

## Анализ работоспособности электродинамических тросов с автономной генерацией электронов

© П.М. Бечаснов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложен новый тип электродинамического троса — электродинамический трос с автономной генерацией зарядов за счет ионизации бортового запаса рабочего тела. Рассмотрены свойства данного троса. Показано, что такой трос может развивать большую силу тяги и иметь меньшую длину, чем трос со сбором зарядов из внешней плазмы. Расход рабочего тела у троса с автономной генерацией зарядов меньше, чем у электрореактивных двигателей, при тех же затратах энергии. Оценены удельный импульс, затраты энергии и потребная длина такого троса. Рассмотрены возможные области его применения. Сформулированы направления дальнейших исследований концепции данного троса.*

**Ключевые слова:** электродинамический трос, ионизация рабочего тела, увеличение тяги, защита от космических излучений, низкоорбитальные маневры, межпланетные перелеты

**Введение.** Современные электроракетные двигатели во многом достигли пределов эффективности, определяемых принципом ракетной тяги. Таких ограничений лишены электродинамические тросы (ЭДТ), являющиеся фактически реактивными двигателями. Электродинамический трос — длинный проводник, который используют для получения электрической энергии или создания тяги за счет взаимодействия протекающего в нем тока с внешним электромагнитным полем. Сила Лоренца действует в магнитном поле на движущиеся в нем заряженные частицы в направлении, перпендикулярном как направлению движения частицы, так и вектору магнитного поля (рис. 1).

Принцип работы ЭДТ был впервые предложен в 1965 г. авторами работы [1]. Речь шла о выработке электрического тока в длинном вертикальном проводнике, находящемся на экваториальной орбите, за счет того, что с одного его конца электроны будут удаляться, а на другой — притягиваться из окружающей плазмы, так как в результате удаления электронов трос получит положительный заряд. В зависимости от направления движения электронов сила Лоренца, действующая на них, будет ускорять или тормозить ЭДТ.

При движении ЭДТ перпендикулярно магнитному полю в нем возникает электродвижущая сила (ЭДС) электромагнитной индукции, вызывающая напряжение между концами троса. Если трос работает в режиме генератора, в результате действия ЭДС образуется ток,

который создает тормозящую силу, и тогда ЭДТ уменьшает кинетическую энергию космического аппарата (КА), преобразуя ее в электрическую. Данный режим может использоваться для сведения КА с орбиты. Для работы троса в режиме двигателя в ЭДТ должен быть создан потенциал, обратный этой ЭДС и превышающий ее. Тогда ток потечет в обратном направлении, возникнет ускоряющая сила и увеличится кинетическая энергия КА. Этот потенциал создается удалением из ЭДТ электронов за счет энергии от какого-либо источника, которая расходуется, помимо прочего, на увеличение кинетической энергии КА.

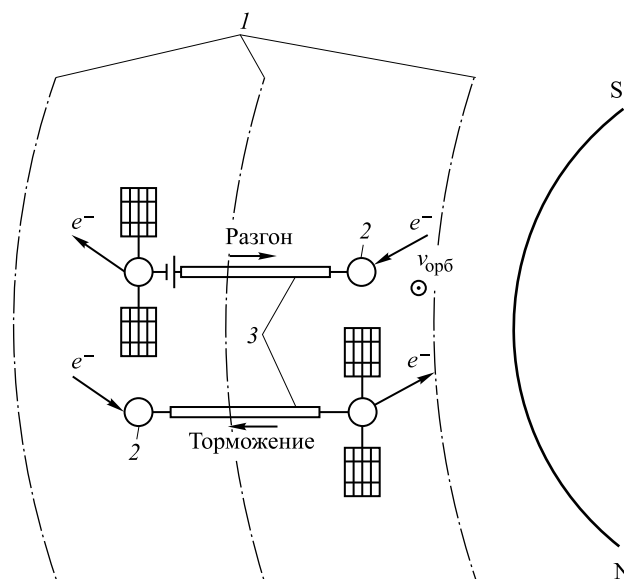


Рис. 1. Принцип работы электродинамического троса:

1 — линии магнитного поля; 2 — анод; 3 — изоляция;  
 $v_{орб}$  — орбитальная скорость троса

Для того чтобы образовался ток, необходимо иметь источник и сток электронов, расположенные на концах ЭДТ. В разное время в качестве стока электронов рассматривались фотоэммитеры, термоионные, автоэлектронные эмиттеры и эмиттеры с полым катодом. Наиболее целесообразным оказалось использование полых катодов, взаимодействующих с внешней плазмой [2]. Плотность тока в них может достигать  $10 \dots 100 \text{ A/cm}^2$  [3], что на порядки превышает показатели других эмиттеров и обеспечивает необходимые для работы ЭДТ значения [4].

Сложнее создать источник электронов. В доступных работах предлагается собирать их из окружающей ЭДТ плазмы, для чего необходимы либо длинный оголенный трос [5], либо наличие высокого напряжения на концевом коллекторе [6]. Поэтому применяются

тросы большой длины при относительно малой силе тока, что ограничивает силу тяги. Так, в эксперименте NASA TSS-1R использовали трос длиной 20 км с максимальной силой тока 1 А [7].

