

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЛИНЫ ТРОСА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: cvetochekam@rambler.ru*

Мета статті – аналіз залежності довжини троса малої експериментальної електродинамічної космічної тросової системи (ЕДКТС) без додаткових контакторів, що необхідна для функціонування системи в анодно-катодному режимі, від параметрів троса, кінцевих тіл і параметрів орбіти. Показано, що для кожного випадку руху ЕДКТС існує певна критична довжина троса, менше якої в ЕДКТС не слід очікувати сталого режиму взаємодії з плазмою, що забезпечує практично вимірний струм. Для роботи ЕДКТС в анодно-катодному режимі її довжина повинна бути більше критичної.

Отримані в роботі результати можуть бути використані при виборі параметрів троса для конкретного експерименту, тобто експерименту з заданими кінцевими тілами, параметрами орбітального руху і вимірювальними системами.

Цель статьи – анализ зависимости длины троса малой экспериментальной электродинамической космической тросовой системы (ЭДКТС) без дополнительных контакторов, необходимой для функционирования системы в анодно-катодном режиме, от параметров троса, концевых тел и параметров орбиты. Показано, что для каждого случая движения ЭДКТС существует определенная критическая длина троса, меньше которой в ЭДКТС не следует ожидать установившегося режима взаимодействия с плазмой, обеспечивающего практически измеримый ток. Для работы ЭДКТС в анодно-катодном режиме ее длина должна быть больше критической.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при выборе параметров троса для конкретного эксперимента, т. е. эксперимента с заданными концевыми телами, параметрами орбитального движения и измерительными системами.

The aim of this paper is to analyze the dependence of the tether length of a small experimental electrodynamic space tether system (EDSTS) without additional contactors required for the EDSTS operation in the anode-cathode mode on the tether and end body parameters and the orbital parameters. It is shown that for each case of EDSTS motion there exists a critical tether length such that for shorter lengths one should not expect any steady-state mode of interaction with the plasma which would provide a practically measurable current. For an EDSTS to operate in the anode-cathode mode, its length must be greater than the critical one.

The results of this study may be used in choosing the tether parameters for a specific experiment, i. e. an experiment with given end bodies, orbital parameters, and measuring systems.

Ключевые слова: *малая электродинамическая космическая тросовая система, система увода космических аппаратов, геометрические параметры, критическая длина.*

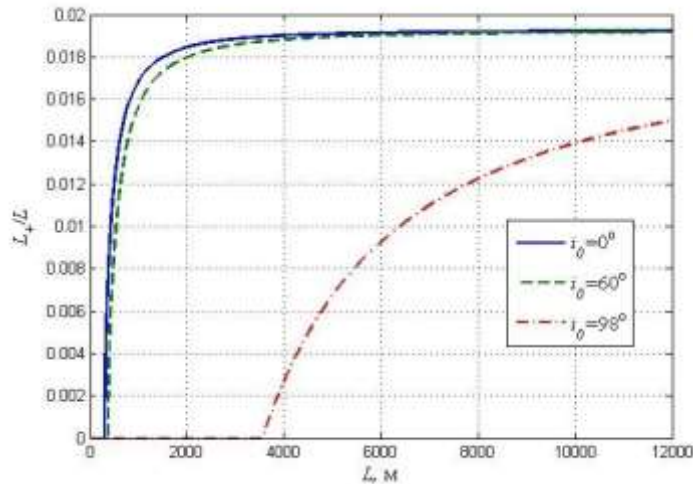
Введение. Электродинамические космические тросовые системы (ЭДКТС) являются перспективным направлением для транспортных операций на низких околоземных орбитах, в частности для увода объектов космического мусора. Развитие этого направления связано с необходимостью проведения ряда натурных экспериментов. Особенности космических тросовых систем и значительные риски при их развертывании делают целесообразным использование для экспериментальных исследований малых ЭДКТС.

Одним из важных вопросов создания малых ЭДКТС для проведения космических экспериментов является вопрос выбора геометрических параметров системы.

Целью статьи является анализ зависимости длины троса малої експериментальної електродинамічної космічної тросової системи (ЕДКТС) без додаткових контакторів, необхідної для функціонування системи в анодно-катодному режимі, від параметрів троса, кінцевих тіл і параметрів орбіти.

Рассматривается ЭДКТС двух тел, соединенных токопроводящим тросом. В качестве троса рассматривается либо цилиндрическая нить, либо лента, материал системы – алюминий. Система движется по почти круговой низкой околоземной орбите. Концентрации заряженных частиц в ионосфере принимаются равными средней для данной высоты концентрации при средней солнечной активности.

