

УДК 629.7/621.4

Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве

Баркова М.Е.

Акционерное общество «Российские космические системы», АО «РКС»,

ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия

e-mail: Alttaira@yandex.ru

Аннотация

Разработан проект устройства для утилизации космического мусора (КМ) (далее «СКМ» - сборщик космического мусора). В данной работе проанализирована актуальность создания данного устройства в рамках решения проблемы космического мусора. Предложен способ реализации СКМ с учетом обоснования целесообразности его создания. Проект создан на основе изобретения «Космический аппарат для утилизации космического мусора», закрепленного заявкой на патент [1].

Ключевые слова: космос, космический мусор, техногенный, утилизация, переработка, космический аппарат для сбора космического мусора.

Введение

Проблема космического мусора обрела официальный статус в конце 80-х годов в связи с ростом космической деятельности человечества. Под космическим мусором следует понимать отработавшие ресурс или вышедшие из строя

космические аппараты (КА), ступени ракет-носителей и их обломки. Причем, космический мусор классифицируют на крупные объекты (отработавшие ресурс КА, ступени ракет-носителей), средние объекты (космические зонды, эксплуатационный мусор, отработавшие ресурс микро-, наноКА) и мелкие объекты (обломки КА, ступеней ракет, защитные оболочки) [2]. В связи с активным использованием околоземного космического пространства человечеством, с каждым годом степень техногенного загрязнения неуклонно растет.

Проблема космического мусора затрагивает задачи вывода КА на орбиту и их функционирования, так как столкновение даже с сантиметровым фрагментом может привести к поломке ракеты-носителя или выходу из строя КА [3].

Разрабатываются, как проекты технических устройств, так и способы, позволяющие в некоторой степени устранить данную проблему, например, способ увода КМ с низких орбит [4-9]. Основными недостатками существующих проектов технических устройств и способов увода в орбиты является:

- дробление крупного КМ, что приводит к образованию более опасных для КА мелких обломков [5];

- увод крупного КМ с низких орбит может привести к его неполному сгоранию и падению на Землю [6, 11];

- увод КМ с геостационарной орбиты на орбиту захоронения приводит к засорению высоких орбит, что впоследствии может стать угрозой для функционирования высокоэллиптических и высокоорбитальных КА, а также осуществления запусков межпланетных научно-исследовательских станций [7].

В связи с этим, актуальность проблемы космического мусора в целом обуславливается возрастающим техногенным загрязнением околоземного пространства, что влечет за собой повреждения и выход из строя КА [4,6,9]. В частности, актуальность данной работы состоит в разработке устройства для утилизации космического мусора, основанного на принципе переработки космического мусора в топливо, то есть безотходным способом.

Постановка задачи

Проблема космического мусора носит комплексный характер по следующим причинам:

- космический мусор распределяется неравномерно по высоте в околоземном пространстве;
- космический мусор представляет собой неоднородное скопление вышедших из строя космических аппаратов, ступеней ракет, их обломков и т.д.
- нарастающая тенденция к миниатюризации КА влечет за собой увеличение неуправляемых космических объектов.

Способы решения проблемы космического мусора разделяются на способы увода космического мусора с орбиты для последующего сгорания в атмосфере и способы его уничтожения непосредственно на орбите. Каждый тип способов применим на определенных высотах орбит.

В данной работе предлагается уничтожение космического мусора на непосредственно орбите путем переработки в псевдожидкое топливо, которое

представляет собой смесь газа и мелкодисперсного металлического порошка, которая ведет себя, как кипящая жидкость (псевдожидкость)[12].

СКМ предназначен уничтожения миниатюрных космических аппаратов (мини-, микро-, нано-КА), например, типа CubeSat, крупных обломков КА и ступеней ракет-носителей, размером от 0,5 до 1 м, а также мелких обломков, величиной более 5-10 см, что обуславливается размером звена сети.