Наиболее эффективно собирают электроны плазменные контакторы — те же полые катоды, но с обратным напряжением на сетке [8]. Они выбрасывают в окружающую плазму ионы, которые притягивают электроны плазмы и нейтрализуются этими электронами. При работе контактора расход массы по сравнению с использованием только ионизации рабочего тела уменьшается более чем на порядок за счет притягиваемых внешних электронов. Поэтому возможность построения ЭДТ на полностью автономном источнике зарядов, функционирующем за счет ионизации бортового запаса рабочего тела, не рассматривалась в доступных работах.

ЭДТ с автономным источником зарядов (ЭДТ-А) будет обладать рядом преимуществ. К ним относятся:

- возможность работы на любых орбитах, в том числе вне ионосферы и в межпланетном пространстве;
- независимость от перепадов плотности зарядов в ионосфере;
- отсутствие ограничения силы тяги, вызванного ограничением доступности электронов.

*Цель настоящей работы* — оценка свойств и возможности практического использования электродинамического троса с автономным источником зарядов.

Для выполнения оценки необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить зоны работы ЭДТ-А исходя из существования магнитного поля требуемой интенсивности;
- 2) оценить потребные длину троса, затраты энергии и рабочего тела с учетом изменения структуры возвратных токов по сравнению с обычным ЭДТ;
- 3) выбрать способы стабилизации ЭДТ-А с полученной длиной троса и его ориентации в пространстве для формирования силы тяги в нужном направлении;
- 4) сформулировать рекомендации относительно областей применения ЭДТ-А и его дальнейших исследований.

**Зоны работы ЭДТ-А.** Индукция магнитного поля Земли снижается с высотой орбиты медленнее, чем концентрация ионов в ионосфере. Если максимальная концентрация электронов в слое F2 (высота 220...280 км) зимним днем достигает  $25 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , то их минимальная концентрация в этих же условиях составит только  $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , а ночью снизится до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку сила тока ЭДТ линейно зависит от концентрации внешней плазмы, его тяга будет изменяться в десятки раз в зависимости от времени суток.

На рабочей для многих спутников высоте 600 км минимальная концентрация плазмы составляет  $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , что уменьшает тягу

ЭДТ уже на два порядка, делая его практически неприменимым в данных условиях. При этом индукция магнитного поля Земли снижается в том же соотношении и составляет на околоземных средних орбитах  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл, а на геостационарной орбите (ГСО) только  $10^{-7}$  Тл [8]. Следовательно, при обеспечении необходимой силы тока в тросе ЭДТ-А можно применять на большей высоте, чем ЭДТ.

При длине троса в десятки километров ЭДТ-А также может работать в межпланетном пространстве как магнитный парус. Магнитный парус предложен Р. Зубриным в 1988 г. В нем статическое магнитное поле используется для отражения заряженных частиц солнечного ветра [9]. Передаваемый ими импульс ускоряет КА, на котором установлен такой парус. Магнитный парус состоит из сверхпроводящего кольца радиусом в несколько десятков километров, в котором однократно создается кольцевой ток, впоследствии постоянно поддерживающий магнитное поле.

ЭДТ-А как прямой проводник с током будет иметь больший радиус магнитосферы, на котором индукция его магнитного поля позволяет отражать частицы солнечного ветра, так как у прямого проводника она снижается медленнее, чем у магнитного диполя. Расчетная оценка показывает, что для типовых межпланетных перелетов масса ЭДТ-А вместе с источником энергии и запасом рабочего тела может быть в два-три раза легче, чем масса кольцевого паруса Зубрина. Однако ввиду сложности создания обеих конструкций на современном техническом уровне это его свойство вряд ли найдет применение в ближайшее время.

**Стабилизация ЭДТ-А.** Большая по сравнению с ЭДТ сила тока, возможная в ЭДТ-А, позволит уменьшить длину троса. При той же индукции магнитного поля та же тяга возникнет при увеличении силы тока, пропорциональном уменьшению длины троса. Благодаря уменьшению длины троса снизится наводимая в нем ЭДС, что позволит отказаться от сложного высоковольтного оборудования ЭДТ. А если масса троса не изменяется и площадь его сечения возрастает, не изменяются и омические потери. Тогда трос становится более коротким и жестким, что дает возможность стабилизировать ЭДТ с использованием жесткого троса-мачты без критичных потерь удельного импульса (УИ).

Существует три схемы стабилизации ЭДТ. Первая, предложенная еще в 1965 г., — стабилизация вертикального троса гравитационным градиентом [1]. Недостатки этой схемы:

- 1) требуется наличие значительных масс на обоих концах троса;
- 2) если сила тяги превышает  $\sim 10\%$  натяжения троса, он закручивается и возникают колебания концевых масс [10];
- 3) силы создаются только в плоскости экваториальных орбит и вне плоскости полярных, возникают возмущения неэкваториальных орбит [11].

