

К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

На основе анализа модели взаимодействия электродинамической космической тросовой системы с ионосферной плазмой и магнитосферой Земли проанализированы актуальные задачи экспериментальных исследований и определены задачи исследований по подготовке натурального эксперимента.

На основі аналізу моделі взаємодії електродинамічної космічної тросової системи з іоносферною плазмою та магнітосферою Землі проаналізовано актуальні задачі експериментальних досліджень та визначено задачі досліджень по підготовці натурального експерименту.

Problems of important experimental researches based on the analysis of interaction model electrodynamic space tethered systems with ionospheric plasma and a magnetosphere of the Earth are analyzed. Research problems on preparation for natural experiment are specified.

В связи с проблемой загрязнения космического пространства отработанными космическими аппаратами и ступенями ракет-носителей возникла задача создания средств увода этих объектов с рабочих орбит [1]. В настоящее время в разных странах ведутся разработки ряда проектов электродинамических космических тросовых систем (ЭДКТС) увода космических объектов с низких околоземных орбит (НОО) [2 – 10]. Применение ЭДКТС для решения этих задач представляется многообещающим и экономически целесообразным [1, 5 – 13].

К настоящему времени в области исследования ЭДКТС получено большое количество содержательных результатов. Предложена модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой, и показана эффективность оголенного провода для собирания из ионосферы электронного тока [6, 9, 14]. Показана и экспериментально подтверждена возможность использования полых катодов для замыкания цепи большого тока ЭДКТС [2, 15]. Вместе с тем, результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, связанную с резонансами колебаний системы относительно центра масс и действием амперовых [1, 3] и аэродинамических [1, 16] моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС.

Имеющиеся в литературе предложения по управлению процессами стабилизации углового движения радиальной ЭДКТС не только существенно усложняют техническую реализацию проекта, но и не являются достаточно обоснованными. Так, в предложении создания ЭДКТС, в которой усредненный момент амперовых сил равен нулю [7, 8], не учтен резонансный характер колебаний и аэродинамическая неустойчивость. Предложения по стабилизации углового движения за счет управления током в тросе основаны на предположении, что модель собирания тока и прохождения его по тросу известна [3, 8]. Отметим, что в последнее время появился интересный, в определенном плане альтернативный, проект вращающейся ЭДКТС для сбора и увода космического мусора [5, 17].

Информация об экспериментальных данных функционирования ЭДКТС к настоящему времени достаточно ограничена. Эксперимент “TSS-1R” показал возможность собирания в ионосфере больших токов [2]. Этот же эксперимент показал некорректность существующих на то время моделей взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. Экспериментальные данные силы тока превысили расчетные в 2 – 3 раза. Эксперимент “PMG” показал возмож-

© А.В. Мищенко, А.В. Пироженко, 2011

ность использования полых катодов для достижения в тросе больших токов [2, 15]. Там же была показана существенная зависимость тока в тросе от концентрации заряженных частиц в окружающей ионосфере. Отсюда, с учетом модели [18, 19] изменения концентрации частиц в ионосферной плазме при орбитальном движении ЭДКТС, немедленно следует резонансная неустойчивость колебаний троса перпендикулярно плоскости орбиты.

В настоящее время европейскими, японскими, американскими и австралийскими учеными готовится совместный проект космического эксперимента ЭДКТС на ракетном зонде [20]. В этом эксперименте планируется проверка возможности применения неизолированного троса для ЭДКТС, а также возможности применения модели орбитально ограниченного тока как расчетной.

Представляется, что развитие столь перспективного направления, как ЭДКТС, будет принимать все более широкий характер международных исследований. Эти исследования, по-видимому, в первую очередь должны быть направлены на получение достоверных экспериментальных данных.

Цель данной работы состоит в определении задач исследований по подготовке натурального эксперимента ЭДКТС. Для этого проводится анализ наиболее распространенной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли и определяются актуальные вопросы экспериментальных исследований.

Физические принципы функционирования ЭДКТС. Для описания принципов функционирования ЭДКТС введем инерциальную систему координат (ИСК) с началом в центре масс Земли $O_z - O_z X_u Y_u Z_u$, ось $O_z Z_u$ направлена по оси вращения Земли, ось $O_z X_u$ – в точку весеннего равноденствия.

