

Научная статья
УДК 629.7

СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ГАЗОПЫЛЕВОГО ПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Александр Николаевич Устинов
Машиностроительный завод «Арсенал»,
Санкт-Петербург, Россия
Ustinov@mzarsenal.com

Аннотация. Предложен способ утилизации космического мусора с помощью самоионизирующегося плазменного образования. Создание искусственного плазменного образования (ИПО) вокруг космического мусора (КМ) увеличивает его площадь миделя, что значительно сокращает сроки существования КМ на орбите. ИПО формируется благодаря описанному в этой статье генератору мелкодисперсных частиц (МДЧ), который устанавливается на сервисный космический аппарат или новый космический аппарат, для его утилизации в конце жизненного цикла изделия. Ионизация ИПО поддерживается благодаря радиоактивным частицам, входящим в состав рабочего тела генератора мелкодисперсных частиц.

Ключевые слова: искусственное плазменное образование, космический аппарат, околоземное космическое пространство, собственная внешняя атмосфера, мелкодисперсная газообразная среда

Для цитирования: Устинов А.Н. Создание искусственного газопылевого плазменного образования для очистки околоземного пространства от космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 35–43.

Original article

SETTING-UP ARTIFICIAL GAS-DUST PLASMA FORMATION FOR CLEARING NEAR-EARTH SPACE FROM SPACE DEBRIS

Aleksandr N. Ustinov
Arsenal Machine-Building Plant,
Saint Petersburg, Russia
Ustinov@mzarsenal.com

Abstract

The intensive exploitation of the near-Earth space is accompanied by the accumulation of high-speed space debris (SD) in this area, which disposal is becoming an important problem for our civilization. The methods developed by us for the of orbital space debris disposal propose employing large-sized artificial plasma formations (APF), with which help of the process of the spacecraft aerodynamic deceleration is intensified for subsequent thermal disposal. With this end in view, a large-diameter APF is being formed around space debris, which creation is being accomplished with the gas-dust environment generator. The impact of the outer space radiation forms ionization processes in the generator gas and dust environment, which, in its turn, ensures formation of a carrier system consisting of solid space debris objects and the gas and dust plasma surrounding them. Due to the fact that the gas-dust plasma medium consists of charged particles, differing greatly from each other in mass, they have proportionally large differences in the speed of movement and the associated intensity of condensation on the

surfaces of solid objects of space debris. The said fact leads to dominating condensation of the light - electronic plasma component on the space debris surfaces, creating a negative charge on them, which, in its turn, leads to the positive charge forming in the APF volume. This selective charge distribution stipulates the electrostatic (Coulomb) interactions forming that attract the ingredients of the IPO structure (CM and plasma atmosphere) to each other. The sources of extra ionization are being employed at the expense of radionuclide additives application in the generator plasma, spontaneously radiating ionizing radiation, to intensify electrostatic interaction in the APF. Besides, the degree of the APF medium ionization is being increased due to utilizing easily ionizing alkaline and alkaline earth substances, possessing low ionization potentials, in its composition. Thus, the external dispersing impacts of the aerodynamic forces of the Earth atmosphere traces are being surpassed by the Coulomb electrostatic attractions inside the APF. The process of intense deceleration of such a large formation leads to a multiple decrease in the period of its ballistic existence, terminating when it reaches the dense layers of the Earth atmosphere, where its thermal disposal happens.

Keywords: artificial plasma formation, spacecraft, near-Earth space, eigen external atmosphere, finely dispersed gaseous-dust medium

For citation: Ustinov A.N. Setting-up Artificial Gas-Dust Plasma Formation for Clearing near-Earth Space from Space Debris. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 35-43.

Введение

Интенсивная эксплуатация околоземного космического пространства сопровождается накоплением в указанной области высокоскоростного космического мусора (КМ), утилизация которого становится важной проблемой нашей цивилизации. В разработанных нами способах утилизации орбитального космического мусора предлагается использовать крупные искусственные плазменные образования (ИПО), с помощью которых выполняется интенсификация процесса аэродинамического торможения КМ для последующей термической утилизации. С этой целью вокруг космического мусора формируется ИПО большого диаметра, создание которого осуществляется с помощью генератора газопылевой среды. Под воздействием радиации космического пространства происходит ионизация в генераторной газопылевой среде, что, в свою очередь, обеспечивает формирование несущей системы, состоящей из объектов твердого космического мусора и окружающей их газопылевой плазмы. Вследствие того что газопылевая плазменная среда состоит из заряженных частиц, сильно отличающихся друг от друга по массам, они пропорционально различаются по скоростям перемещения и по связанной с этим интенсивности конденсаций на поверхностях твердых объектов космического мусора. Указанное обстоятельство обуславливает доминирующую конденсацию на поверхностях КМ легкого – электронного – компонента плазмы и создание на них отрицательного заряда, что, в свою очередь, приводит к формированию в объеме ИПО положительного заряда. Такое селективное распределение зарядов вызывает электростатические (кулоновские) взаимодействия, притягивающие ингредиенты структуры ИПО (КМ и плазменная