Эта схема не позволяет использовать преимущества ЭДТ-А в величине создаваемой тяги, поэтому не годится для его стабилизации.

Вторая схема — стабилизация троса вращением вокруг центральной оси в плоскости, перпендикулярной местному направлению линий магнитного поля [12]. Вращение позволяет увеличить натяжение троса, а также исключить ненужные компоненты тяги благодаря подаче тока в трос только тогда, когда он занимает нужное положение. В таблице указано, какое направление троса для изменения какого элемента орбиты необходимо.

**Направления электродинамического троса, необходимые для коррекции элементов орбиты**

Элемент орбиты	Направление троса
Наклонение	Вертикальное около экватора
Долгота восходящего узла	По вектору скорости у полюса
Высота	Перпендикулярно плоскости орбиты около полюса или вертикально при малом наклонении
Фаза	Изменение высоты с баллистической паузой
Эксцентриситет и апоцентры	Разгон и торможение в пределах одного витка или по вектору скорости у экватора

Схема стабилизации с вращающимся тросом также имеет недостатки. Во-первых, ЭДТ создает тягу только тогда, когда трос во время вращения оказывается приблизительно в нужном направлении. Это означает, что среднее интегральное ускорение КА в требуемом направлении снижается в несколько раз, что увеличивает продолжительность маневров. Во-вторых, тяга ЭДТ в этой схеме также ограничивается накоплением момента количества движения, что приводит к повышению скорости его вращения и росту центробежных ускорений. Разгрузка возможна только при изменении направления магнитного поля, т. е. два раза за виток.

Указанных недостатков лишена третья схема стабилизации ЭДТ, предложенная в работе [13]. Вместо длинного гибкого троса, развешивание которого, как показали орбитальные эксперименты, весьма проблематично, используется относительно короткая (менее 300 м) жесткая электродинамическая мачта. Для развешивания мачты применяются пружинные рычаги, а ее поворот выполняется вместе с КА. В ЭДТ при реализуемом напряжении на такой мачте сила тока крайне мала, в результате чего расчетная тяга измеряется микроニュотонами.

Таким образом, для ЭДТ-А должны применяться либо стабилизация троса вращением, либо короткий жесткий трос. Первая из этих двух схем может обеспечить большую длину троса, что дает преимущества при работе в слабом магнитном поле. Однако, как пока-

зывают предварительные прочностные расчеты, собственное ускорение ЭДТ-А (отношение тяги к массе ЭДТ-А с учетом массы источника энергии) здесь составляет не более  $10^{-3}$  м/с<sup>2</sup> для низкой околоземной орбиты. Применение короткого жесткого троса (вторая схема) увеличивает возможность управления вектором тяги, обеспечивает более высокую тягу на единицу массы и облегчает использование сверхпроводников в качестве материала для троса. Собственное ускорение ЭДТ-А в этом случае может составить 0,01 м/с<sup>2</sup> при использовании алюминиевого троса и до 0,02 м/с<sup>2</sup> — при использовании сверхпроводящего троса. Выбор схемы определяется тем, какую задачу решают с помощью ЭДТ-А.

**Оценка параметров ЭДТ-А.** Прежде всего необходимо получить зависимости, связывающие расход рабочего тела, затраты энергии и тягу. По определению силы Ампера, тяга ЭДТ

$$F = IBL \sin \alpha,$$

где  $I$  — сила тока в тросе, А;  $B$  — индукция магнитного поля, Тл;  $L$  — длина троса, м;  $\alpha$  — угол между тросом и линиями магнитного поля, град.

Заряд  $Q$ , пройдя через трос, создаст полный импульс тяги

$$P_{\Pi} = Ft = ItBL \sin \alpha = QBL \sin \alpha.$$

При этом из вещества при его ионизации можно получить заряд

$$Q = \frac{nm e N_A}{M},$$

где  $n$  — степень ионизации рабочего тела;  $m$  — масса рабочего тела, кг;  $e$  — элементарный заряд (заряд электрона),  $e = 1,60217662 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $N_A$  — число Авогадро,  $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;  $M$  — молярная масса рабочего тела, г/моль.

Приравняв эти заряды, можно найти выражение для удельного импульса:

$$I_1 = \frac{ne N_A B L \sin \alpha}{M}.$$

Таким образом, для повышения УИ наиболее выгодно применение в ЭДТ-А рабочих тел с минимальной молярной массой: водорода, гелия, лития, воды или неона. При этом УИ будет уменьшаться пропорционально молярной массе рабочего тела.

Расчетный случай, соответствующий вертикальному расположению ЭДТ-А на экваториальной орбите высотой 300 км с тросом длиной 300 м при использовании в качестве рабочего тела водорода с полной ионизацией дает значение УИ, равное 897,2 км/с. Это в двес-

ти раз выше, чем у жидкостного ракетного двигателя SSME системы Space Shuttle, и в пятьдесят раз выше, чем у электроракетных двигателей производства ОКБ «Факел».