Целью настоящей работы является разработка концепции и проектирование космического аппарата СКМ, который позволит переработать космический мусор в топливо. Разработка осуществляется на основе изобретения, закрепленного заявкой на патент[1]. Результатом, соответственно, является проект космического аппарата для утилизации космического мусора.

Концепция КА для утилизации космического мусора

Космический аппарат для утилизации космического мусора включает в себя ловушку для КМ и систему утилизации КМ в псевдожидкое топливо для двигателей КА.

Ловушка для космического мусора состоит из деформируемых куполообразной сети и конусообразной сети, связанных между собой тросами и сходящихся-расходящихся друг относительно друга с возможностью образования замкнутой полости.

На рисунке 1(а) и 1(б) изображен СКМ со сжатыми и сложенными сетями соответственно.

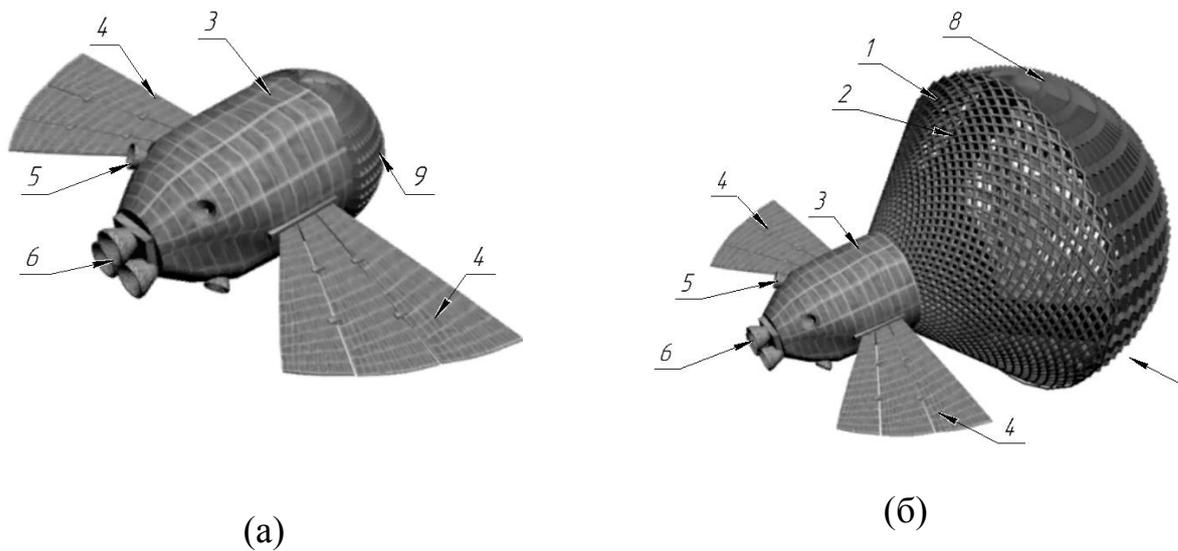


Рис. 1. СКМ[1]

1-конусообразная сеть, 2 - телескопические балки, 3 - корпус СКМ, 4 - веерообразный солнечный коллектор, 5 - двигатели ориентации, 6 - тяговые двигатели, 7 - тросы, 8 - куполообразная сеть, 9 - замкнутая полость

Причем, сети состоят из треугольных звеньев, которые при сжатии сети образуют плотное полотно. Фрагмент развернутой и сложенной сети показан на рисунке 2.

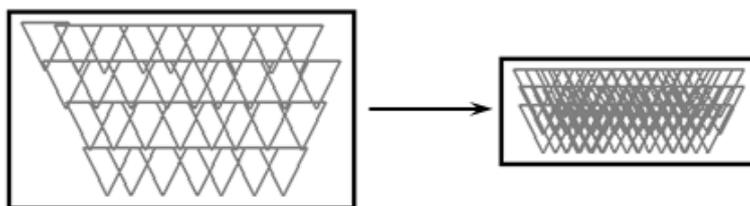


Рис. 2. Строение сети [1]

Подобное строение сетей позволяет избежать запутывания в них космического мусора, а, следовательно, и поломки СКМ.