атмосфера) друг к другу. С целью усиления электростатических взаимодействий в ИПО используются источники дополнительной ионизации за счет применения в генераторной плазме присадок из радионуклидов, спонтанно излучающих ионизирующую радиацию. Кроме того, степень ионизации среды ИПО увеличивается благодаря использованию в ее составе легко ионизирующихся щелочных и щелочноземельных веществ, имеющих низкие потенциалы ионизации. Таким образом, внешние рассеивающие воздействия аэродинамических сил следов атмосферы Земли преодолеваются кулоновскими электростатическими притяжениями внутри ИПО. Интенсивное торможение такого крупного образования приводит к многократному уменьшению срока его баллистического существования, оканчивающегося при достижении плотных слоев земной атмосферы, где происходит его термическая утилизация.

Космический мусор на околоземных орбитах

Постоянно увеличивающийся уровень загрязнения околоземного космического пространства (ОКП) объектами космического мусора является результатом активного использования человечеством космических средств социально-экономического, научного и оборонного назначения [1, 2].

Космическим мусором являются следующие объекты:

1. Искусственные объекты, запущенные в околоземное космическое пространство в качестве полезной нагрузки, аварийно вышедшие из строя или прекратившие функционирование вследствие выработки своего ресурса [3, 4];

2. Отделяемые фрагменты ракет космического назначения, образовавшиеся при выведении, рас-

крытии или в результате столкновений (иногда взрывов) на орбите [5];

3. Управляемые космические объекты, способные нанести вред [6].

Запатентован способ очистки космического пространства от КМ посредством его увода с орбиты для последующей утилизации (сгорания) в плотных слоях атмосферы [7]. Способ реализуется за счет использования плазменного образования, искусственно создаваемого вокруг осколков мусора с помощью космического аппарата утилизации (КАУ). После «окружения» космического мусора мелкодисперсной газопылевой плазменной средой, сформированной с помощью запускаемого с КАУ генератора, начинают осуществляться процессы селекции отрицательных зарядов на поверхностях твердых элементов КМ и положительного объемного заряда в газопылевой плазменной среде [8, 10]. Процесс заряжения твердого КМ отрицательным зарядом обусловлен значительно большей скоростью теплового движения в плазменной среде свободных электронов, по сравнению со скоростями других, более тяжелых частиц плазмы (ионов и пылевых частиц). Большая подвижность электронного компонента плазмы, в свою очередь, обеспечивает более интенсивную его конденсацию на поверхностях твердых фрагментов КМ. Соответственно, в объеме газопылевой плазмы из-за потери вследствие указанной конденсации электронного компонента появится положительный пространственный заряд. Кулоновские взаимодействия положительно заряженной атмосферы с отрицательно заряженными фрагментами КМ приводят к выравниванию интегральных перемещений указанных ингредиентов (газопылевой плазменной атмосферы и фрагментов КМ) в орбитальном пространстве [9, 21]. У космического мусора возникает собственная внешняя атмосфера с повышенной плотностью по сравнению с плотностью среды, окружавшей мусор до срабатывания генератора газопылевой плазмы. Кулоновские взаимодействия обуславливают дальнейший орбитальный полет нового объекта – искусственного плазменного образования, состоящего из газопылевой плазменной атмосферы и твердых фрагментов космического мусора. Площадь миделевого сечения ИПО на порядки превосходит сумму площадей миделевых сечений фрагментов космического мусора. Аэродинамическое сопротивление следов атмосферы Земли также увеличивается на порядки, что приводит к ускоренному снижению высоты орбиты ИПО вплоть до достижения плотных слоев земной атмосферы, в которых произойдет его термическая утилизация.