Применение воды в качестве рабочего тела при условии ее однократной ионизации приведет к снижению УИ до 49,8 км/с. Сохранить величину УИ можно, повысив кратность ионизации, однако при этом возрастают затраты энергии. Хотя даже этот удельный импульс превосходит удельный импульс плазменных двигателей компании Momentus, также работающих на воде, очевидно, что при дальнейшем росте молярной массы рабочего тела преимущества ЭДТ-А перед существующими двигателями уже невелики. При увеличении расстояния от Земли индукция магнитного поля снижается, что приводит и к снижению расчетного УИ. Такой же ЭДТ-А, размещенный на геостационарной орбите, при работе на водороде будет иметь удельный импульс всего 2,9 км/с, а при работе на воде — 160 м/с.

Удлинение троса позволит пропорционально повысить удельный импульс ЭДТ-А, однако при этом возрастет масса троса и усложнится управление им. Поэтому заданному полному импульсу будет соответствовать некоторая оптимальная длина троса. Для того чтобы УИ ЭДТ-А на воде при однократной ионизации сравнялся с УИ ЭДТ-А на водороде, необходимо удлинить трос в 18 раз. Это потребует перехода от жесткой проводящей мачты к стабилизации вращением, так как длина троса возрастет до 5,4 км.

Для того чтобы УИ ЭДТ-А на геостационарной орбите сравнялся с УИ ЭДТ-А на низкой околоземной орбите, необходимо увеличить длину троса до 60 км, что технически нерационально. Однако для получения на ГСО удельного импульса на уровне 50 км/с потребуются трос гораздо меньшей длины — около 3 км. Ввиду низкой индукции магнитного поля на ГСО в ЭДТ-А должны использовать большую силу тока, поэтому такой трос следует выполнять из сверхпроводящих материалов.

Оценим затраты энергии ЭДТ-А. Основные составляющие данных затрат:

- энергия разложения молекул рабочего тела;
- энергия ионизации атомов рабочего тела с необходимой кратностью;
- энергия выхода электрона из материала катода;
- энергия преодоления наводимой внешним полем ЭДС — полезная работа;
- потери различной природы в плазменных устройствах.

*Пример оценки затрат энергии ЭДТ-А.* Возьмем в качестве примера рассмотренный выше ЭДТ-А, вертикально расположенный на экваториальной орбите высотой 300 км; длина троса 300 м, в качестве

рабочего тела используется водород, при его полной ионизации УИ равен 897,2 км/с.

Энергия ионизации атома водорода  $E_{и} = 13,6$  эВ, энергия диссоциации молекулы водорода  $E_{д} = 4,52$  эВ (2,26 эВ в расчете на один электрон), а энергия выхода электрона в полом катоде из оксида бария  $E_{в} = 1,6$  эВ.

Наведенная ЭДС

$$E_{д} = vBL\sin\alpha,$$

где  $v$  — скорость орбитального движения ЭДТ-А, м/с.

В данном примере  $E_{д} = 72,5$  В (72,5 эВ на один электрон).

Потери в плазменных устройствах ЭДТ-А нельзя корректно учесть без их проектирования. Оценить потери можно, поскольку данные устройства фактически являются элементами обычных электроракетных двигателей — рабочей камерой и катодом-нейтрализатором. Известно, что у стационарных плазменных двигателей производства ОКБ «Факел» коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta = 26...60$  % (значение  $\eta$  зависит от рабочей мощности двигателя). Аналогичные величины будут приняты далее для оценки КПД плазменных устройств ЭДТ-А с учетом всех составляющих затрат энергии, т. е.

$$E = \frac{E_{и} + E_{д} + E_{в} + E_{л}}{\eta}.$$

В данном примере затраты энергии на прохождение одного электрона по тракту ЭДТ-А составят 184,4 эВ. Тогда «энергетическая цена» тяги

$$E_1 = \frac{E}{BL\sin\alpha}.$$

В примере  $E_1 = 19,9$  кВт/Н.

Это значение практически в 20 раз меньше, чем у идеального ракетного двигателя, обладающего таким же УИ. В случае ЭДТ-А рабочее тело не вызывает непосредственной реакции, а используется для создания силы, соединяющей двигатель и Землю через ее магнитное поле. Реактивной массой, как и в случае наземных двигателей, является масса планеты.

Данное значение будет уменьшаться с ростом длины троса, экспоненциально приближаясь к предельному значению

$$E_{1пр} = \frac{v}{\eta}.$$

Для рассматриваемого примера этот предел составит приблизительно 15,6 кВт/Н. Таким образом, дальнейший рост длины троса уже мало скажется на «энергетической цене» тяги ЭДТ-А.



При длине троса, соответствующей технически рациональным значениям УИ и «цены» тяги, энергия ионизации рабочего тела составляет сравнительно небольшую долю общих затрат энергии. Поэтому использование вместо водорода лития с его энергией первой ионизации 5,39 эВ не дает значительных энергетических выгод, тем более что потенциал второй ионизации (энергия отделения второго электрона) равен уже 75,62 эВ.