Рассмотрим движение ЭДКТС как однородного проводника, движущегося на НОО (рис. 1). Как известно [21], движение в ИСК магнита, среды или самого проводника приводит к движению или перераспределению зарядов в проводнике, обусловленному электродвижущими силами (ЭДС) индукции. В дальнейшем ЭДС индукции, обусловленной вращением Земли как магнита, будем пренебрегать.

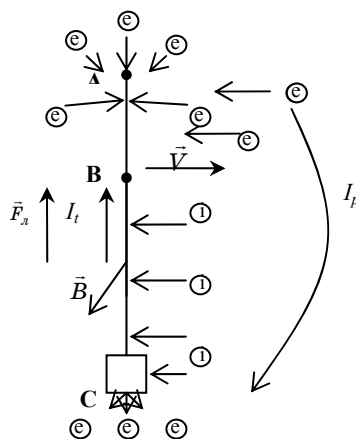


Рис. 1 – Схема функционирования ЭДКТС.

Выражение для силы Лоренца, действующей на заряды ЭДКТС, запишем в виде [21]:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]), \quad (1)$$

где q – заряд частицы ЭДКТС; \vec{v} – скорость движения заряженных частиц ЭДКТС в ИСК, в первом приближении примем $\vec{v} = \vec{V}_\infty$; \vec{V}_∞ – скорость движения центра масс ЭДКТС в ИСК; $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_T$ – суммарная напряженность электрического поля; \vec{E}_0 – напряженность электрического поля в окружающей среде; \vec{E}_T – напряженность электрического поля, обусловленная зарядами в проводнике; \vec{B} – индукция магнитного поля Земли.

Для НОО считается [22], что атмосфера полностью увлекается вращением Земли. Тогда можно предположить, что вследствие движения заряженных частиц ионосферы в магнитном поле Земли возникает электрическое поле, напряженность которого в окрестности ЭДКТС с описывается формулой [3, 8, 10]

$$\vec{E}_0 = -\vec{v}_{pl} \times \vec{B}, \quad (2)$$

где $\vec{v}_{pl} = \vec{\omega}_E \times \vec{R}$ – скорость движения заряженных частиц плазмы в ИСК вследствие вращения Земли; $\vec{\omega}_E$ – угловая скорость вращения Земли; \vec{R} – радиус-вектор центра масс ЭДКТС.

Однако это предположение трудно признать оправданным, поскольку напряженность электрического поля в ионосферной плазме определяется другими, гораздо более сложными процессами и взаимодействиями [23].

Далее будем рассматривать трос как одномерную структуру, распределенную вдоль отрезка прямой. Тогда действие сил Лоренца на заряды проводимости троса определяется проекцией (1) на линию троса.

Под действием силы Лоренца на электроны проводимости ЭДКТС происходит перераспределение зарядов: одна часть ЭДКТС приобретает положительный заряд, другая – отрицательный. Если бы ЭДКТС не взаимодействовала с зарядами окружающей плазмы (двигалась в вакууме), то перераспределение зарядов происходило бы до тех пор, пока электрическая составляющая силы Лоренца не уравновесила магнитную. Напряженность равновесного электрического поля, обусловленного зарядами в проводнике, в этом случае была бы равной $E_T = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{e}_x$, где E_T – проекция \vec{E}_T на касательную к оси троса \vec{e}_x .

Следует отметить, что здесь идет речь о квазиравновесной напряженности, обусловленной распределением зарядов. Движение ЭДКТС по орбите и ее движение относительно центра масс, вообще говоря, приводило бы, в силу изменений \vec{B} , \vec{v} и \vec{e}_x , к перераспределению зарядов в ЭДКТС, т.е. возникновению токов. Несмотря на незначительность этих токов, их влияние на эволюцию движения системы могло бы быть существенным, поскольку возникающие при этом силовые воздействия носят диссипативный характер, т.е. характер воздействий, приводящих к рассеиванию механической энергии.

Отметим также, что задача расчета распределения зарядов на проводнике, возникающего вследствие действия ЭДС индукции, несмотря на кажущуюся ее простоту, является далеко не тривиальной.

