

УДК 629.7

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.06

**А.Н. Устинов<sup>1</sup>, К.М. Иванов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Машиностроительный завод «Арсенал», Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

## **РАДИАЦИОННОЕ ИСКУССТВЕННОЕ ПЛАЗМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

Реализация способа плазменной активации аэродинамического торможения «следами атмосферы» может осуществляться с помощью космических аппаратов утилизации орбитального мусора, создаваемых с целью осуществления очистных мероприятий в околоземном пространстве. В данном способе предлагается использовать слабое сопротивление следов атмосферы для торможения искусственно создаваемого плазменного образования большого диаметра, наполняющего и окружающего облако или единичный фрагмент космического мусора. Увеличение аэродинамического сопротивления утилизируемого космического мусора обусловлено на порядки большим миделевым сечением искусственно создаваемого плазменного образования по сравнению с интегральной площадью миделевых сечений совокупности фрагментов космического мусора. Создание плазменного образования обеспечивается с помощью запускаемого с космического аппарата утилизации генератора газопылевой среды. Подвергаясь ионизации под воздействием радиации космического пространства и лазерного облучения, производимого с космических аппаратов утилизации, плазменное образование «срашивает» газопылевое окружение с элементами мусора электростатическими кулоновскими силами. Кроме того, авторами статьи разработан способ осуществления самоионизации искусственного плазменного образования посредством внесения в состав генераторной среды диспергированной пылевой присадки из спонтанно излучающих радионуклидов. Значения сил кулоновского взаимодействия между плазменной средой и поверхностями объектов космического мусора находятся в прямой зависимости от степени ионизации плазмы. Для получения более высокой концентрации ионизированной среды, т.е. высокого значения кулоновского взаимодействия, в её состав вводятся легко ионизирующиеся щелочные и щелочноземельные вещества, имеющие низкий потенциал ионизации. При этом кулоновские электростатические притяжения становятся способными преодолевать рассеивающие усилия аэродинамического воздействия следов атмосферы Земли. Таким образом, искусственное плазменное образование, в состав которого входит космический мусор, сохраняется вплоть до достижения плотных слоев земной атмосферы, где осуществляется его термическая утилизация.

**Ключевые слова:** искусственное плазменное образование, космический аппарат, околоземное космическое пространство, сложная техническая система, собственная внешняя атмосфера, мелкодисперсное образование.

**A.N. Ustinov<sup>1</sup>, K.M. Ivanov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Arsenal Machine-Building Plant, Saint Petersburg, Russian Federation<sup>2</sup> Baltic state technical university «ВОЕНМЕХ» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russian Federation

## **RADIATION ARTIFICIAL PLASMA FORMATION FOR CLEANING NEAR-EARTH ORBITS FROM SPACE DEBRIS**

The implementation of the method of plasma activation of aerodynamic braking by "traces of the atmosphere" can be carried out using spacecraft for the disposal of orbital debris, created to carry out cleanup activities in near-Earth space. In this method, it is proposed to use the weak resistance of traces of the atmosphere to decelerate an artificially created large-diameter plasma formation that fills and surrounds a cloud or a single piece of space debris. The increase in the aerodynamic drag of the disposed space debris is due to orders of magnitude larger midsection of the artificial plasma formation compared to the integral area of the midsections of the CM fragments. The creation of a plasma formation is provided with the help of a gas-dust medium generator launched from a utilization spacecraft. Being subjected to ionization under the influence of outer space radiation and laser irradiation produced from a salvage spacecraft, the plasma formation "joins" the gas and dust environment with debris elements by electrostatic Coulomb forces. In addition, the authors of the article have developed a method for implementing self-ionization of an artificial plasma formation by introducing a dispersed dust additive from spontaneously emitting radionuclides into the generator medium. The values of the forces of the Coulomb interaction between the plasma medium and the surfaces of space debris objects are directly dependent on the degree of plasma ionization. To obtain a higher concentration of the ionized medium, that is, a high value of the Coulomb interaction, easily ionizing alkali and alkaline earth substances with a low ionization potential are introduced into its composition. At the same time, the Coulomb electrostatic attraction becomes able to overcome the scattering forces of the aerodynamic impact of traces of the Earth's atmosphere. Thus, the artificial plasma formation, which includes space debris, persists until reaching the dense layers of the Earth's atmosphere, where it is thermally utilized.

**Keywords:** artificial plasma formation, spacecraft, near-Earth space, complex technical system, own external atmosphere, finely dispersed formation.