У воды энергия ионизации возрастает значительно медленнее. Энергия первой ионизации 12,62 эВ, второй, третьей и четвертой — 14, 16 и 18 эВ соответственно. Затем происходит диссоциация молекулы, и энергия дальнейшей ионизации резко возрастает. Молярная масса воды как рабочего тела на один отделяемый до роста энергии ионизации электрон составляет всего 4,5 г/моль на электрон, что лучше гелия (энергия первой ионизации 24,6 эВ) по «цене» тяги, а также лучше лития по УИ. Таким образом, в качестве рабочих тел ЭДТ-А можно рекомендовать воду и водород, при возникновении проблем со стойкостью плазменных устройств при работе на них — гелий и неон.

Принципиальным отличием ЭДТ-А от ЭДТ является характер внешнего тока. В ЭДТ внешний ток в основном возникает за счет движения электростатически притягиваемых частиц внешней плазмы вдоль линий магнитного поля [1] (рис. 2, а). Такой ток не образует неуравновешенных составляющих магнитного поля, способных изменить индукцию внешнего поля на тросе и, соответственно, тягу. Внешним током ЭДТ-А является преимущественно замыкающий ток, состоящий из выбрасываемых его плазменными устройствами частиц. Они движутся под действием электростатических сил, а также магнитных полей — как внешнего поля, так и собственных, создаваемых током в тросе и самими частицами при движении (рис. 2, б).

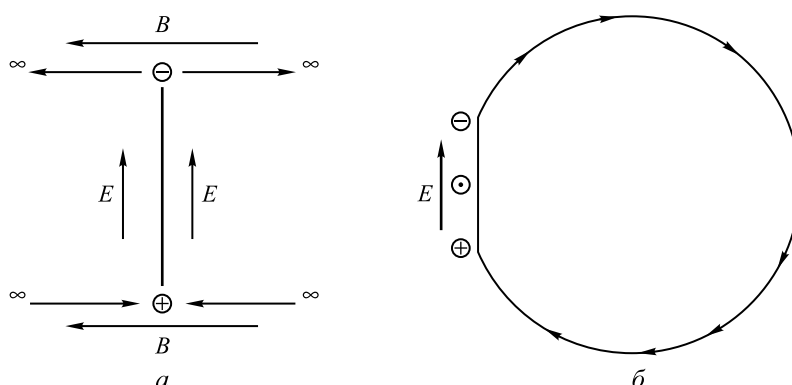
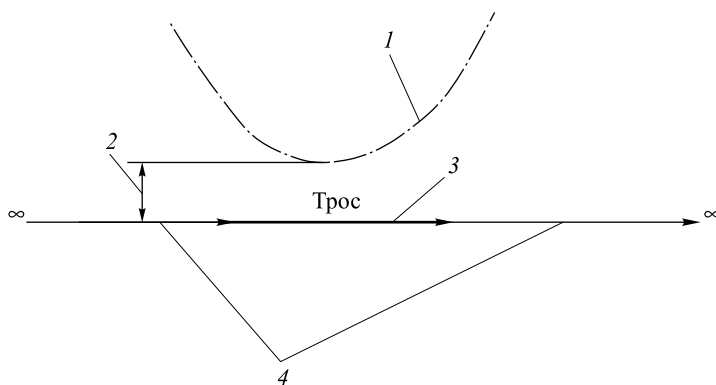


Рис. 2. Движение электронов в окрестностях ЭДТ (а) и ЭДТ-А (б)

Результирующая картина рабочего процесса крайне сложна и не дает возможности с большой точностью определить динамику частиц без применения численного моделирования. Однако можно оценить влияние замыкающего тока на тягу ЭДТ-А исходя из следующих соображений.

Поскольку при одной и той же энергии у выбрасываемых ЭДТ-А электронов скорость значительно больше, чем у ионов, а увеличить их выходную энергию технически проще по сравнению с ионами, электроны составят подавляющую часть замыкающего тока. Можно показать, что для параллельных электронных токов с типовыми для ЭДТ-А значениями линейной плотности и энергии электронов силы кулоновского отталкивания будут на несколько порядков больше притягивающих магнитных сил. Поэтому замыкающий ток ЭДТ-А под действием электростатических сил образует кольцо, радиус которого значительно превышает характерные длины троса. Соответственно, влияние замыкающего тока на тягу ЭДТ-А будет пренебрежимо мало, а магнитное поле в окрестностях троса будет приближаться к полю бесконечно длинного прямого проводника.

**Защита от заряженных частиц.** Благодаря описанной структуре магнитного поля ЭДТ-А может обеспечить защиту от заряженных частиц, составляющих значительную долю космической радиации. Поскольку ток в ЭДТ-А закольцован замыкающим током, попадание внешних заряженных частиц в прилегающую к тросу область со скоростью, направленной вдоль троса, практически исключено. Частицы, подлетающие в поперечном направлении, отражаются магнитным полем, которое создается текущим в тросе током (рис. 3).