При обнаружении космического мусора куполообразная сеть автоматически выпускается на тросах из телескопических направляющих балок конусообразной сети, способных затягивать тросы обратно внутрь, как показано на рисунке 3.

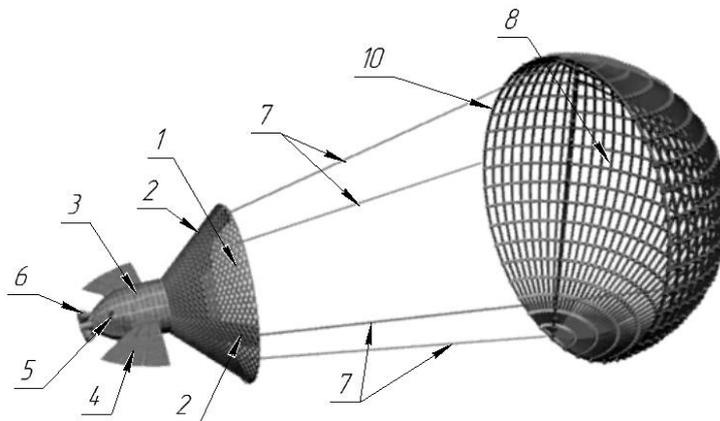


Рис. 3. Ловушка космического мусора [1]

10 - телескопический обруч, состоящий из сегментов

Тросы пронизывают куполообразную сеть насквозь, пересекаясь в её вершине. Соединяясь, также посредством тросов, куполообразная и конусообразная сети, образуют замкнутую полость – мусоросборник, сжимающийся по мере поступления космического мусора на утилизацию.

Система утилизации КМ состоит из следующих компонентов: ловушка, двухвалковый измельчитель, барабанно-шаровая мельница, мембранно-электродный блок, регенератор воды, управляющее устройство, резервуар с топливом и двигателя.

Работа СКМ осуществляется согласно схеме, изображенной на рисунке 4.