При движении ЭДКТС в ионосфере (состоящей из ионов и электронов), положительная часть системы будет собирать электроны, отрицательная – ионы, и в тросе будет течь ток. На проводник с током, находящийся в магнитном поле Земли, в свою очередь, действует перпендикулярная тросу сила

Лоренца. Если ЭДКТС пересекает магнитные силовые линии перпендикулярно их направлению (движение в плоскости магнитного экватора), то вся сила направлена на торможение движения. В ином случае возникают силы, направленные перпендикулярно плоскости орбиты, которые могут быть причиной раскачивания ЭДКТС относительно плоскости орбиты.

Анализ модели. В настоящее время наиболее перспективными считаются ЭДКТС, имеющие в своей конструкции неизолированные ленту или трос. Неизолированный трос в таких системах играет роль контактора с плазмой (анода), собирающего электроны. Дж. Санмартин (J. Sanmartin) [9] показал, что ЭДКТС с оголенным тросом позволяют собирать в плазме большой электронный ток. В системах с изолированным тросом в качестве анода предполагается использовать большие металлические поверхности, при расчете тока на которых необходимо учитывать влияние магнитного поля на электроны ионосферы. Собираемый поверхностью ток в этом случае почти в 2 раза [24] меньше чем ток, собираемый той же поверхностью без учета влияния магнитного поля на движение электронов.

Несмотря на очевидное преимущество для собирания тока, в ЭДКТС с неизолированным тросом действие электродинамической силы неравномерно распределено вдоль троса. Это может привести к раскачиванию системы. В ЭДКТС с изолированным тросом сила тока постоянна вдоль проводника, вследствие чего действие электродинамических сил вдоль него равномерно. Однако массовая несимметричность системы может также привести к ее раскачиванию за счет действия моментов.

Далее будем рассматривать ЭДКТС с неизолированным тросом.

Для построения модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой рассмотрим бесконечно малый отрезок цилиндрического троса dx , где x – координата оси троса. Поступающие на этот участок внешние заряды снижают равновесное электрическое поле E_T проводника. Вследствие этого, под действием ЭДС индукции по нему течет ток. Связь между током и изменением разности потенциалов определяется законом Ома [5]

$$\frac{dU}{dx} = \frac{I(x)}{\sigma A_t} - E_m, \quad (3)$$

где U можно рассматривать как разность потенциалов между тросом и плазмой; $I(x)$ – ток, текущий через данную точку троса; σ – электрическая проводимость троса; A_t – площадь поперечного сечения проводника; E_m – проекция суммарной напряженности внешнего электрического поля и электрического поля, возникающего вследствие действия внешнего магнитного поля. С учетом (2) [3, 8, 10], эта проекция равна $E_m = ((\vec{V}_\infty - \vec{\omega}_E \times \vec{R}) \times \vec{B}) \cdot \vec{e}_x$. Однако, с учетом вышеизложенных рассуждений, можно принять $E_m = (\vec{V}_\infty \times \vec{B}) \cdot \vec{e}_x$, что соответствует [5, 7, 9, 14].

Собираемый электронный ток рассчитывается на основе зондовой теории для орбитально ограниченного тока (ООТ) [25] для цилиндрических зондов

$$\frac{dI}{dx} = \frac{2p_t j_{oe}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eU(x)}{kT_e} + 1}, \quad (4)$$

где I – ток, поступающий с плазмы на зонд; p_t – периметр поперечного сечения зонда; $j_{oe} = en\sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}}$ – плотность теплового электронного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток электронов); n – концентрация заряженных частиц в невозмущенной плазме; e – заряд электрона; T_e , m_e – температура и масса электрона; k – постоянная Больцмана.

Для расчета собираемого электронного тока для достаточно длинных тросов при больших электрических потенциалах в [6, 9, 14] введено упрощение

$$\frac{dI}{dx} = \frac{enp_t}{\pi} \sqrt{\frac{2eU(x)}{m_e}}. \quad (5)$$

В [26] показано, что выражения (4), (5) подходят для расчета тока на цилиндры с радиусами, не превышающими дебаевский $r_t \leq \lambda_D$. Если радиус троса больше дебаевского $r_t > \lambda_D$, в (5) вводится коэффициент пропорциональности.