**Рис. 3.** Защита области вокруг ЭДТ-А от заряженных частиц:

- 1 — траектория электрона; 2 — защищаемая зона (2 м);
- 3 — внутренний ток ЭДТ-А; 4 — внешний ток ЭДТ-А

Численное моделирование, проведенное в рамках допущения о структуре магнитного поля ЭДТ-А (см. разд. «Оценка параметров

ЭДТ-А»), показало, что подлетающие электроны с энергией 1 МэВ не попадают в центральную область радиусом 2 м вокруг троса при силе тока в нем 1 кА. В соответствии со всеми вышеприведенными формулами выработка такого тока, если он ориентирован вдоль линий внешнего магнитного поля, требует электрической мощности 30 кВт и расхода водорода 10 мг/с. Увеличение силы рабочего тока ЭДТ-А повышает энергию отражаемых частиц.

В отличие от магнитного диполя, в ЭДТ-А ток троса может обтекать защищаемый объект, если создать сплошную проводящую трубу вокруг этого объекта. Внутри такой трубы магнитное поле будет отсутствовать, что улучшит эксплуатационные свойства данной защиты, особенно при ее использовании на пилотируемых кораблях.

**Рекомендации относительно области применения ЭДТ-А и дальнейших исследований.** ЭДТ-А имеет высокий удельный импульс, большую пассивную массу и большие размеры, «энергетическая цена» тяги у ЭДТ-А приблизительно соответствует таковой у современных электрореактивных двигателей. Поэтому его целесообразно задействовать на крупногабаритных космических объектах с высокой энерговооруженностью. К ним относятся многоразовые межорбитальные буксиры и долговременные орбитальные станции. Применение ЭДТ-А на межорбитальных буксирах позволит им совершать быстрые межорбитальные перелеты с большим бюджетом характеристической скорости. Такой буксир, например, сможет транспортировать грузы с орбиты Международной космической станции до солнечно-синхронной орбиты и обратно без дозаправки.

Долговременной орбитальной станции ЭДТ-А может дать защиту от радиации, создаваемой низкоэнергетичными заряженными космическими частицами, а также способность самостоятельно маневрировать и поддерживать орбиту. ЭДТ-А может оказаться ключевой технологией при создании высокоширотной низкоорбитальной и геостационарной пилотируемых станций, обеспечивая защиту от электронов, составляющих основную часть дозовой нагрузки таких проектов.

Применение ЭДТ-А на малых КА ограничивается схемой со стабилизацией вращением. Высокий удельный импульс ЭДТ-А позволит им длительно поддерживать высоту орбиты даже на малых высотах или осуществлять большое количество маневров перенацеливания.

Если будут созданы достаточно мощные плазменные устройства для ЭДТ-А, это позволит применять его для торможения баллистических объектов (спутников и ракет-носителей). В этом случае ЭДТ-А может развить большую тормозную тягу, используя в качестве источника энергии (в том числе для ионизации рабочего тела) собственную кинетическую энергию тормозимого объекта. Такое торможение обеспечит мягкую посадку на Землю верхних ступеней многоразовых ракет-носителей.

Однако чтобы возникла тяга, нужно достаточно сильное магнитное поле. Это требование ограничивает зону применения ЭДТ-А низкими и средними околоземными орбитами, а также окрестностями планет-гигантов. Расширение этой зоны требует создания крупногабаритных космических конструкций из сверхпроводящих материалов. Наличие такой технологии, а также мощных плазменных устройств позволит использовать ЭДТ-А для выведения грузов на геостационарную орбиту, для межпланетных перелетов, радиационной защиты космических и напланетных объектов (т. е. объектов, находящихся не на Земле, а на других планетах).

Дальнейшие исследования ЭДТ-А следует сосредоточить на комплексном моделировании его рабочих процессов, в том числе проходящих в плазменных устройствах. Для уточнения влияния замыкающего тока на тягу и магнитное поле ЭДТ-А необходимо провести численное моделирование динамики внешней плазмы в трехмерной нестационарной постановке. После этого станут возможными экспериментальные исследования на макетных образцах и уточнение эффективности ЭДТ-А в конкретных прикладных задачах.

**Заключение.** В работе рассмотрен принцип построения электродинамического троса нового типа — электродинамического троса с автономной генерацией электронов, определены его свойства и возможности практического использования. Основными зонами его работы как двигателя являются околоземное космическое пространство и орбиты планет-гигантов, где существует значимое внешнее магнитное поле. Как средство защиты от заряженных частиц ЭДТ-А не имеет таких ограничений по области применения.

Потребная длина троса или затраты энергии и рабочего тела, необходимые для возникновения заданной тяги, увеличиваются пропорционально уменьшению индукции внешнего поля. Поэтому на высоте 300 км трос длиной 300 м обеспечивает удельный импульс 897,2 км/с при работе на водороде с «энергетической ценой» тяги около 20 кВт/Н, а на геостационарной орбите ЭДТ-А с такими же показателями должен иметь длину 10 км. При этом ЭДТ-А может иметь большую тягу и меньшую длину, чем трос со сбором зарядов из внешней плазмы, а расход рабочего тела останется меньшим, чем у электрореактивных двигателей при тех же затратах энергии.