Основной особенностью взаимодействия ЭДКТС без дополнительных контакторов с ионосферной плазмой является ее сравнительно короткая положительно заряженная (анодная) часть. Расчеты показывают, что при произвольных длинах троса положительно заряженная часть не превосходит 2 % всей длины (рис. 1).



Параметры орбиты: высота орбиты ЭДКТС $H = 650$ км;
 i_0 – наклонение орбиты.
 Параметры ЭДКТС: радиус троса $r_t = 3$ мм;
 радиусы концевых тел $R_0 = 10$ см

Рис. 1 – Зависимость отношения длины анодной части L_+ ко всей длине троса L от длины троса ЭДКТС для орбит с различными наклонениями i_0

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. Поток ионов на трос является направленным, а электронов – ненаправленным, электроны со всех сторон попадают на трос, т. е. площадь их собирания при длине L составляет $2\pi r_t L$, для ионов – $2r_t L$. Таким образом, хаотический ток ионов (плотность тока) в $\sqrt{\pi m_i/m_e}$ (m_e , m_i – массы электронов и ионов соответственно) раз меньше электронного тока.

Длина положительной части ЭДКТС зависит от многих факторов, в том числе от параметров троса (его длины и площади поперечного сечения), высоты и наклонения орбиты к магнитному экватору. Если зафиксировать все параметры ЭДКТС, кроме длины троса, то при длине меньше некоторой критической величины в системе нет положительно заряженной части и потенциал всех ее частей относительно окружающей плазмы отрицателен. В этом случае вся система собирает ионный ток и ток в системе будет очень

мал. Представляется, что экспериментальные исследования таких систем не имеют особого смысла. При длине троса больше этой критической величины существует как анодная, так и катодная части троса. Назовем такой режим функционирования ЭДКТС анодно-катодным.

Расчеты тока в ЭДКТС проводятся на основе моделей собирания тока из плазмы в режиме орбитально-ограниченного тока: для троса – для цилиндрических зондов [1] – [3], для концевых тел – для больших сферических зондов при низких и высоких электрических потенциалах [3], [4].

Уравнения для орбитально-ограниченного тока справедливы для троса, радиус поперечного сечения r_t которого меньше или равен дебаевскому радиусу (радиусу экранирования электрона λ_D) $r_t \leq \lambda_D$ [5], или для тонкой ленты, толщина которой $h_t \ll \lambda_D$ и ширина $d_t \leq 4\lambda_D$. Для низких околоземных орбит (НЗО) дебаевский радиус находится в диапазоне (3–10) мм. Беря во внимание это ограничение, проведем исследование зависимости критической длины троса от параметров троса, концевых тел и параметров орбиты для малых ЭДКТС двух видов: с цилиндрическим тросом и с лентой.

В расчетах будем использовать данные средней концентрации заряженных частиц ионосферы, полученные при использовании модели ионосферы IRI-2012 [6] (рис. 2).

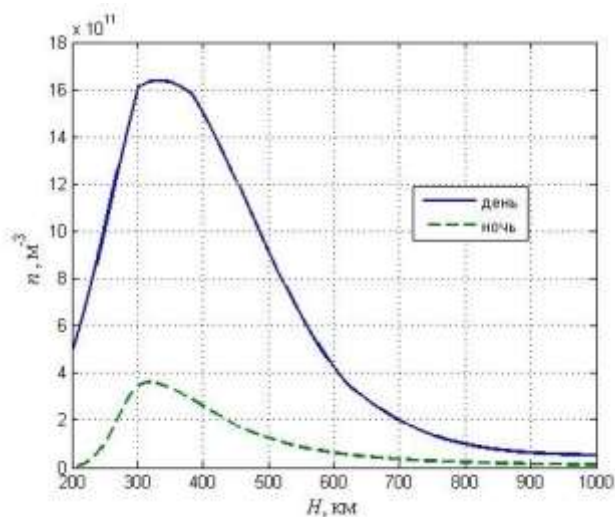
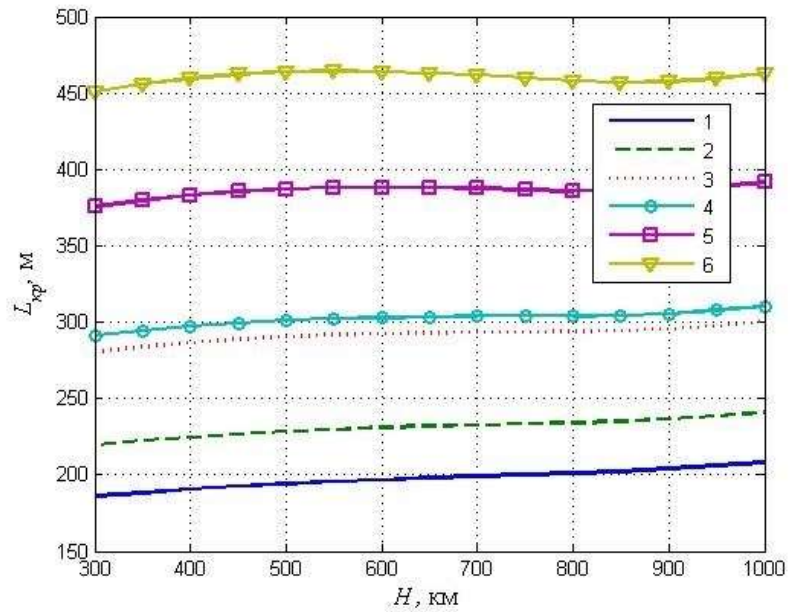