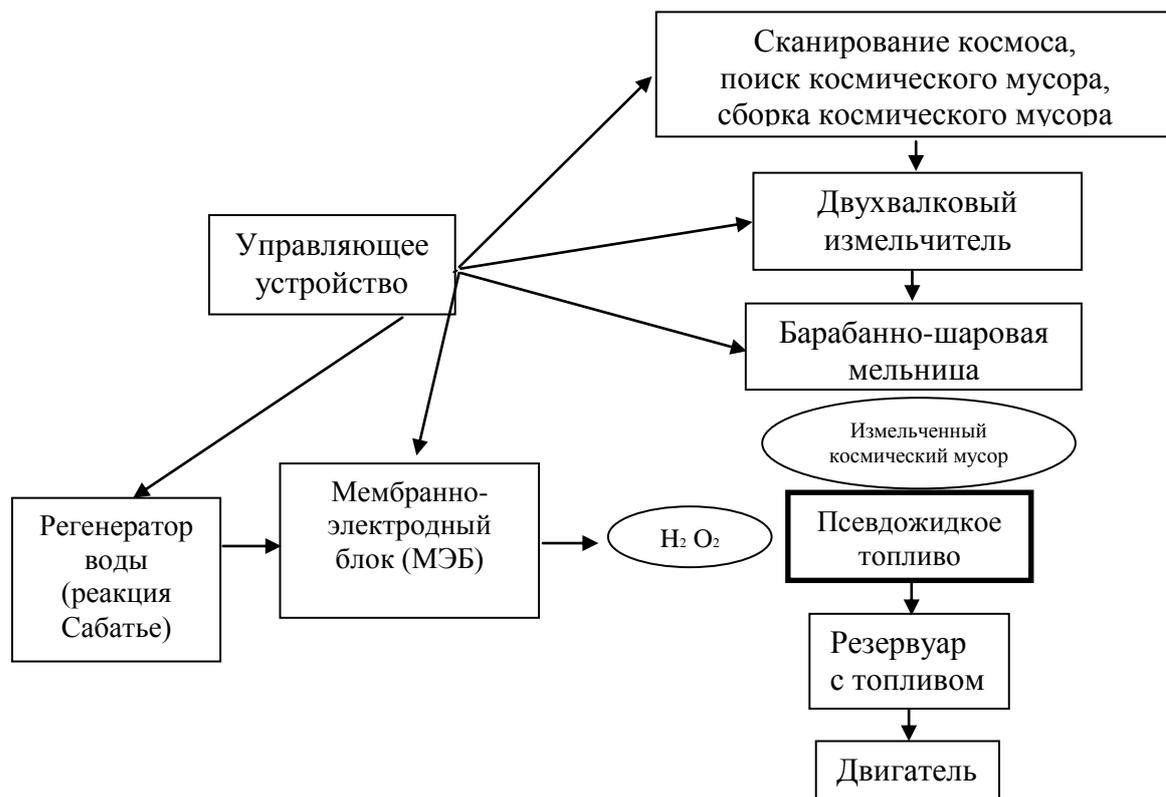


Рис. 4. Схема работы СКМ и его компоненты [1]

Роботизированная система поиска находит местоположение обломков, подлежащих уничтожению.

СКМ разворачивает двигатели, складывает веерообразный солнечный коллектор и продвигается сквозь скопление космического мусора, выпустив ловушку в виде деформируемых сетей на тросовой системе.

СКМ утилизирует космический мусор, перерабатывая его в топливо, использование которого позволяет космическому аппарату постепенно подниматься на более высокие орбиты, вплоть до орбиты захоронения (>40000 км), очищая космическое пространство.

Мусоросборник сжимается, позволяя проталкивать собранный космический мусор в двухвалковый измельчитель, где он, охлаждаясь, дробится. Охлаждение

происходит на случай переработки обломков ступеней ракет-носителей, где еще могли остаться пары топлива, что может спровоцировать взрыв. Данный этап утилизации позволяет разрушить крупные обломки, или цельные малые КА для дальнейшей переработки.

После измельчения, космический мусор, просеивается сквозь решётку и помещается в барабанно-шаровую мельницу для измельчения в мелкодисперсный порошок (10-45 мк) [12].

Порошкообразный космический мусор горит в активной среде кислорода и водорода. Данная смесь газов выбрана исходя из возможности их непрерывного получения из воды путем электролиза мембранно-электродным блоком водяного пара. Причем, непрерывное производство воды обеспечивается регенератором воды посредством реакции гидрирования диоксида углерода по реакции Сабатье: $CO_2 + 4H_2 \xrightarrow{кат.} CH_4 + 2H_2O + 165 \text{ кДж/моль}$ [13]. Катализатором данной реакции может служить, например, оксид палладия PdO или оксид платины PdO_2 .

В результате гидрирования CO_2 по Сабатье, продуктами реакции являются метан CH_4 и два объема воды H_2O . Диоксид углерода получается из побочно-протекающих реакций.

Затем, полученное псевдожидкое топливо отправляется в резервуар с топливом и поставляется в двигатели.

Проектирование СКМ

Проектирование СКМ обеспечивается выполнением ряда основополагающих требований:

- температура возгорания псевдожидкого топлива должна соответствовать максимальной температуре воспламенения материала космического мусора;

- корпус СКМ должен быть выполнен из ударопрочных материалов во избежание его поломки при сборе космического мусора;

- СКМ должен обеспечиваться электроэнергией за счет использования энергии Солнца;

- высота орбиты СКМ обусловлена расположением космического мусора на орбите, местоположение которого определяется прогнозированием его движения;

- высоту орбиты определяет тип ракеты-носителя;

- способ выведения на орбиту должен быть выбран исходя из наименьших экономических затрат.

В основном для изготовления КА используются сталь и сплавы металлов на основе алюминия, титана и магния [14]. Для каждого металла существует своя температура воспламенения, приведенная в таблице 1.