При использовании ЭДТ-А как средства защиты от заряженных частиц электроны с энергией 1 МэВ не попадут в центральную область радиусом 2 м вокруг троса при силе тока в нем 1 кА.

ЭДТ-А должен стабилизироваться либо вращением, либо собственной жесткостью при малой длине троса. Стабилизация по первой схеме возможна в слабом внешнем магнитном поле; она способна обеспечить собственное ускорение ЭДТ-А порядка  $10^{-3}$  м/с<sup>2</sup> на

низкой околоземной орбите. Стабилизация по второй схеме повышает управляемость вектора тяги, обеспечивает собственное ускорение ЭДТ-А порядка  $0,01 \dots 0,02 \text{ м/с}^2$ , но имеет приемлемые показатели только в сильных внешних магнитных полях.

ЭДТ-А может применяться:

- 1) на многооразовых межорбитальных буксирах, совершающих быстрые перелеты с большим бюджетом характеристической скорости;
- 2) на спутниках, длительно поддерживающих орбиту на малых высотах или осуществляющих большое количество маневров перенацеливания;
- 3) в космических аппаратах, в том числе пилотируемых, которые требуется защищать от заряженных космических частиц;
- 4) для решения ряда перспективных задач.

Однако для дальнейшего развития концепции ЭДТ-А необходимо детальное моделирование работы его плазменных устройств и динамики внешней плазмы. Только после этого возможны экспериментальные исследования на макетных образцах и уточнение эффективности ЭДТ-А в конкретных прикладных задачах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Drell S.D., Foley H.M., Ruderman M.A. Drag and Propulsion of Large Satellites in the Ionosphere: An Alfvén Propulsion Engine in Space. *Journal of Geophysical Research*, 1965, vol. 70, no. 3, pp. 3131–3145. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JZ070i013p03131>
- [2] Martinez-Sanchez M., Hastings D.E. A Systems Study of a 100kW Tether. *Journal of Astronautical Sciences*, 1987, vol. 35, pp. 75–96.
- [3] Fietzke F., Morgner H., Gunther S. Magnetically enhanced hollow cathode — a new plasma source for high-rate deposition processes. *Plasma processes and polymers*, 2009, vol. 6, pp. S242–S246. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ppap.200930607>
- [4] Samanta Roy R.I., Hastings D.E. Theory of plasma contactor neutral gas emissions for electrodynamic tethers. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1992, vol. 29, no. 3, pp. 405–414. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.26365>
- [5] Bombardelli C., Pelaez J., Sanjurjo M. Asymptotic Solution for the Current Profile of Passive Bare Electrodynamic Tethers. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, vol. 6, no. 6, pp. 1291–1304. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.46808>
- [6] Fuhrhop K.R., West B., Choinière É. Current Collection to Electrodynamic-Tether Systems in Space. *2nd International Energy Conversion Engineering Conference. 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/252621713\\_Current\\_Collection\\_to\\_Electrodynamic-Tether\\_Systems\\_in\\_Space](https://www.researchgate.net/publication/252621713_Current_Collection_to_Electrodynamic-Tether_Systems_in_Space) (дата обращения 20.12.2019). DOI: 10.2514/6.2004-5670
- [7] Stone N., Bonifazi C. The TSS-1R mission: Overview and scientific context. *Geophysical Research Letters*, 1998, vol. 25, no. 4, pp. 409–412. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97GL02980>
- [8] Sanny J., Tapia J.A., Sibeck D.G., Moldwin M.B. Quiet-time variability of the geosynchronous magnetic field and its response to the solar wind. *Journal of Geo-*

- physical Research*, 2002, vol. 107, no. A12 (1443), pp. SMP16-1–SMP16-10. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JA009448>
- [9] Andrews D.G., Zubrin R. *Magnetic Sails and Interstellar Travel*. Paper IAF-88-553, 1988. URL: <http://www.niac.usra.edu/files/library/meetings/fellows/nov99/320Zubrin.pdf> (дата обращения 20.12.2019).
- [10] Белецкий В.В., Левин Е.М. *Динамика космических тросовых систем*. Москва, Наука, 1990, 336 с.
- [11] Bonometti J.A., Sorensen K.F., Jansen R.H. Free Re-boost Electrodynamic Tether on the International Space Station. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10–13 July 2005, Tucson, Arizona*. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2005-4545>
- [12] Pearson J., Levin E., Carroll J.A., Oldson J.C. Orbital Maneuvering with Spinning Electrodynamic Tethers. *2nd International Energy Conversion Engineering Conference. 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island*. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2004-5715>
- [13] Cornogolub A., Underwood C., Voigt P. Rigid-boom Electrodynamic Tethers for Satellite De-orbiting and Propulsion. *Journal of British Interplanetary Society*, 2018, vol. 71, pp. 234–238. URL: <https://www.jbis.org.uk/paper/2018.71.234> (дата обращения 20.12.2019).