Рис. 2 – Зависимость средней концентрации (n) электронов и ионов ионосферы от высоты (H) для ночной и дневной части орбиты при средней солнечной активности

Сначала проведем анализ зависимости критической длины ЭДКТС для цилиндрического троса и ленты от высоты орбиты при ориентации ЭДКТС вдоль радиуса-вектора, соединяющего центр Земли с центром масс ЭДКТС (рис. 3).

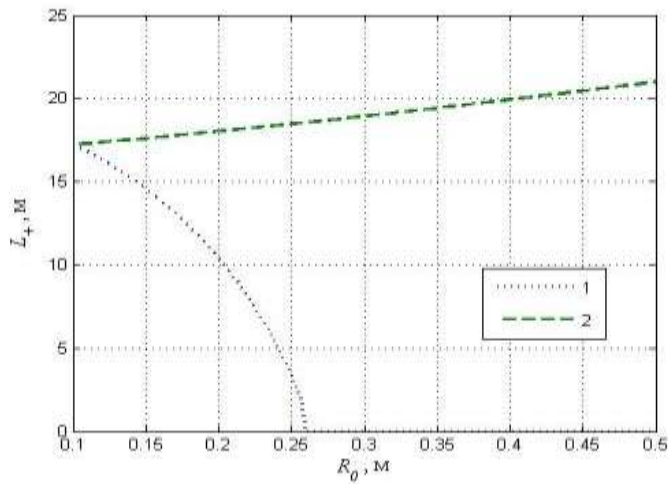


- 1 – лента шириной $d_t = 2,0$ см; 2 – лента шириной $d_t = 1,5$ см;
 3 – лента шириной $d_t = 1,0$ см; 4 – цилиндрический трос радиуса $r_t = 3,0$ мм;
 5 – цилиндрический трос радиуса $r_t = 2,0$ мм;
 6 – цилиндрический трос радиуса $r_t = 1,5$ мм

Рис. 3 – Зависимость критической длины $L_{кр}$ ЭДКТС от высоты H для дневной части экваториальной орбиты для цилиндрического троса и ленты

Из графиков на рис. 3 следует, что критическая длина троса существенно зависит от периметра поперечного сечения троса (p) и незначительно изменяется с высотой орбиты (H). Расчеты показывают, что критическая длина обратно пропорциональна периметру поперечного сечения в степени $0,53 \div 0,64$.

Длина положительно заряженной части ЭДКТС также существенно зависит от размеров концевых тел системы. При увеличении радиуса положительно заряженного спутника, собирающего электроны из ионосферы, длина положительно заряженной части троса будет убывать (рис. 4). Для ЭДКТС с тросом ($r_t = 3,0$ мм; $L=1000$ м) при радиусе спутника около 0,25 м длина положительно заряженной части троса обращается в ноль. Для ЭДКТС с лентой ($d_t = 2,0$ см; $L=1000$ м) этот радиус спутника составляет около 0,35 м. При этом расчетный электронный ток, собранный спутником, равен ионному току, собранному тросом и отрицательно заряженным спутником.