### **Космический мусор на околоземных орбитах. Использование искусственных плазменных образований для его торможения и утилизации в плотных слоях атмосферы**

Если безотказность эксплуатации сложных технических систем (СТС) космического базирования на ранних этапах освоения космического пространства связывали с надежностью ракетно-космической техники, то в настоящее время к этому добавился новый фактор – постоянно увеличивающийся уровень загрязнения околоземного космического пространства (ОКП) объектами космического мусора. В связи с активным использованием околоземного космического пространства человечеством с каждым годом растет степень техногенного загрязнения орбит эксплуатации космического аппарата (КА). Проблема космического мусора затрагивает задачи вывода КА на орбиту и его лётного функционирования, так как столкновение даже с сантиметровым фрагментом может привести к его поражению [1, 2].

В статье рассматривается способ увода космического мусора с орбиты для последующей утилизации (сгорания) в плотных слоях атмосферы, реализация которого осуществляется за счет использования плазменного образования, искусственно создаваемого вокруг облака осколков космического мусора с помощью космического аппарата утилизации [3, 4]. После «окружения» космического мусора мелкодисперсным плазменным образованием, сформированным с помощью запускаемого с космических аппаратов утилизации (КАУ) газопылевого генератора, начинают протекать процессы формирования отрицательных зарядов на поверхностях твердых элементов космического мусора (КМ) и положительного объемного заряда в газопылевой среде. Процесс зарядки КМ отрицательным потенциалом обусловлен значительно большей скоростью теплового движения в плазменной среде электронов, обуславливающей более интенсивную их конденсацию на поверхностях твердых фрагментов КМ по сравнению со скоростью других, более тяжелых, частиц плазмы (ионов и пылевых частиц). Соответственно в объеме газопылевой плазмы из-за потери вследствие указанной конденсации электронной компоненты появится положительный пространственный заряд. Кулоновские взаимодействия положительно заряженной атмосферы с отрицательно заряженными объектами твердого мусора приведут к прекращению интегрального перемещения указанных ингредиентов (газопылевой плазменной атмосферы и фрагментов КМ) искусственного образования относительно друг друга. Таким образом, у космического мусора формируется облако собственной внешней атмосферы (СВА) с повышенной плотностью. Электрические взаимодействия обуславливают дальнейший совместный орбитальный полет нового объекта, получившего название искусственного плазменного образования (ИПО), состоящего из газопылевой атмосферы и твердых фрагментов космического мусора. Понятно, что размеры и форма ИПО зависят от напряженности электростатического поля в объеме атмосферы, что, в свою очередь, является функцией степени ионизации плазмы, окружающей КМ. Изменяя степень ионизации, можно осуществлять управление массогабаритными параметрами ИПО, площадь миделевого сечения которого на порядки превосходит сумму площадей миделевых сечений осколков космического мусора. При этом тормозящее действие сил аэродинамического сопротивления следов атмосферы Земли также увеличивается на порядки. Интенсификация процесса торможения космического мусора в составе ИПО приводит к ускоренному снижению высоты его орбиты вплоть до достижения плотных слоев атмосферы Земли, в которых произойдет его утилизация.

Таким образом, торможение космического мусора и утилизация его в плотных слоях атмосферы осуществляется за счет слабых аэродинамических сил остатков земной атмосферы, интегральное действие которых увеличивается развитием площади миделевого сечения искусственного плазменного образования, включающего в свой состав космический мусор [5, 6].

Известно, что плазма – это неструктурированная квазинейтральная среда, состоящая из большого числа заряженных частиц с коллективной динамикой. Главным отличием плазмы от нейтрального газа является свойство амбиполярной диффузии, т.е. наличие постоянной электромагнитной связи частиц, обладающих зарядом, друг с другом. Вследствие этого при попыт-

ке добавления или изъятия частиц облака плазмы обязательно возникнут противодействующие силы, что, в свою очередь, приведёт к изменению динамики всего облака плазмы. Поэтому плазму считают четвертой фазой вещества, обладающей новыми свойствами [7, 10]. Для не ионизованного газа характерны тепловые движения нейтральных частиц (атомов, молекул, кластеров, пылеобразных частиц вещества и т.д.), представляющие совокупность прямых отрезков (броуновское движение), а для движения заряженных частиц плазмы присущи законы электромагнитного взаимодействия, в результате чего возникают силы магнитного взаимодействия, которые искривляют отрезки траекторий частиц.

Степень ионизации плазмы – это отношение числа ионов к первоначальному числу атомов, которое варьируется в зависимости от факторов, характеризующих плазменную среду, и от скорости её рекомбинации. Полностью ионизированная плазма, состоящая только из свободных атомных ядер и электронов, является редко встречающимся явлением, так как в реальных условиях в ней имеется некоторая часть нейтральных частиц [8, 11]. Для удержания плазменной среды, окружающей объекты космического мусора, при полете в условиях наличия аэродинамического обдува следами земной атмосферы необходимо обеспечить достаточно высокую напряженность электростатического поля разноименных зарядов.

