вимагають експериментальної перевірки. Основною особливістю взаємодії розглянутої ЕДКТС з іоносферною плазмою є порівняно коротка її анодна частина. Розрахунки показують, що при будь-яких довжинах троса позитивно заряджена частина не перевищує 2 % всієї довжини. На відміну від попередньої моделі, запропонована модель дозволяє простіше провадити розрахунки та оцінки ефектів взаємодії системи з плазмою, а також враховувати ряд додаткових факторів, які можуть вносити значні поправки в роботу системи.

**Ключові слова:** електродинамічна космічна тросова система, система відведення космічних апаратів, електрична модель.

A. V. Pirozhenko, A. V. Mischenko

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Dnipro, Ukraine

SMALL EXPERIMENTAL  
ELECTRODYNAMIC SPACE TETHER SYSTEM.  
ELECTRICAL MODEL

For some decades, the scientists preserve an interest in the experimental research with electrodynamic space tethered system (EDSTS) in low Earth orbits (LEO). This interest is caused by the prospects of the EDSTS's use for transport operations and for space debris deorbit. The cost reduction of such experiments is associated with the small tether system's applying. The aim of this paper is to describe the electric model of passive EDSTS, in which additional contactors with plasma are not provided. The model is based on the probe theory and the equality of the electron and ion currents collected by the system in the ionospheric plasma. Model makes possible to calculate the EDSTS parameters ensuring the existence of the anodic and cathodic of the system parts for the selected orbit, as well as predicting the voltages and currents in the parts of the system. We examine the EDSTS of two bodies connected by a conductive cable, where either a cylindrical tether or a tape is considered as a cable. The flow of charges on the tether was calculated for the orbital-motion-limited regime of cylindrical Langmuir probes. The calculation of the current values on the end bodies of EDSTS is based on the models for large spherical probes. The collection of the ion current by a negatively charged body is one of the most difficult procedures to model processes and is the least experimentally verified. To calculate it, we used the Alpert-Lem model for a current limited by layer. We note that, since the coefficients of this theory for the electron current were found empirically, they may be different for the ion current and need experimental verification. The main feature of the interaction of the considered EDSTS with the ionospheric plasma is its relatively short anode part. Calculations show that the positively charged part for arbitrary tether lengths does not exceed 2 % of the total length. Unlike the previously known model, the proposed model allows us to simplify calculations and estimates of the effects of system interaction with plasma as well as to take into account a number of additional factors that can make significant corrections to the system operation.

**Keywords:** electrodynamics space tethered system, spacecraft removal system, electrical model.