Параметры орбиты: $H = 650$ км; $i_0 = 0^\circ$

Параметры ЭДКТС: $r_t = 3,0$ мм; $L = 1000$ м

- 1 – зависимость от радиуса положительно заряженного спутника;
- 2 – зависимость от радиуса отрицательно заряженного спутника

Рис. 4 – Зависимость длины положительно заряженной части троса от радиуса концевых тел

Отметим также, что при увеличении радиуса отрицательно заряженного спутника, собирающего ионы, длина анодной части троса ЭДКТС, напротив, будет возрастать (рис. 4, график 2).

Зависимости критической длины ЭДКТС от высоты орбиты для ее дневной и ночной частей представлена на рис. 5 – 6.

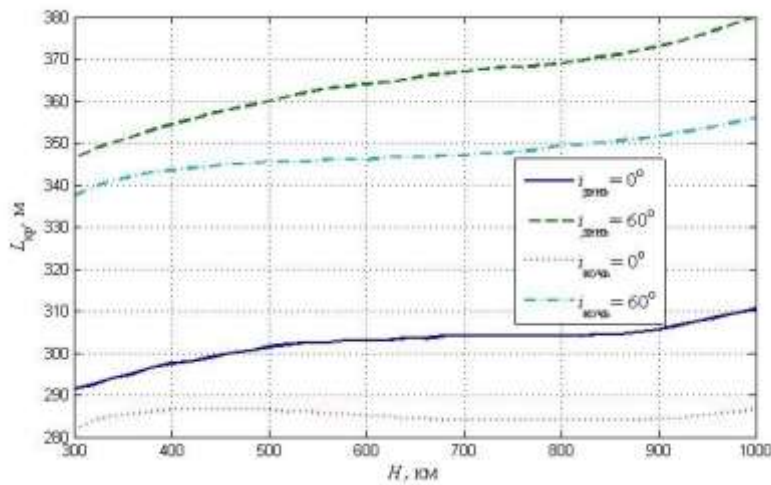


Рис. 5 – Зависимость критической длины троса ЭДКТС от высоты орбиты для экваториальных и среднеширотных орбит

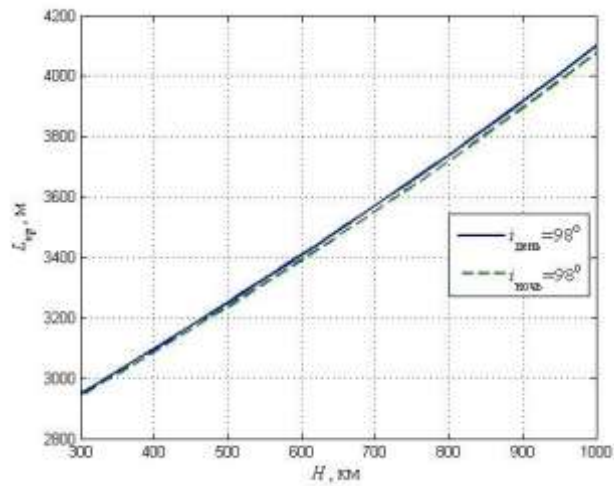
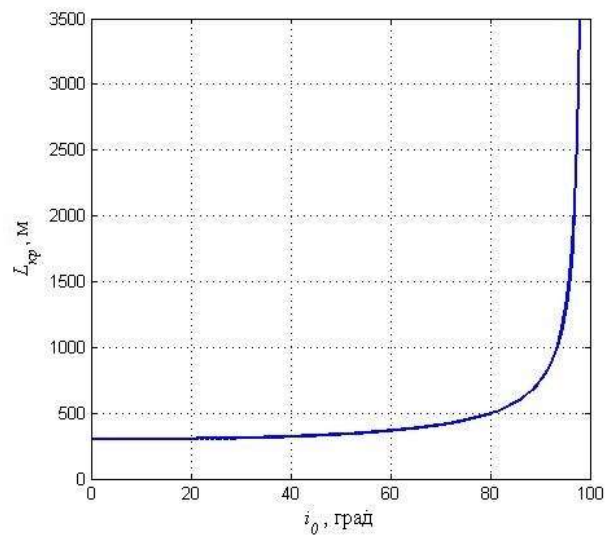


Рис. 6 – Зависимость критической длины троса ЭДКТС от высоты орбиты для приполярных орбит

Как можно увидеть из рис. 5 – 6, критические длины троса на дневной части орбиты превосходят длины троса на ночной части орбиты на (7 – 15) % при изменении концентрации более чем в 4 раза.

Критическая длина ЭДКТС существенно зависит от наклона орбиты (рис. 5 – 7). Для экваториальных и среднеширотных орбит критическая длина может быть менее 400 м. Для приполярных орбит (рис. 7), критическая длина становится очень большой.