Собирание ионного тока на отрицательно заряженный участок троса, в соответствии с той же теорией, описывается выражением, аналогичным (5). Нетрудно показать, что при $T_e \approx T_i$, где T_i – температура ионов, и для больших потенциалов троса, выражение для ионного тока, стоящее в правой части, надо домножить на коэффициент $\varepsilon_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$, где m_i – масса иона. В [6, 9] говорится о коэффициенте $\varepsilon = \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$. Однако, следует заметить, что скорость ионов, в отличие от электронов, значительно меньше орбитальной скорости системы. Ионы налетают на трос только с одной стороны, и площадь собирания будет равна не $2\pi r_t l$, как для электронов, а $2r_t l$, что меньше в π раз. Значит, коэффициент перехода будет равен не $\varepsilon = \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$, а $\varepsilon_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$.

Предполагая, что весь собранный предшествующим участком троса в плазме ток равен току, протекающему через данную точку $I(x)$, получим замкнутую систему уравнений (3), (5) для анодной части троса. Для катодной части уравнения аналогичны.

Уравнения (3), (5) являются основной частью общепризнанной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. В [6, 9, 14] вывод этих уравнений осуществлен с помощью СТО (специальной теории относительности). При этом осуществляется переход в систему координат, связанную с тросом, как инерциальную систему координат. Такой подход представляется не совсем удачным. И не только потому, что он очень необычен для специалистов по динамике. Такой подход не учитывает разные скорости электронов и ионов в ионосферной плазме и их качественное отличие от орбитальной скорости ЭДКТС. Этот подход требует принять плохо обоснованное предположение о напряженности электрического поля в нейтральной плазме. Кроме того, при всей эквивалентности магнитного и электрического поля в СТО, она не описывает различия в изоляции от электрического и магнитного полей.

Система уравнений (3), (5) получена в предположении, что ток, проходящий через поперечное сечение троса, в точности равен току, собираемому

предшествующим участком троса в плазме. Это предположение эквивалентно предположению, что рассматривается установившийся процесс. Возможность установления такого процесса не обсуждается. Не рассматриваются ни индукционные, ни емкостные свойства ЭДКТС. Вместе с тем, собирание ЭДКТС тока в плазме является сложным физическим явлением. Причиной тока в тросе является ЭДС индукции. Заряженные частицы плазмы притягиваются на трос избыточными зарядами троса, величина которых связана с емкостными свойствами троса.

Уравнения (3), (5) для анодной части троса, аналогичные уравнения для катодной части троса (с учетом в уравнении (5) коэффициента перехода $\varepsilon_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$) и граничные условия для тока и (или) потенциала на концах троса составляют модель протекания тока в ЭДКТС. Особенностью этой модели является то, что длина анодного и катодного участков троса не фиксирована. Расположение на тросе точки нулевого потенциала В (см. рис. 1), определяющей границы каждого из участков троса, вычисляется в результате решения уравнений.

Анализ решений рассмотренной модели и их свойств рассмотрен в [6, 8, 9, 14]. Наиболее полное решение уравнений модели, на наш взгляд, дано М. Санхурхо Риво (M. Sanjurjo Rivo) в [8]. Далее будем следовать изложенному в [8] алгоритму решения.

Для решения системы уравнений (3) и (5) удобнее перейти к безразмерным переменным:

$$i = \frac{I}{I^*}, \quad \varphi = \frac{U}{U^*}, \quad \xi = \frac{x}{L^*}, \quad (6)$$

где I^*, U^* и L^* – характеристические величины: $I^* = E_m \sigma A_T$ – ток «короткого замыкания», т.е. ток, который собирался бы ЭДКТС при идеальном контакте с плазмой; $U^* = E_m L^*$ и $L^* = \frac{(m_e E_m)^{1/3}}{2^{3/2} e} \left(3\pi \frac{\sigma h_T}{n} \right)^{2/3}$ – разность потенциалов и длина троса, введенные для упрощения системы уравнений (3), (5); $h_T = \frac{2A_T}{p_T}$ – ширина ленты или радиус троса ЭДКТС.