Усиление структурирования плазмы при добавлении в ее состав пыли

Для структурирования плазмы в ее состав добавляют мелкодисперсную пыль, которая повышает силовое взаимодействие с газоплазменной средой. Значительное увеличение сил электростатических притяжений заряженных противоположно друг к другу обусловлено формированием на поверхностях пылинок более высоких электрических потенциалов по сравнению с потенциалами свободных электронов [10]. Осаждение большого числа электронов на поверхность каждой пылинки приводит к зарядению их поверхностей на величину, равную нескольким тысячам зарядов электронов. Процесс конденсации электронов прекращается вследствие того, что поле отрицательного заряда пылинок начинает препятствовать приближению к ним свободных электронов плазмы. Затем к окрестности пылинок притягиваются тяжелые положительные ионы, формирующие в указанных областях положительные многозарядные слои, которые физики называли «положительными шубами» [12]. При этом активизируется эмиссия электронного тока с поверхностей пылинок, приводящая к образованию на них положительной заряженности в момент достижения здесь дефицита электронов. Испускаемые из поверхностей пылинок электроны одновременно осуществляют нейтрализацию «положительных шуб». Начиная с некоторого значения напряженности положительного электростатического поля, процессы перезарядки пылинок непрерывно повторяются, что означает формирование осцилляции заряженности пылевого наполнения плазмы. Одновременное существование как положительно, так и отрицательно заряженных пылинок приводит к усилению структурирования среды вследствие значительного увеличения сил электростатического сцепления частиц, имеющих тысячекратно большие противоположные заряды. Указанное усиление кулоновских взаимодействий способствует сохранению искусственного плазменного образования в космическом пространстве вследствие существенного увеличения сил, препятствующих его рассеянию [13].

Экспериментальные исследования показали, что процессы упорядочения пылевых образований протекали во всех типах плазмы: газоразрядной, термической, ядерно-возбуждаемой. Установлено, что во всех случаях главной причиной образования упорядоченных пылевых структур является электрический заряд, который изначально может быть не только отрицательным, но и положительным, например, как результат фотоэлектронной эмиссии с поверхностей пылинок. В термической плазме заряд пылинок может быть также положительным

вследствие термоэлектронной эмиссии с их поверхностей. В ядерно-возбуждаемой плазме при наличии β -излучения поток электронов может зарядить пылинки отрицательно, но вторичная электронная эмиссия (эффект Шоттки) может изменить знак зарядов на положительный [14].

Итак, в газопылевой плазме самоорганизуются процессы «сращивания плазменной среды» в структуру, способную преодолевать рассеяния аэродинамическими воздействиями следов остаточной атмосферы на околоземных орбитах. Такое свойство позволяет использовать крупные искусственные плазменные образования для «окутывания» ими космического мусора с целью его последующей термической утилизации в плотных слоях атмосферы Земли.

Влияние степени ионизации плазменной среды на устойчивость ИПО

Для формирования крупного искусственного плазменного образования, состоящего из космического мусора и окружившего его газопылевого плазменного облака, заполнившего пустоты между отдельными элементами монолитной или препарированной структуры КА, в его конструкции должно быть предусмотрено наличие генератора мелкодисперсных частиц (МДЧ). Под действием радиации космического пространства, а также излучений радиоактивных ингредиентов ИПО или источников, находящихся в составе бортовых систем КАУ, образующаяся генераторная среда ионизируется, формируя газоплазменное облако, осуществляющее «сращивание» газопылевого окружения с элементами утилизируемых конструкций [15]. Силы взаимодействия ингредиентов ионизированной газопылевой атмосферы и космического мусора, характеризующие устойчивость искусственного плазменного образования, находятся в прямой зависимости от степени ионизации газопылевой среды. Поэтому для активации ионизационных процессов в состав генерируемой среды вводят легкоионизируемые щелочные и щелочноземельные вещества. При этом в качестве генераторов используются газодинамические, пиротехнические и взрывные устройства. В газодинамических генераторах предварительно диспергированные частицы выталкивались потоками сжатого газа. Необходимость предварительного диспергирования частиц ограничивает возможность уменьшения их размеров менее единиц долей микрометра, что является недостатком газодинамического метода формирования ИПО. В пиротехнических генераторах реализуются металлотермические процессы, обеспечивающие не взрывное, но быстрое горение смеси с

образованием газопылевой плазменной среды ИПО. Возможность использования лишь химически активных реагентов является недостатком пиротехнических генераторов. Взрывные генераторы позволяют осуществлять диспергацию и инъекцию газоплазменной среды за счет энергии взрыва. Такие генераторы конструктивно состоят из зарядов, детонаторов и вкладышей инжектируемых, предварительно оптимизированных наборов веществ специальной формы. Существующая проблема снижения скорости разлета выброшенной взрывом инжектируемой среды может решаться с помощью наполнения образующейся смеси инертными газами [16].