Параметры орбиты: $H = 650$ км;
Параметры ЭДКТС: $r_t = 3$ мм

Рис. 7 – Зависимость критической длины троса ЭДКТС от наклона орбиты

Это объясняется уменьшением на этих орбитах составляющей вектора магнитной индукции, перпендикулярной линии троса, наличие которой приводит к появлению ЭДС в системе. Следовательно, применение радиальных

ЭДКТС без дополнительных контакторов на приполярных орбитах весьма затруднительно.

Для исследования зависимости критической длины троса от углов ориентации ЭДКТС относительно орбитальной системы координат (ОСК) введем связанную систему координат (ССК) $o\xi\eta\zeta$ с началом в центре масс космического аппарата: ось $o\xi$ направлена вдоль ЭДКТС от тела А к телу В, ось $o\eta$ – в плоскости орбиты, в ту же сторону, что и OY_o орбитальной системы координат (ОСК). Ориентация ССК относительно ОСК описывается углами θ и φ , где θ – угол разворота ЭДКТС в плоскости орбиты, φ – угол отклонения линии троса перпендикулярно плоскости орбиты. Расчеты будем проводить для малых колебаний системы (до 15 градусов).

На рис. 8 представлена зависимость критической длины ЭДКТС от угла (θ) разворота ЭДКТС в плоскости орбиты (при $\varphi = 0^\circ$) для орбит с различными наклонениями и высотой 650 км.

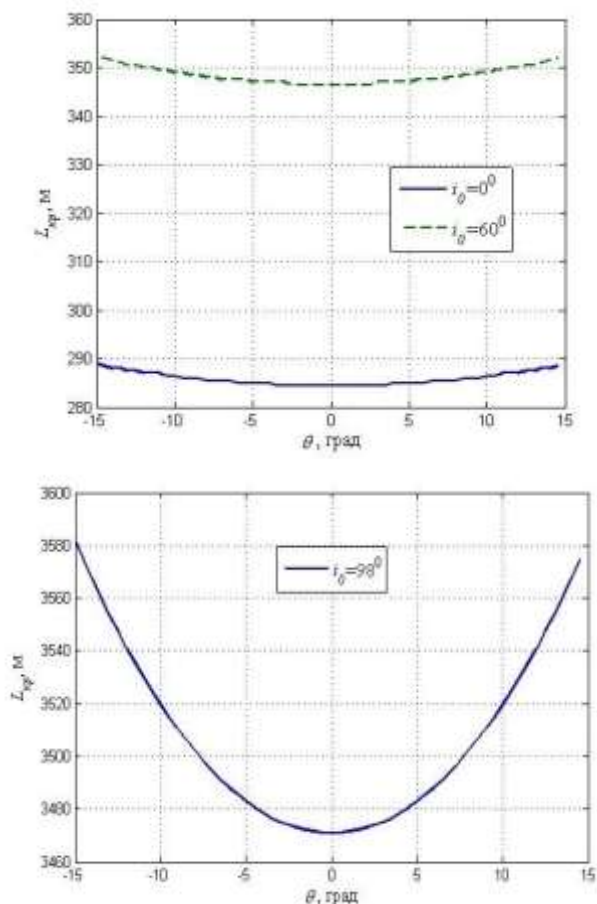


Рис. 8 – Зависимость критической длины ЭДКТС от углов разворота в плоскости орбиты

Из графиков, изображенных на рис. 8, следует, что при отклонении ЭДКТС на малые углы от местной вертикали в плоскости орбиты критическая длина возрастает на (2 – 3) %.

На рис. 9 представлены зависимости критической длины ЭДКТС от угла φ отклонения ЭДКТС от плоскости орбиты (при $\theta = 0^\circ$).