Таблица 1

Температура воспламенения металлов в кислороде [15]

Сплавы металлов на основе	Температура воспламенения, С°
Алюминия(Al)	660
Титана(Ti)	1200
Магния (Mg)	1500
Сталь	1365.5

Согласно информации химического справочника, температура воспламенения сплавов может быть выше, чем температура воспламенения отдельных металлов [15]. Исходя из этого, следует выбирать температуру сжигания псевдожидкого топлива в диапазоне 1500-2500С°, так как существует вероятность переработки частиц сплава с более высокой температурой воспламенения.

Работу систем КА СКМ обеспечивают веерообразный солнечный коллектор и фотоэлектрическая обшивка космического аппарата. Компоненты СКМ обладают определенной мощностью потребления энергии, что необходимо учитывать при разработке проекта.

Мощность СКМ складывается из мощности двухвалкового измельчителя, баранно-шаровой мельницы, тросовой системы, мембранно-электродного блока и регенератора воды [16].

Мощность двухвалкового измельчителя определяется по формуле:

$$N = K \cdot L \cdot D \cdot n, \quad (1)$$

где D – диаметр валка, L – длина валка, n – частоту вращения валков, K – коэффициент захвата для рифленых валков 0.92.

Максимальный размер куска, захватываемого валками, можно определить по формуле

$$d_{\max} = (D \cdot (1 - k) + b) / k, \quad (2)$$

где b – ширина входной щели. Из этой формулы получаем D .

$$D = \frac{d_{\max} \cdot k - b}{1 - k}. \quad (3)$$

Максимальный размер космического мусора, как описано выше, составляет 1м.

Максимально возможную частоту вращения валков определяют по формуле:

$$n_{\max} \leq 102,5 \sqrt{\frac{f}{\rho d D}}, \quad (4)$$

где f – коэффициент трения материала о валок (для прочных материалов $f > 0,3$); d – диаметр куска исходного материала, м; ρ – плотность измельчаемого материала, кг/м³.

Мощность двигателя барабанно-шаровой мельницы определяется из соотношения:

$$N = 1.07 \cdot G \cdot R / \eta, \quad (5)$$

где G – масса мелющих тел, R – внутренний радиус барабана, η – КПД мельницы, равный 0.9-0.94.

Примем, масса мелющих тел определяется по формуле:

$$G = K_3 \cdot V \cdot \gamma, \quad (6)$$

где K_3 – коэффициент загрузки барабана $K_3 = 0.26 - 0.32$, V – геометрический объем барабана по внутреннему диаметру, γ – плотность материала мелющих тел.

Мощность электродвигателя тросовой системы определяется по формуле:

$$N = \frac{F \cdot h \cdot v}{l}, \quad (7)$$

где $N = A/t$, $A = F \cdot h$, $t = l/v$, F – сила натяжения троса, h – номинальная длина троса, l – расстояние до сети в космосе, v – скорость наматывания тросов.

Данные о потребляемой электроэнергии приведены в таблице 2.

Таблица 2

Потребление электроэнергии компонентами СКМ

Компоненты СКМ	Электрическая энергия, Вт	Масса, кг
Двухвалковый измельчитель	3500-4000	1100
Барабанно-шаровая мельница	1500-1700	700
Регенератор воды	800-900	400
Обеспечение работы ловушки космического мусора	700-800	350
Управление	600-700	350
Корпус	-	100
Итого	7100-8100	3000

Из таблицы 2 следует, что для работы СКМ требуется приблизительно 7-8 кВт. Исходя из полученной мощности СКМ, солнечные панели выбраны на основе GaAs, мощностью 250 Вт/м² и удельной массой 0.6 кг/м²[17]. Таким образом, общая площадь солнечных панелей составляет 32 м² и их масса 19.2 кг.

С учетом массы солнечных панелей, общая масса СКМ составляет 3-3.5 тонны.