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бечаснов П.М. Анализ работоспособности электродинамических тросов с автономной генерацией электронов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2010>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства («Королевские чтения — 2020»), Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 28–31 января 2020 г.*

**Бечаснов Павел Михайлович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [bechasnov@bmstu.ru](mailto:bechasnov@bmstu.ru)

## **Analysis of the performance of electrodynamic tethers with autonomous electron generation**

© P.M. Bechasnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Currently, electric rocket engines have largely reached the efficiency limits determined by the principle of rocket thrust. Electrodynamic tethers, interacting with an external magnetic field and actually being jet engines, are devoid of such restrictions. However, their thrust is limited by the concentration of the external plasma and depends on its fluctuations. The paper is the first to propose to create a current in the tether by propellant ionization, receiving a large thrust from a relatively short tether and a strong magnetic field deflecting charged cosmic particles. The numerical analysis showed that the length of the tether of hundreds of meters near the Earth provides a specific impulse of up to hundreds of kilometers per second and its proper acceleration of the power plant at a level of  $0.01 \text{ m/s}^2$ , as well as protection of the central region of the tether from particles with an energy of more than 1 MeV. This makes it possible to consider it for maneuvering satellites with practically no restrictions on the delta-V, for performing fast high-energy inter-orbital flights and for radiation protection of a high-latitude orbital station. In the future, such a tether can be used for rapid deceleration of orbital objects, launching into geostationary orbit, interplanetary transfers and protection of objects from charged particles. The study describes possible areas of application and directions for further research of the concept of such a tether.*

**Keywords:** *electrodynamic tether, propellant ionization, thrust boost, protection from cosmic radiation, low-orbit maneuvers, interplanetary transfers*

### REFERENCES

- [1] Drell S.D., Foley H.M., Ruderman M.A. Drag and Propulsion of Large Satellites in the Ionosphere: An Alfvén Propulsion Engine in Space. *Journal of Geophysical Research*, 1965, vol. 70, no. 3, pp. 3131–3145. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JZ070i013p03131>
- [2] Martinez-Sanchez M., Hastings D.E. A Systems Study of a 100kW Tether. *Journal of Astronautical Sciences*, 1987, vol. 35, pp. 75–96.
- [3] Fietzke F., Morgner H., Gunther S. Magnetically enhanced hollow cathode — a new plasma source for high-rate deposition processes. *Plasma processes and polymers*, 2009, vol. 6, pp. S242–S246. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ppap.200930607>
- [4] Samanta Roy R.I., Hastings D.E. Theory of plasma contactor neutral gas emissions for electrodynamic tethers. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1992, vol. 29, no. 3, pp. 405–414. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.26365>
- [5] Bombardelli C., Pelaez J., Sanjurjo M. Asymptotic Solution for the Current Profile of Passive Bare Electrodynamic Tethers. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 6, no. 6, 2010, pp. 1291–1304. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.46808>
- [6] Fuhrhop K.R., West B., Choinière É. Current Collection to Electrodynamic-Tether Systems in Space. *2nd International Energy Conversion Engineering Conference, 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/252621713\\_Current\\_Collection\\_to\\_Electrodynamic-Tether\\_Systems\\_in\\_Space](https://www.researchgate.net/publication/252621713_Current_Collection_to_Electrodynamic-Tether_Systems_in_Space) (accessed December 20, 2019). DOI: 10.2514/6.2004-5670

- [7] Stone N., Bonifazi C. The TSS-1R mission: Overview and scientific context. *Geophysical Research Letters*, 1998, vol. 25, no. 4, pp. 409–412. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97GL02980>
- [8] Sanny J., Tapia J.A., Sibeck D.G., Moldwin M.B. Quiet-time variability of the geosynchronous magnetic field and its response to the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. A12 (1443), pp. SMP16-1–SMP16-10. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JA009448>
- [9] Andrews D.G., Zubrin R. *Magnetic Sails and Interstellar Travel*. Paper IAF-88-553, 1988. Available at: <http://www.niac.usra.edu/files/library/meetings/fellows/nov99/320Zubrin.pdf> (accessed December 20, 2019).
- [10] Beletskiy V.V., Levin E.M. *Dinamika kosmicheskikh trosovykh system* [Dynamics of space tether systems]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 336 p.
- [11] Bonometti J.A., Sorensen K.F., Jansen R.H. Free Re-boost Electrodynamic Tether on the International Space Station. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10–13 July 2005, Tucson, Arizona*. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2005-4545>
- [12] Pearson J., Levin E., Carroll J.A., Oldson J.C. Orbital Maneuvering with Spinning Electrodynamic Tethers. *2nd International Energy Conversion Engineering Conference, 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island*. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2004-5715>
- [13] Cornogolub A., Underwood C., Voigt P. Rigid-boom Electrodynamic Tethers for Satellite De-orbiting and Propulsion. *Journal of British interplanetary Society*, 2018, vol. 71, pp. 234–238. Available at: <https://www.jbis.org.uk/paper/2018.71.234> (accessed December 20, 2019).

**Bechasnov P.M.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [bechasnov@bmstu.ru](mailto:bechasnov@bmstu.ru)