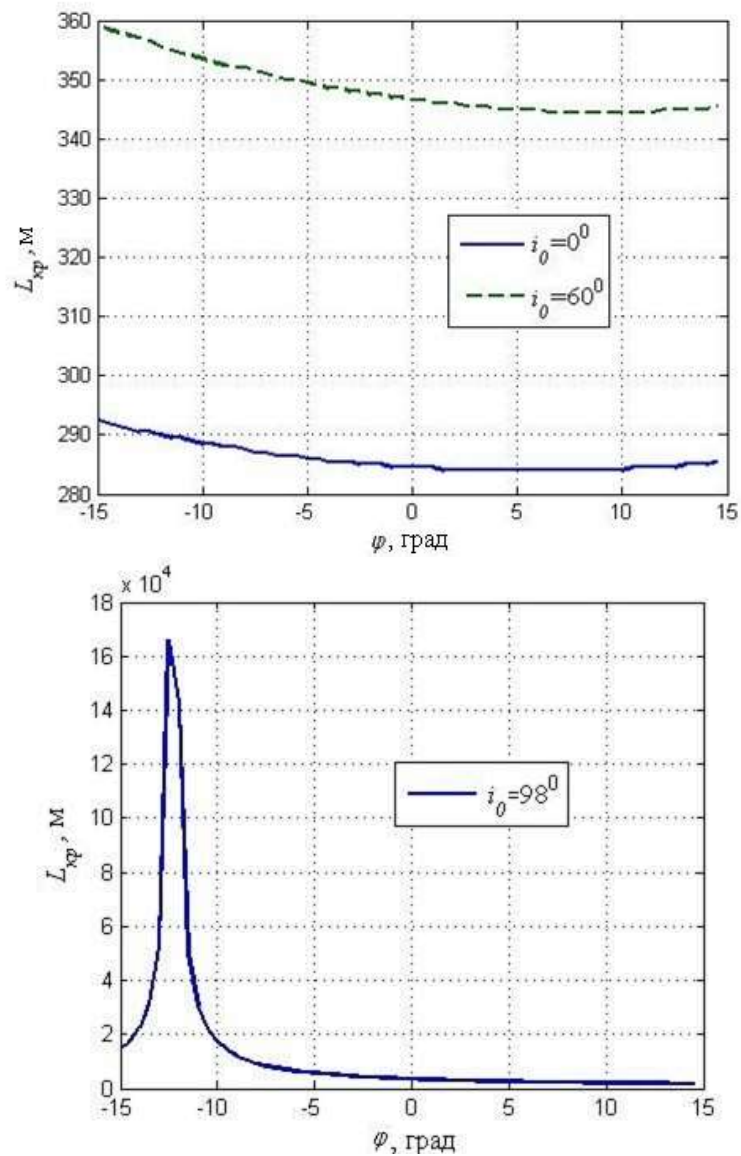


Рис. 9 – Зависимость критической длины от углов отклонения ЭДКТС от плоскости орбиты

Из графиков, представленных на рис. 9, можно сделать вывод, что малые отклонения ЭДКТС от плоскости орбиты в одну сторону вызывают сокращение критической длины системы, в другую – существенное ее увеличение, особенно для приполярных орбит.

Выводы. Проведен анализ зависимости длины троса ЭДКТС без дополнительных контакторов, необходимой для функционирования системы в анодно-катодном режиме, от параметров троса, концевых тел и параметров орбиты. Показано, что для каждого случая движения ЭДКТС существует определенная критическая длина троса, меньше которой в ЭДКТС не следует ожидать установившегося режима взаимодействия с плазмой, обеспечивающего практически измеримый ток. Для работы ЭДКТС в анодно-катодном режиме ее длина должна быть больше критической.

Расчеты показывают, что критическая длина обратно пропорциональна периметру поперечного сечения и существенно зависит от радиуса концевых тел. При увеличении радиуса положительно заряженного спутника длина анодной части троса будет убывать, при увеличении радиуса отрицательно заряженного спутника, наоборот, будет возрастать.

Показано, что критическая длина ЭДКТС существенно зависит от наклона орбиты. Для малых экспериментальных ЭДКТС, находящихся на экваториальных и среднеширотных орбитах с радиусами концевых тел 10 см длина троса должна быть не менее 400 м. Использование же ЭДКТС на приполярных орбитах представляется малоэффективным.

1. *Sanmartin J. R., Estes R. D.* Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime. *Journal of Physics of Plasmas*. 2000. V. 7, N 10. P. 4320–4325.
2. *Бойд Р.* Зонды Ленгмюра на космическом корабле. Методы исследования плазмы. М.: Мир. 1971. С. 506–538.
3. *Козлов О. В.* Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 290 с.
4. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C.* Spherical Collectors Versus Bare Tethers for Drag, Thrust, and Power Generation. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10 – 13 July 2005, Tucson, Arizona. P. 1–7.
5. *Sanmartin J. R., Lorenzini E. C., Martinez-Sanchez M.* Electrodynamic Tether Applications and Constraints. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2010. V. 47, N 3. P. 142–156.
6. International Reference Ionosphere - IRI-2012 // SPDF Goddard Space Flight Center [Интернет-портал]. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html

Получено 04.12.2017,
в окончательном варианте