Однако, остается нерешенной проблема создания корпуса СКМ из ударопрочных материалов. В связи с высоким потреблением энергии СКМ, мощности веерообразного солнечного коллектора недостаточно, и для получения

дополнительной мощности обшивка СКМ снабжается фотоэлементами. При сборе космического мусора, обшивка СКМ, состоящая из фотоэлементов, легко повреждается при столкновении с КМ. Проблему предполагается решить, за счет углубления фотоэлементов в обшивку СКМ с оставлением защитных барьеров между фотоэлементами. Причем, защитные барьеры должны обрамлять каждый фотоэлемент.

Космический мусор обнаруживается на всех типах околоземных орбит. В настоящее время выполняется моделирование движения космического мусора (модель SDPA), ведется его мониторинг и созданы каталоги космического мусора (каталог NORAD (США)) [6,7]. Использование каталогов позволит определить зоны для запуска КА СКМ.

На гистограмме на рисунке 5 изображено количество столкновений в КА с отработавшими свой срок КА типа CubeSat.

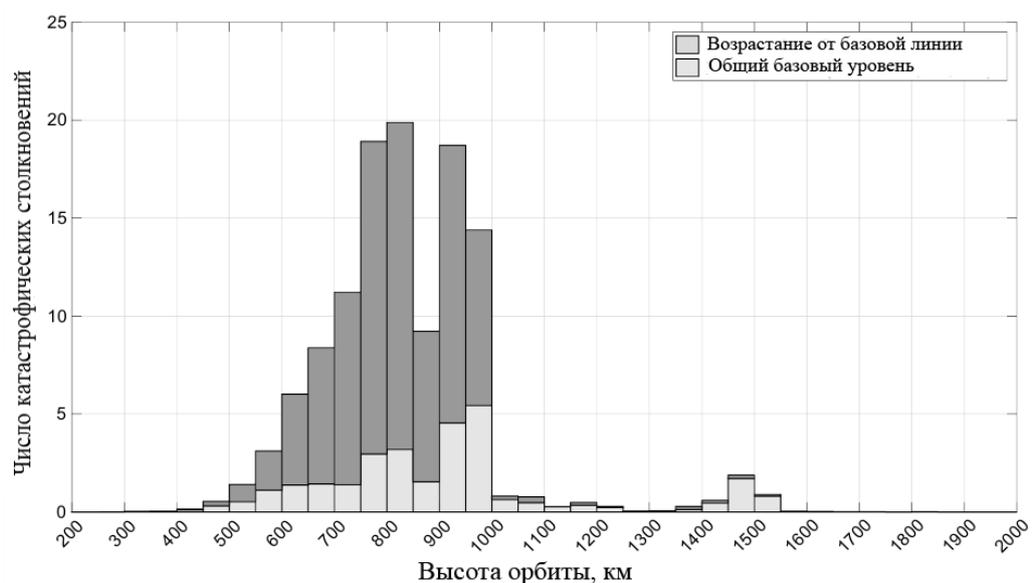


Рис. 5. Прогнозируемое количество столкновений со спутниками типа CubeSat в зависимости от высоты орбиты [18]

Как видно из рисунка 5, наибольшее количество столкновений со спутниками типа CubeSat наблюдается на 500-100 км. Опираясь на проведенные ранее исследования в области решения проблемы космического мусора [2,4-11,18], наибольшее распределение космического мусора наблюдается на орбитах высотой 600-1000 км.

Так как наименее затратным способом выведение космического аппарата на орбиту, является прямой способ, предельная высота для которого составляет 400-500км, что, в конечном счете, и является стартовой высотой работы СКМ.

Так как СКМ, постоянно увеличивает высоту орбиты по мере накопления псевдожидкого топлива, форма орбиты также постоянно изменяется, но при поиске космического мусора орбита близкруговая.

На рисунке 6 изображен график полезной нагрузки ракет-носителей «Стрела», «Союз 2», «Союз 2в», «Протон-М», «Ангара-А5» и «Ангара-А5В*», способных вывести СКМ на орбиту [20].