С учетом (6) уравнения (3) и (5) принимают вид:

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = i - 1, \quad (7)$$

$$\frac{di}{d\xi} = \frac{4}{3} \varphi^{1/2}. \quad (8)$$

Для системы (7), (8) легко находится первый интеграл, дающий связь тока и потенциала, который для участков троса можно записать в виде:

$$\varphi(i, i_B) = (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \quad \text{при } \varphi > 0, \quad (9)$$

$$\varphi(i, i_B) = -\frac{1}{\varepsilon_1^{2/3}} (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \quad \text{при } \varphi < 0, \quad (10)$$

где $\varepsilon_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$ – коэффициент перехода; i_B – безразмерный ток в точке нулевого потенциала В.

Связь между током и длиной троса находится в параметрическом виде:

$$i(v) = 1 - (1 - i_B)ch(v), \quad (11)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3}(1 - i_B)^{1/3}(f(v_0) - f(v)) \quad \text{при } \varphi > 0, \quad (12)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3}(1 - i_B)^{1/3}\left(f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}}\right) \quad \text{при } \varphi < 0, \quad (13)$$

где v – введенный параметр для решения уравнения (8); $f(v) = \int_0^v (sh(v))^{1/3} dv$

– функция v ; $v_0 = \operatorname{arch}\left(\frac{1}{(1 - i_B)}\right)$ – значение v при $i = 0$.

Выражения (12), (13) получаются из (8) при подстановке (11), (9) и (10).

Связь между интервалом изменения v и длиной троса определяется из уравнения $\xi(v_m) = l_t$

$$l_t = \frac{4}{3}(1 - i_B)^{1/3}\left(f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}}\right), \quad (14)$$

где v_m – значение v , при котором $\xi(v_m) = l_t$; $l_t = \frac{L}{L^*}$; L – длина троса КТС.

Выражения (9) – (14) дают решение исходных дифференциальных уравнений и позволяют определить значение напряжения и тока в каждой точке троса при заданных граничных условиях на концах троса. Несмотря на аналитическую форму этих выражений, нахождение решения возможно только численным путем. Причем решение рассчитывается для конкретных значений параметров плазмы, магнитного поля и ЭДКТС, т.е. при исследовании динамики ЭДКТС должно рассчитываться на каждом шаге интегрирования. Поскольку рассматривается установившийся процесс, т.е. предполагается, что скорость его установления гораздо выше остальных скоростей, то скорости изменения параметров не учитываются.

На рисунке 2 представлено семейство решений (9) и (10) (фазовый портрет решения уравнений модели). Эти решения позволяют судить о распределении вольтамперных характеристик вдоль троса и принимать предположения [8], позволяющие строить упрощенные решения. Конкретное решение системы определяется граничными условиями, изображенными на рис. 2 штрих-пунктирными линиями, и приведенной длиной троса l_t . На рис. 2 пунктирной линией изображена вольтамперная характеристика на катодном конце троса (точке С). Это соотношение между током и напряжением должно выполняться для заданной l_t (выражения (10), (11) для заданной v_m).

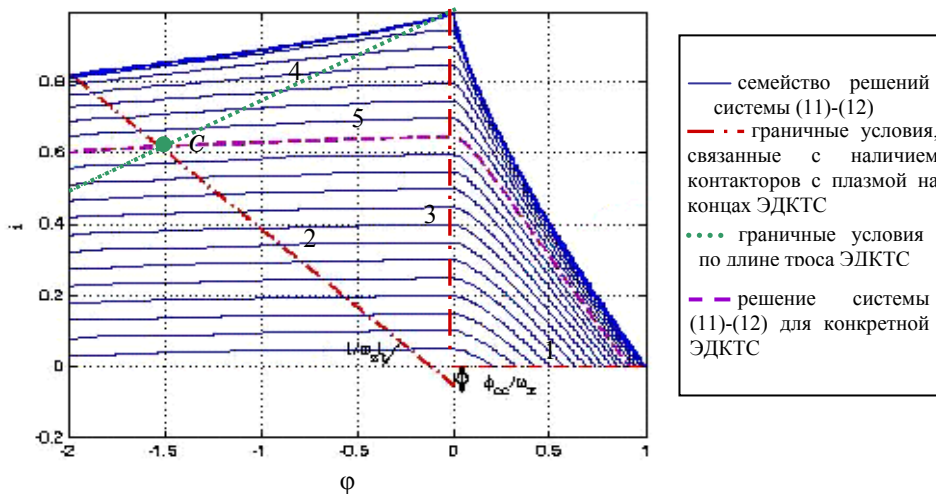


Рис. 2 Семейство решения уравнений модели [8]

Оголенный трос позволяет эффективно собирать электроны с плазмы. Поэтому обычно не предполагается наличие дополнительного устройства для сбора электронов на конце анодной части в т. А. Тогда, с большой точностью можно принять, что $i_A = 0$ (линия 1).