Для усиления электростатических взаимодействий между ингредиентами ИПО (газопылевой плазменной среды и составных элементов космического мусора) с целью повышения способности газопылевой плазмы удерживаться в окружении КМ следует дополнительно к космическому ионообразующему излучению использовать искусственно созданную радиацию генераторной среды [17]. Для реализации такого способа форсирования процессов ионизации в создаваемом ИПО к генераторным средам добавляются радиоактивные вещества в виде пылевых присадок, излучающих сильно ионизирующие нейтронные и электромагнитные потоки. Установлено, что некоторые радиоактивные вещества обладают свойством спонтанно испускать нейтроны и гамма-излучения, являющиеся сильными ионизаторами окружающей среды.

В качестве источников ионизирующих излучений можно использовать следующие спонтанно излучающие долгоживущие изотопы: калифорний-252; plutonium-238-beryllium; plutonium-239-beryllium или бериллий америция; сурьма (Sb) в стабильных изотопах, в числе которых имеется тридцать пять искусственных радиоактивных веществ (в том числе с «полной жизнью» около 7 лет) и многие другие [18, 20].

Для указанных целей можно использовать измельченные вещества отработавших тепловыделяющих элементов атомных электростанций, а также других радиоактивных отходов, имеющихся в огромных количествах в местах «захоронений». Испытания атомных бомб и ядерных реакторов, проведенные в космическом пространстве, показали, что в плотных слоях земной атмосферы происходит термическая утилизация образовавшихся осколков, при которой измельченные радиоактивные вещества превращаются в пар и рассеиваются на большие площади, некритично повышая природный радиационный фон.

Кроме названных наполнений генераторной среды, в ней предусматриваются присадки хими-

ческих соединений водорода, например тяжелой воды. Ядром атома водорода является один протон, его масса приблизительно равна массе нейтрона. При столкновении с налетающим быстрым нейтроном происходит эффективный энергообмен, приводящий к замедлению нейтрона и, как следствие, к значительному увеличению вероятности его захвата другими встречающимися при его дальнейшем полете ядрами. Последующие захваты нейтронов способствуют образованию радионуклидов всех встретившихся веществ, которые, в свою очередь, испускают ионизирующие радиационные излучения, в результате чего заметно увеличивается концентрация заряженных частиц в ИПО, а значит, появляется возможность создания устойчивых ИПО многокилометрового диаметра. Достижение такой цели наиболее вероятно при использовании реакции ядерного превращения стабильного природного урана-238 в спонтанно излучающий плутоний-239 (реакция получения оружейного плутония). Эта реакция протекает под действием тепловых нейтронов, излучаемых пылевыми присадками радионуклидов, добавляемых в генераторную среду изначально для запуска реакции образования оружейного плутония.

Создание условий для замедления нейтронного компонента ИПО позволяет использовать в его объеме реакцию превращения стабильного природного урана-238 в спонтанно излучающий радиацию плутоний-239 (так называемый оружейный плутоний). Реализация такого процесса дает возможность получать радиоактивное вещество на протяжении всего периода баллистического полета ИПО к плотным слоям атмосферы. Для осуществления указанного превращения в генераторные вещества в виде мелкодисперсной присадки добавляется природный уран-238. Наличие в составе ИПО водородсодержащего замедлителя нейтронов, как видим, повышает эффективность протекания такой ядерной реакции.

Усилению электрических связей способствует инъекция в объем искусственного плазменного образования легкоионизируемых щелочных и щелочноземельных газопылевых веществ, способных создавать высокую степень ионизации плазмы, а значит, получать большие величины зарядов на твердых фрагментах КМ [19].

Установлено, что для дополнительной ионизации газопылевой среды можно использовать воздействие ультрафиолетового лазера [22]. Указанные процессы формирования лазерного облучения методом сканирования ИПО предлагается осуществлять с борта специализированного космического аппарата утилизации орбитального мусора (рис. 1), в составе которого используется ядерная

энергетическая установка и ультрафиолетовый лазер (получено уведомление о присуждении патента на изобретение).