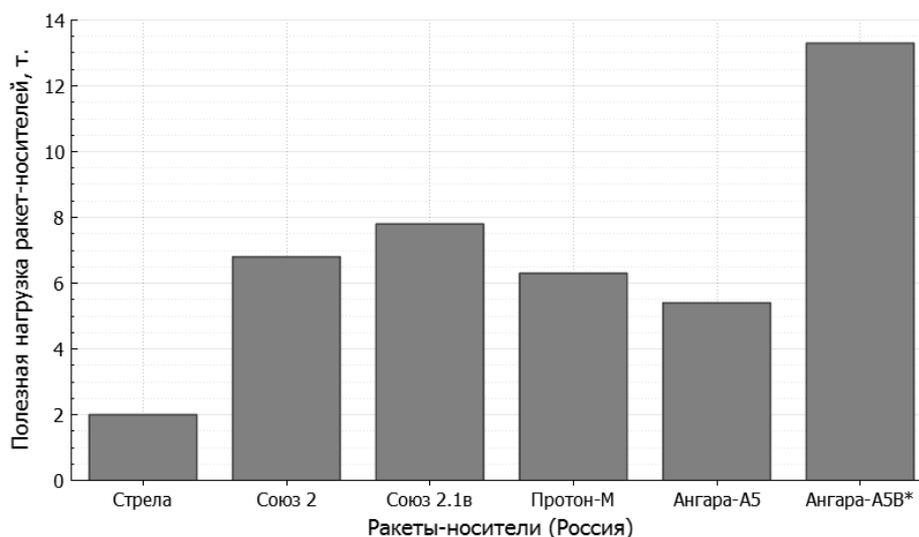


Рис. 6. Полезная нагрузка ракет-носителей

Таким образом, из диаграммы на рисунке 6 видно, что все указанные ракеты-носители, кроме ракеты носителя «Стрела», способны вывести СКМ на низкую орбиту.

Обоснование целесообразности разработки проекта

Проблемой космического мусора занимаются почти все космические державы [2,6,7,11,21,22,23]. Однако, на данный момент нет общепринятой концепции по ее решению. В основном, как уже упоминалось ранее, исследования направлены на разработку способов увода космического мусора с орбиты посредством устройств или контейнеров для его сбора. Реализация данных способов является нецелесообразной с экономической точки зрения, поскольку после уничтожения контейнеров с КМ в атмосфере, придется создавать новые контейнеры, что влечет за собой неоправданные экономические затраты. Реализация способов уничтожения космического мусора на орбите также является нецелесообразным, так как при уничтожении обломки могут повредить действующие КА, а также вследствие создания космического мусора более мелкой фракции.

В данном проекте предлагается снизить экономические затраты на решение проблемы космического мусора за счет следующих особенностей устройства для утилизации космического мусора:

- СКМ не требует создания контейнеров для сбора космического мусора, которые в последствии сжигаются в атмосфере;
- СКМ не образует мелких обломков космического мусора;

- СКМ не требует дополнительного топлива, кроме того, что он сам производит, что не ограничивает его срок службы в этом плане.

- СКМ предназначен для решения проблемы отработавших свой срок малых КА, а также микро- и нано-КА.

Таким образом, данный проект является целесообразным для реализации и последующего применения. В качестве ближайшего аналога выбрана разработка китайских специалистов[19].

Новизна, в сравнении с более ранними исследованиями [2-7], заключается в том, что в рамках данного проекта представлена переработка космического мусора в псевдожидкое топливо [1]. Представлен способ, позволяющий эффективно собирать космический мусор, начиная с низких орбит и, затем, используя полученное топливо, очищать более высокие орбиты. Кроме того, для решения проблемы космического мусора разработано устройство, закрепленное заявкой на получение патента [1]. Резюмируя все вышесказанное, можно считать предлагаемый проект соответствующим критерию, как научной, так и технической новизны исследования.