Поскольку пассивное собирание ионов весьма ограничено в сравнении с электронами, то для обеспечения эффективного стекания электронов обратно в плазму обычно предполагается, что на отрицательно заряженном конце ЭДКТС устанавливается плазменный контактор (полый катод) [6 – 8]. При идеальном контакте с плазмой разность потенциалов между тросом и плазмой в точке С равна нулю (линия 3 на рис. 2). Граничные условия для реального полого катода строятся в предположении, что он обеспечит такой ток, что разность потенциалов между катодом и плазмой будет фиксирована. В зависимости от конкретного устройства катода эта разность потенциалов составляет $15 \div 30$ В.

При наличии на катодном конце троса полезной нагрузки, граничные условия определяются из следующих соотношений. Закон Ома для отрицательно заряженного участка троса запишем в виде

$$E_m(L - L_B) = U_{cc} + Z_t I_c + \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx, \quad (15)$$

где $E_m(L - L_B)$ – ЭДС, индуцируемая на катодном участке ВС; $U_{cc} = 15 \div 30$ В – разность потенциалов между полым катодом и плазмой; Z_t – сопротивление нагрузки; I_c – сила тока, проходящего через т. С, где

находится катод; $\int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx$ – падение напряжения в тросе ЭДКТС при прохождении тока.

Из (3) следует, что разность потенциалов между тросом и плазмой в т. С равна

$$U_c = \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx - E_m(L - L_B). \quad (16)$$

Из (15), (16), с учетом (6), находится зависимость безразмерного тока i_c от потенциала ϕ_c на конце ЭДКТС в т. С

$$i_c = -\frac{\phi_c}{\omega l_t} - \frac{\phi_{cc}}{\omega}, \quad (17)$$

где $\phi_{cc} = \frac{U_{cc}}{E_m L}$, $\omega = \frac{Z_t \sigma A_t}{L}$ – безразмерные падение напряжения на катоде и сопротивление нагрузки.

На рис. 2 граничное условие (17) выделено штрих-пунктиром (линии 2). При идеальном катодном устройстве (т.е. при $\phi_{cc} = 0$ и $\omega = 0$) линия граничного условия (17) совпадает с осью ou или линией $\phi_c = 0$ (линии 3). Это значит, что весь трос является анодом и точка нулевого потенциала т. В совпадает с концом троса т. С. Такой случай рассматривался в моделях [7, 9].

Граничное условие (17) с учетом вольтамперной характеристики катодного конца троса для фиксированной l_t (точка С на рис. 2) дает решение уравнений модели. На рис. 2 данное решение показано штрихованной линией (линии 5). Напомним, что l_t содержит в себе параметры взаимодействия ЭДКТС с магнитным полем и плазмой.

Моделирование работы полого катода осуществляется в тех же предположениях, что и моделирование работы всей ЭДКТС: предполагается, что имеет место установившийся процесс, скорость установления которого гораздо выше скоростей изменения внешних параметров. Также предполагается, что излучаемые ЭДКТС электроны никак не меняют концентрацию плазмы. Предполагается, что электроны уходят от ЭДКТС вдоль линий индукции магнитного поля Земли и электрический контур замыкается на бесконечности. Обоснованность этих предположений с учетом произвольной ориентации скоростей вылета электронов относительно линий индукции магнитного поля и с учетом собственного магнитного поля ЭДКТС не очевидна и в работах [6 – 10] не обсуждается. Не рассматривается и вопрос, что будет с полым катодом, если напряжение на тросе (в точке С) будет ниже фиксированного для данного катода уровня. Важным с точки зрения динамики является вопрос силовых воздействий полого катода на ЭДКТС: не будет ли полый катод создавать крутящий момент? Дело в том, что радиальная ЭДКТС имеет одноосную гравитационную стабилизацию и практически никак не может противодействовать крутящему вдоль линии троса моменту.