Недостатком метода очистки орбит от космического мусора при сопровождении ИПО аппаратом утилизации является необходимость больших материальных затрат по сравнению с описанным выше способом наполнения ИПО газопылевыми радионуклидами. Данное обстоятельство предопределило разработку способа утилизации КМ с самоионизирующимся ИПО, из которого исключены операции сопровождения его перелета к плотным слоям земной атмосферы. Использование такого способа (рис. 2) позволяет существенно повысить производительность целевого функционирования КАУ.

Схема используемого в данном способе генератора газопылевой среды представлена на рис. 3. В корпусе генератора располагаются газовые баллоны высокого давления со сжатыми пылеобразными веществами.

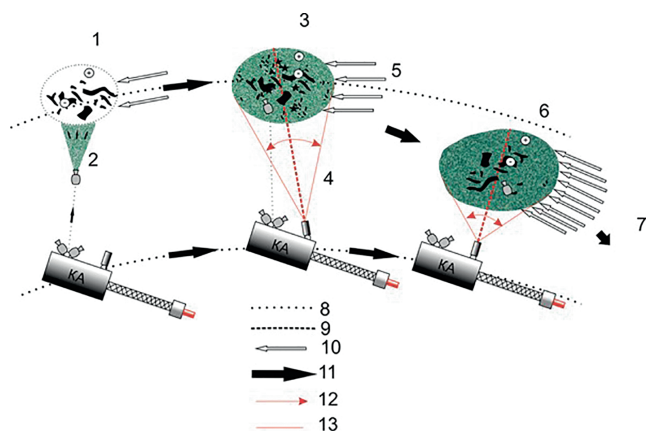


Рис. 1. Способ утилизации космического мусора с помощью искусственного плазменного образования:

- 1 – группа объектов космического мусора (облако КМ),
- 2 – направленный поток газопылевой среды из генератора МДЧ;
- 3 – искусственное плазменное образование: фрагменты космического мусора + пылевое наполнение + газовая плазма;
- 4 – лазерная ионизация ИПО (сканирование УФ-лазером);
- 5 и 6 – интенсивное аэродинамическое торможение ИПО остаточной атмосферой Земли;
- 7 – область утилизации ИПО в плотных слоях атмосферы Земли;
- 8 – орбиты движения ИПО и КАУ; 9 – лазерный луч;
- 10 – аэродинамическое воздействие остаточных следов атмосферы Земли;
- 11 – направления движений ИПО и КАУ;
- 12 – угловой диапазон лазерного сканирования ИПО;
- 13 – граница угловой области лазерного сканирования ИПО

В камере 4 генератора осуществляется смешение четырех ингредиентов газоплазменной среды и образование избыточного давления, вследствие чего происходит истечение газопылевой плазменной среды из генератора в облако космического мусора.

Стрелками показаны процессы спонтанных радиационных излучений радионуклидов и дезактивации возбужденных ими ядер веществ.

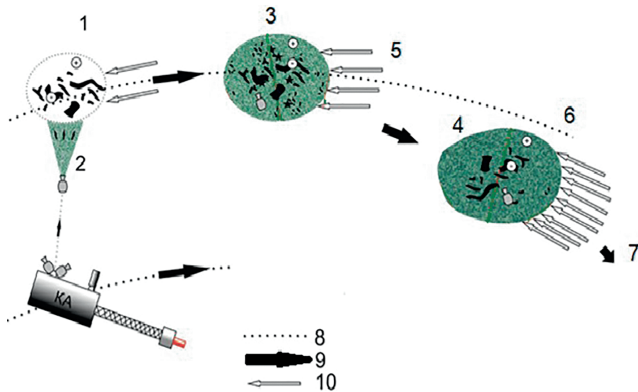


Рис. 2. Способ утилизации космического мусора с помощью самоионизирующегося искусственного плазменного образования:
 1 – группа объектов космического мусора (облако КМ);
 2 – направленный поток МДЧ из генератора МДО;
 3 – искусственное самоионизирующееся плазменное образование (ИПО);
 4 – сход облака с орбиты;
 5 и 6 – интенсифицирующееся аэродинамическое торможение ИПО атмосферой Земли;
 7 – область утилизации ИПО в плотных слоях атмосферы Земли;
 8 – орбиты движения ИПО и КАУ;
 9 – направления движений ИПО и КАУ;
 10 – аэродинамическое воздействие остаточных следов атмосферы Земли