Выводы

Космический мусор остается серьезной проблемой для вывода космических аппаратов на орбиту и обеспечения их дееспособности. Для решения данной проблемы предлагается создание космического аппарата для утилизации космического мусора (СКМ) посредством его переработки в псевдожидкое топливо, которое представляет собой смесь мелкодисперсного порошка и газовой среды. Система переработки космического мусора СКМ состоит из двухвалкового

измельчителя, барабанно-шаровой мельницы, мембранно-электродного блока и регенератора воды. Мощность СКМ составляет 7-8 кВт. СКМ выводится на орбиту низкую орбиту на стартовую высоту 450 км, где находится скопление космического мусора. Данный проект является целесообразным с экономической точки зрения, поскольку для его функционирования не требуется дополнительного топлива, контейнеров для сбора мусора и не образуются более мелкие обломки.

Перспективу дальнейших разработок в данной области составляет доработка изобретения по следующим пунктам:

- усовершенствование системы переработки космического мусора для уменьшения экономических затрат на проект;
- доработка противоударного корпуса СКМ и его веерообразного солнечного коллектора во избежание поломок во время сбора космического мусора;
- совершенствование проекта СКМ для последующей реализации.

Подана заявка на получение патента Российской Федерации на изобретение «Космический аппарат для утилизации космического мусора» № 2018117527, 11.05.2018.

Библиографический список

1. Богатеев И.Р., Тарлецкий И.С., Баландина Т.Н., Баландин Е.А. Анализ концепций очистки околоземного пространства // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. № 20. С. 14 – 15.
2. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>

3. Трещалин А.П. Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных объектов // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. № 3. С. 122 - 131.
4. Лебедев В.П., Хахинов В.В., Медведев А.В. Результаты наблюдения космического мусора на иркутском радаре некогерентного рассеяния в 2007-2010 гг. // Солнечно-земная физика. 2012. № 20 (133). С. 97 - 102.
5. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>
6. Трушляков В.И., Юткин Е.А. Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 56 - 61.
7. Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // Труды МАИ. 2016. № 9. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
8. Кириллов В.А., Багатеев И.Р., Тарлецкий И.С., Баландина Т.Н., Баландин Е.А. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 2. С. 343 - 351.
9. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. - М.: Изд-во Института космических исследований РАН, 2012. - 192 с.

10. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 327 - 340.
11. Левкина П.А. Физические и орбитальные характеристики объектов космического мусора по данным оптических наблюдений: дис. ... канд. физ.-мат. наук: - М.: Главная астрономическая обсерватория РАН, 2016. - 123 с.
12. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. - М.: Наука, 1972. - 294 с.
13. Голосман Е.З., Ефремов В.Н. Промышленные катализаторы гидрирования оксидов углерода // Катализ в промышленности. 2012. № 5. С. 36 - 55.
14. Никольский В.В. Проектирование космических аппаратов - СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2003. - 80 с.
15. Цап В.Н., Байтова С.Н., Гапеева Т.М. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов в агропромышленном комплексе. – Могилев: МГУП, 2007. - 59 с.
16. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. - Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2004. - 75 с.
17. Обзор рынка солнечных фотоэлементов в России и СНГ. Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. 2008. URL: https://www.marketing-services.ru/imgs/goods/1005/rynok_soln_fotoe'l.pdf

18. Varvin D., Manis A. CubeSat Study Project Review. Orbital Debris Quarterly News // National Aeronautics and Space, 2018, vol. 22, issue 1, available at: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i1.pdf>
19. Lei Lan, Jingyang Li, Hexi Baoyin, Debris Engine. A Potential Thruster for Space Debris Removal, 2015, available at: <https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1511/1511.07246v1.pdf>
20. Ковалев Б.К. Развитие ракетно-космических систем выведения. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 398,
21. ESA's Annual Space Environment Report. Produced with the DISCOS Database, available at https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest
22. Brijesh Patel, Kalpit P. Kaurase, Prabhat Ranjan Mishra. A Critical Review on Safe Disposal Techniques of Space Debris // Journal of Geography, Environment and Earth Science International, 2017, no. 12(3), available at: http://www.journalrepository.org/media/journals/JGEESI_42/2017/Nov/Patel1232017JGEESI36947.pdf
23. Соколов Н.Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=52950>