Выводы. Рассмотренная модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли построена на основе ряда недостаточно обоснованных предположений. Если учесть, что и модель собирания тока ЭДКТС с ионосферы – модель зондовой теории для ООТ, требует экспериментального подтверждения, то становится очевидным, что развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением достоверных экспериментальных данных функционирования системы в натуральных условиях. Если бы система была устойчива, то ошибки расчета тока даже в разы не изменили бы пригодности

системы для изменения орбит объектов. Однако для реализации проектов радиальной ЭДКТС, в частности проекта увода объектов с орбит, не достаточно получить большой ток, а нужно научиться управлять им.

Эффективность радиальной ЭДКТС во многом будет определяться эффективностью управления стабилизацией ее движения. Несмотря на относительно незначительность моментов, обуславливающих резонансную раскачку пассивной системы, рост амплитуд ее колебаний относительно местной вертикали через определенное время может достигать критической величины, когда растягивающая трос сила становится недостаточной для его распрямления. В этом случае трос начнет сжиматься, образуя петли, увеличится амплитуда колебаний и, в итоге, ЭДКТС как протяженный проводник, перестанет существовать.

Резонансная неустойчивость радиальной ЭДКТС является следствием того, что частота ее колебаний перпендикулярно плоскости орбиты близка к удвоенной орбитальной частоте. Это свойство ЭДКТС является принципиальным (характерным) свойством сильно протяженных в одном измерении структур: осевой момент инерции несравнимо меньше остальных главных центральных моментов инерции системы. Таким образом, получается, что для усиления взаимодействия с полями планеты требуется увеличить протяженность космической системы. Но увеличение протяженности приводит к резонансной неустойчивости системы. Здесь, возможно, работает одна из основных тенденций в динамике систем: стремление систем избежать трения [4, 27], т.е., в данном случае, избежать перераспределения энергии в другие ее формы. Возможно, что любая реализация ЭДКТС потребует активного управления ее движением.

Получение экспериментальных данных функционирования ЭДКТС связано со сложной научно-технической задачей создания экспериментальных систем. Экспериментальная ЭДКТС должна обеспечивать достаточно продолжительный устойчивый режим движения и проведение измерений как в полностью пассивном режиме (без дополнительных контакторов), так и при работе полых катодов. Для этого требуется в рамках существующих моделей определить закономерности движения ЭДКТС с учетом взаимного влияния динамических и электродинамических характеристик, а также определить влияние параметров системы и внешней среды на функционирование ЭДКТС. Представляется необходимым и более тщательный анализ моделей взаимодействия ЭДКТС с внешней средой, поскольку «вторичные» факторы, такие как, например, фотоэлектронные токи, могут искажать результаты измерений. Это особенно важно для малых экспериментальных ЭДКТС, для которых ЭДС индукции невелика.

1. Белецкий В. В. Динамика космических тросовых систем / В. В. Белецкий, Е. М. Левин. — М.: Наука, 1990. — 329 с.
2. Lorenzini E. C. Tethers in Space Handbook / E. C. Lorenzini, M. L. Cosmo. — 3rd edition. — Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997. — 241 p.
3. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions / E. M. Levin. — San Diego: American Astronautical Society, 2007. — 453 p.
4. Alpatov A. P. Dynamics of Tethered Space Systems / A. P. Alpatov, V. V. Beletsky, V. I. Dranovskii, V. S. Khoroshilov, A. V. Pirozhenko, H. Troger, A. E. Zakrzhevskii. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. — 223 p.
5. Carroll J. A. Space Transport Development Using Orbital Debris / J. A. Carroll // Final Report on NIAC Phase I, Research Grant No. 07600-087. — 2002. — P. 1 – 43.
6. Ahedo E. Analysis of Bare-Tether Systems for Deorbiting Low-Earth-Orbit Satellites / E. Ahedo, J. R. Sanmartin // Journal of Spacecraft and Rockets. — 2002. — V. 39, N 2. — P. 198 – 205.