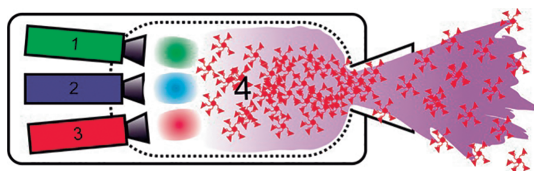


Рис. 3. Схема генератора мелкодисперсных частиц с присадкой радионуклидов и изображением радиационно-ионизирующих процессов в среде газопылевого генераторного наполнения:
 1 – водородсодержащий компонент;
 2 – радионуклиды, спонтанно излучающие нейтроны и диспергированный пылеобразный природный U238;
 3 – щелочные и щелочноземельные вещества; с низкими потенциалами ионизации;
 4 – камера смешения

Расчет времени активного существования новообразованного космического объекта можно приближенно вычислить по следующим формулам [23]:

$$t_{\text{сущ}} = \frac{F \cdot F_1}{C_6}; \quad (1)$$

$$F \approx \frac{H}{2\rho_a \sqrt{\mu a_0}}; \quad (2)$$

$$F_1 = \frac{1}{1 + \frac{v_{T_0}^2}{8} + \frac{v_{T_0}^4}{192} + \dots}; \quad (3)$$

$$v_{T_0} = \frac{a_0 e_0}{H}, \quad (4)$$

где $t_{\text{сущ}}$ – время существования КА на орбите Земли; ρ_a – плотность атмосферы для опорной орбиты; v_{T_0} – параметр торможения при начальных параметрах; $e_0 = 0,01$ – начальное значение эксцентриситета орбиты; H – высота однородной атмосферы.

$$a_0 = R_3 + h, \quad (5)$$

где $R_3 = 6371$ км – радиус Земли; h – высота орбиты над уровнем моря; a_0 – радиус орбиты.

Для нахождения баллистического коэффициента C_6 воспользуемся формулой

$$C_6 = \frac{c_x S}{2M}, \quad (6)$$

где c_x – безразмерный коэффициент сопротивления воздуха; S – площадь миделевого сечения; M – масса.

Для оценки эффективности метода выполним расчет времени до утилизации КМ в плотных слоях атмосферы Земли для разных высот опорных орбит при радиусе КМ, равном 1 м, и радиусе ИПО с КМ, равном 4 м, при массе равной 100 кг (см. таблицу).

Полученные теоретические данные показывают, что при увеличении радиуса КМ в 4 раза время существования его на орбите сокращается в 16 раз.

Выводы

Данное научное направление получило развитие при решении важнейшей проблемы человечества, связанной с очисткой околоземного космического пространства от засорения космическим мусором. Для утилизации КМ осуществляется окружение его газопылевой плазменной атмосферой большого диаметра. Торможение космического мусора и утилизация его в плотных слоях атмосферы реализуются за счет слабых аэродинамических сил остатков земной атмосферы, интегральное действие которых возрастает при увеличении площади миделевого сечения искусственного плазменного

Оценка количества дней до утилизации

Высота орбиты, км	400	500	600	700	800
Количество дней до сгорания КМ в плотных слоях атмосферы Земли	121	646	2600	8430	23120
Количество дней до сгорания КМ с ИПО в плотных слоях атмосферы Земли	8	40	162	527	1445

образования, включающего в свой состав космический мусор. Среда для образования ИПО создается с помощью генераторов, расположенных на КАУ либо входящих в состав бортовых систем утилизируемого КА. Для поддержания высокой степени ионизации газопылевой среды, окружающей КМ, предлагается облучать ультрафиолетовым лазером с КАУ, сопровождающего баллистический полет ИПО к плотным слоям атмосферы Земли.

Необходимость исключения операции сопровождения плазменного облака, транспортирующего КМ, с целью значительного повышения производительности орбитального функционирования космического аппарата утилизации предопределила разработку способа создания ИПО с самоподдерживаемой ионизацией плазменной среды, осуществляемой за счет ее наполнения совокупностью новых ингредиентов. В их состав может быть включено одно или несколько веществ из следующего перечня газопылевых компонентов:

1) радионуклиды, спонтанно излучающие потоки нейтронов и гамма-квантов;

2) легко ионизирующиеся щелочные и щелочно-земельные металлы, имеющие низкие потенциалы ионизации;

3) радиационно стабильный природный уран-238, превращающийся под действием нейтронов в спонтанно делящийся плутоний-239, излучающий участвующие в ионизации среды ИПО нейтроны и гамма-кванты;

4) содержащие водород вещества для замедления нейтронов в объеме ИПО с целью активации процесса превращения урана-238 в оружейный спонтанно излучающий плутоний-239.

Итак, очевидно, что миделевое сечение самоподдерживающегося искусственного плазменного образования, на порядки превосходящее сумму миделевых сечений отдельных твердых фрагментов облака КМ, обеспечивает интенсивное аэродинамическое торможение ИПО без его сопровождения КАУ и последующую его утилизацию вместе с КМ в плотных слоях земной атмосферы.

Список источников

1. Космический мусор. Фундаментальные и практические аспекты угрозы: Сборник тезисов Всероссийской конференции с международным участием (17–19 апреля 2019; ИКИ РАН, Москва). М.: ИКИ РАН, 2019. 88 с.
2. Вениаминов С.С., Червонова А.М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 208 с.
3. European Space Agency: About space debris. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris
4. National Aeronautics and Space Administration: Space Debris and Human Spacecraft. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html
5. Мозжорин Ю.А., Чекалин С.В. Проблема «космического мусора» // Космос и экология: Сборник статей. М.: Знание, 1991. С. 5–21.
6. Назаренко А.И. Прогноз засоренности ОКП на 200 лет и синдром Кесслера. URL: <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf>
7. Тестоедов Н.А., Устинов А.Н., Иванов К.М. и др. Способ очистки орбит от космического мусора остаточным аэродинамическим действием атмосферы Земли. Патент RU 2773991 С1. Бюл. № 17, 14.06.2022.
8. Миронов В.В., Усовик И.В. Ретроспектива проблемы космического мусора. Часть 1. Техногенное засорение космического пространства и средства его контроля // Космические исследования. 2020. Т. 58. № 2. С. 117–130.
9. Игумина В.А., Карючина А.Е., Реховская Е.О. Проблема засорения космоса // Исследования молодых ученых: Материалы IX Международной научной конференции (апрель 2020; Казань). Казань: Молодой ученый, 2020. С. 14–17.
10. Санего М.К., Тестоедов Н.А., Атамасов В.Д. и др. Теория проектирования сложных технических систем космического базирования: Учебник. – СПб.: Профессионал, 2012. – 559 с.
11. Наземные эксперименты и теоретические исследования // Физика космического пространства: Материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследова-

- тельском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. URL: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf
12. Акишин А.И. Работоспособность космического облучения при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (19–20 ноября 2007). М.: НИИ ЯФ МГУ, 2007. С. 15–19.
 13. Атамасов В.Д., Бабук В.А., Немыкин С.А., Романов А.В., Соколов Ю.А., Устинов А.Н. Ядерные орбитальные комплексы. – СПб: ФГУП «КБ “Арсенал” им. М.В.Фрунзе», 2016. – 800 с.
 14. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе / Сокр. пер. с англ. Ю.И. Колесникова; Под ред. Е.Е. Ковалева. – М.: Атомиздат, 1971. – 320 с.
 15. Солнечное затмение по заказу // Техника – молодежи. 1978. № 5. С. 21–23.
 16. Тобольский А. Освоение космоса. URL: <http://scorcher.ru/art/science/space/space.php>
 17. Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве: Дисс. ... доктора физ.-мат. наук. – СПб., 2002. – 334 с.
 18. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
 19. Филипп Н.Д., Ораевский В.Н., Блаунштейн Н.Ш., Ружин Ю.Я. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 246 с.
 20. Мильковский А.Г., Атамасов В.Д., Колбасин И.В., Устинов А.Н., Калинина А.М. Новые явления в космическом эксперименте по созданию искусственного солнечного затмения при совместном полете космических кораблей «Аполлон» – «Союз» // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 144–151.
 21. Крымский Г.Ф., Петухов С.И., Стародубцев С.А. Исследования теории космической плазмы // Наука и техника в Якутии. 2022. № 1(42). С. 8–14. DOI: 10.24412/1728-516X-2022-1-8-14
 22. Колбасин И.В. Основные источники и состав излучений, воздействующих на собственную внешнюю атмосферу космического аппарата с ядерной энергетической установкой // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 123–130. DOI: 10.34759/vst-2020-2-123-130
 23. Чеботаев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: Учеб. пособие. – Красноярск: СибГАУ, 2011. – 486 с.