7. *Tortora P.* Small Mission Design for Testing In-Orbit an Electrodynamic Tether Deorbiting System / *P. Tortora, L. Somenzi, L. Iess., R. Licata* // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2006. – V. 43, N 4. – P. 883 – 892
8. *Sanjurjo Rivo M.* Self Balanced Bare Electrodynamic Tethers. Space Debris Mitigation and other Applications : tesis doctoral N 1839 / *Manuel Sanjurjo Rivo*. — Madrid, 2009. — 215 с.
9. *Sanmartin J. R.* Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tethers / *J. R. Sanmartin., M. Martinez-Sanchez, E. Ahedo* // Journal of Propulsion and Power. – 1993. – V. 9, N 3. – P. 353 – 360.
10. *Hoyt R. P.* The Terminator Tape™: A Cost-Effective De-Orbit Module for End-of-Life Disposal of LEO Satellites / *R. P. Hoyt, I. M. Barnes, N. R. Voronka, J. T. Slostad* // Space 2009 Conference, Sept 2009. — 2009. — AIAA Paper 2009-6733. — P. 1 – 9.
11. *Estes R. D.* Bare Tethers for Electrodynamic Spacecraft Propulsion / *R. D. Estes, E. C. Lorenzini, J. Sanmartin, J. Pelaez, M. Martinez-Sanchez, C. L. Johnson, I. E. Vas* // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2000. – V. 37. – P. 205 – 211.
12. *Johnson L.* Electrodynamic Tethers for Reboost of the International Space Station and Spacecraft Propulsion / *L. Johnson, J. Carroll, R. D. Estes, E. Lorenzini, B. Gilchrist, M. Martinez-Sanchez, J. Sanmartin, I. Vas* // AIAA Paper 96-4250. – 1996. – 7 p.
13. *Аллатов А. П.* Электродинамическая тросовая система увода космических аппаратов с орбит : исследование на наноспутниках / *А. П. Аллатов, Ф. Н. Гребенкин, А. В. Мищенко, А. В. Пироженко* // Вісник Дніпропетровського університету. — 2006. — № 2/2. — С. 5 – 10.
14. *Samanta Roy R. I.* System Analysis of Electrodynamic Tethers / *R. I. Samanta Roy, D. E. Hastings, E. Ahedo* // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1992. – V. 29, N 3. – P. 415 – 424.
15. *McCoy J. E.* Plasma Motor-Generator (PMG) Flight Experiment Results / *J. E. McCoy et al.* // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10 – 14 April, 1995. – Washington, 1995. – P. 57 – 85.
16. *Маслова А. И.* Пространственное движение КА относительно центра масс с учетом переменности аэродинамического момента / *А. И. Маслова, А. В. Пироженко* // Техническая механика. – 2010. – №. 3. – С. 51 – 62.
17. Space Debris Removal Homepage // <http://www.star-tech-inc.com/id121.html>
18. International Reference Ionosphere [Электронный ресурс] — Режим доступа : <http://iri.gsfc.nasa.gov/>
19. ГОСТ 25645.146–89. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. — Действующий от 1989-11-21. — Москва : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. — 825 с.
20. *Fujii H. A.* Sounding rocket experiment of bare electrodynamic tether system / *H. A. Fujii & others* // Journal of Acta Astronautica. – 2009. – V. 64, N 2–3. – P. 313 – 324.
21. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества / *И. Е. Тамм*. — М. : Наука, 1989. — С. 137 – 151.
22. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике под ред. *Г. Н. Дубошина*. — М. : Наука, 1976. — 862 с.
23. *Брюнелли Б. Е.* Физика ионосферы / *Б. Е. Брюнелли А. А. Намгаладзе*. — М. : Наука, 1988. — 527 с.
24. *Бойд Р.* Зонды Ленгмюра на космическом корабле / *Р. Бойд* // Методы исследования плазмы. — М. : Мир, 1971. — С. 506-538.
25. *Козлов О. В.* Электрический зонд в плазме. / *О. В. Козлов*. — М. : Атомиздат, 1969.
26. *Estes R. D.* Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime / *R. D. Estes, J. R. Sanmartin* // Journal of Physics of Plasmas. – 2000. – V. 7, N 10. – P. 4320 – 4325.
27. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов / *И. Пригожин*. — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 160 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 21.03.11,
в окончательном варианте 30.05.11