References

1. *Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “Kosmicheskii musor. Fundamental’nye i prakticheskie aspekty ugrozy” (17–19 April 2019; IKI RAN, Moscow)*. Moscow, IKI RAN, 88 p.
2. Veniaminov S.S., Chervonova A.M. *Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu* (Space debris is a threat to humanity), Moscow, IKI RAN, 2013, 208 p.
3. *European Space Agency: About space debris*. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris
4. *National Aeronautics and Space Administration: Space Debris and Human Spacecraft*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html
5. Mozhgorin Yu.A., Chekalin S.V. *Kosmos i ekologiya. Sbornik statei*, Moscow, Znanie, 1991, pp. 5–21.
6. Nazarenko A.I. *Prognoz zasorennosti OKP na 200 let i sindrom Kesslera*. URL: <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf>
7. Testodov N.A., Ustinov A.N., Ivanov K.M. et al. *Patent RU 2773991 C1*, 14.06.2022.
8. Mironov V.V., Usovik I.V. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 117–130.
9. Iguminova V.A., Karyuchina A.E., Rekhovskaya E.O. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii “Issledovaniya molodykh uchenykh” (April 2020; Kazan)*. Kazan, Molodoi uchenyi, 2020, pp. 14–17.
10. Sapego M.K., Testodov N.A., Atamasov V.D. et al. *Teoriya proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo bazirovaniya* (Theory of designing complex technical space-based systems), St. Petersburg, Professional, 2012, 559 p.
11. *Fizika kosmicheskogo prostranstva* (Physics of Outer Space). URL: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf
12. Akishin A.I. *Materialy VIII Mezhvuzovskoi nauchnoi shkoly molodykh spetsialistov “Kontsentrirrovannnye potoki energii v kosmicheskoi tekhnike, elektronike, ekologii i meditsine” (19–20 November 2007)*. Moscow, NIIFM GU, 2007, pp. 15–19.
13. Atamasov V.D., Babuk V.A., Nemykin S.A., Romanov A.V., Sokolov Yu.A., Ustinov A.N. *Yadernye orbital’nye komplekсы* (Nuclear orbital complexes), St. Petersburg, KB “Arsenal” im. M.V. Frunze, 2016, 800 p.
14. Haffner J.W. *Radiation and Shielding in Space*. Academic Press Inc., U.S., 1968, 347 p.
15. *Solnechnoe zatmenie po zakazu*. In “Tekhnika-molodezhi”, 1978, no. 5, pp. 21–23.
16. Tobol’skii A. *Osvoenie kosmosa*. URL: <http://scorcher.ru/art/science/space/space.php>
17. Blagoveshchenskaya N.F. *Geofizicheskie efekty aktivnykh vozdeistvii v okolozemnom kosmicheskom prostranstve* (Geophysical effects of active impacts in near-Earth space), Doctor’s thesis, St. Petersburg, 2002, 334 p.

18. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. *Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred* (Geometric optics of inhomogeneous media), Moscow, Nauka, 1980, 304 p.
19. Filipp N.D., Oraevskii V.N., Blaunshstein N.Sh., Ruzhin Yu.Ya. *Evolutsiya iskusstvennykh plazmennyykh neodnorodnostei v ionosfere Zemli* (Evolution of artificial plasma inhomogeneities in the Earth's ionosphere), Kishinev, Shtiintsa, 1986, 246 p.
20. Mil'kovskii A.G., Atamasov V.D., Kolbasin I.V., Ustinov A.N., Kalinina A.M. New phenomena in the space experiment on creating an artificial solar eclipse while the spaceships "APOLLO"- "SOYUZ" joint flight. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 144-151.
21. Krymskii G.F., Petukhov S.I., Starodubtsev S.A. *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2022, no. 1(42), pp. 8-14. DOI: 10.24412/1728-516X-2022-1-8-14
22. Kolbasin I.V. Main sources and radiation composition affecting eigen external atmosphere of a spacecraft with nuclear power plant. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 123-130. DOI: 10.34759/vst-2020-2-23-130
23. Chebotaev V.E., Kosenko V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* (Fundamentals of designing spacecraft for information support), Krasnoyarsk, SibGAU, 2011, 486 p.

Статья поступила в редакцию 06.08.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 28.08.2023.

The article was submitted on 06.08.2023; approved after reviewing on 28.08.2023; accepted for publication on 28.08.2023.