### **Усиление тенденций к структурированию плазмы при добавлении в её состав пыли**

С целью усиления тенденций к структурированию плазмы используются физические процессы, протекающие в газоплазменных образованиях при наличии в них пыли, которая формирует явления повышенного силового взаимодействия твердых пылевых частиц с газоплазменной средой. Усиление кулоновского притяжения заряженных противоположно частиц друг к другу, сопряжено с образованием высоких электрических потенциалов на поверхностях пылинок по сравнению с потенциалами элементарных частиц в газоплазменной области. Конденсация электронной компоненты плазмы приводит к зарядению поверхностей пылинок, величиной, равной нескольким тысячам зарядов электронов.

Систематизируем особенности свойств газопылевой плазмы. Понятно, что при инъекции в плазму СВЧ пылеобразного ингредиента, электроны конденсируются на поверхности каждой пылинки в значительно большем количестве, нежели количество конденсирующихся ионов, заряжая её возросшим примерно в 1000 раз коллективным отрицательным зарядом [9, 12]. В дальнейшем поле отрицательного заряда пылинок начинает препятствовать приближению к ним электронов вплоть до полного прекращения их конденсации. Это означает, что со временем наступает предельное насыщение в процессе отрицательного зарядения пылинок. Далее происходит притягивание к окрестности пылинок тяжелых положительных ионов, создающих в указанных областях положительные многозарядные слои, получившие названия «положительные шубы». При этом начинают активизироваться процессы, обратные конденсации электронов, – процессы эмиссии электронного тока с поверхностей пылинок, первоначально приводящие к снижению их отрицательных зарядов, а затем к образованию положительной заряженности вследствие наступления дефицита здесь электронов. Эмитирующие из поверхностей пыли электроны осуществляют нейтрализацию положительных шуб. С некоторого значения напряженности положительного электростатического поля, процессы перезарядки пылинок повторяются вновь, что означает формирование осцилляции заряженности пылевой составляющей плазмы. Поскольку процессы осцилляции заряженности каждой отдельно взятой пылинки протекают не синхронно, то одномоментное существование как положительно, так и отрицательно заряженных частиц пылевой составляющей плазмы приводит к усилению структурирования среды, т.е. к значительному увеличению сил электростатического сцепления частиц, имеющих положительные заряды, с частицами, заряженными отрицательно. Указанное физическое явление в пылевой плазме приводит к повышению сохранения плазменного образования в космическом пространстве вследствие существенного увеличения сил, препятствующих его рассеянию.

Создание и сохранение электрически «вязкой» среды, находящейся в непрерывном движении, необходимо для повышения устойчивости нового искусственного образования, состоящего из «сращенной» совокупности фрагментов космического мусора и окружающей этот мусор генераторной газоплазменной среды, т.е. ИПО.

Экспериментальные исследования показали, что упорядоченные пылевые образования наблюдались в разных типах плазмы: газоразрядной, термической, ядерно-возбуждаемой. Во всех случаях главной причиной образования упорядоченных пылевых структур является электрический заряд. Причем заряд пылинок может быть изначально не только отрицательным, но и положительным из-за ультрафиолетового облучения частиц, как результата фотоэлектронной эмиссии с их поверхностей [13, 14].

Одновременно будут протекать и другие процессы упорядочения структуры плазменной пылевой среды вплоть до образования кристаллической (кулоновской) плазмы [15]. Например, процесс смещения электронов, находящихся на поверхностях пылинок, на удаленную часть этих поверхностей от приближающихся к ним соседних пылинок, тоже имеющих отрицательный заряд. Такое смещение приведет к созданию частиц-диполей, имеющих с одной стороны пылинок положительный потенциал, а с другой отрицательный. Ориентация соседних частиц сторонами с противоположными знаками друг к другу также приведет к их упорядоченному сцеплению за счет электростатических сил. Указанные обстоятельства позволяют прогнозировать образование электростатических связей между разноименными зарядами, приводящих к нейтрализации зарядов пылинок в момент их соединения в упорядоченную структуру.

Так формируется стабильная структура, состоящая из пылевых частиц, т.е. структурированная плазма. Как видим, в газопылевой плазме самоорганизуются процессы «сращивания плазменной среды» в единую материальную структуру, способную противостоять рассеянию аэродинамическими воздействиями остаточной атмосферы на околоземных орбитах [16]. Это позволяет использовать искусственные плазменные образования, имеющие на несколько порядков большие миделевые сечения, чем у совокупности фрагментов КМ, для «окутывания» ими космического мусора с целью его термической утилизации в плотных слоях атмосферы Земли.

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

### **Повышение электрических и магнитных взаимодействий составляющих плазмы за счет увеличения степени ионизации ингредиентов собственной внешней атмосферы**

Для заполнения пустот между отдельными элементами монолитной или разделившейся конструкции КА плазменной средой, повышающей эффективность его аэродинамического торможения за счет увеличения диаметра образованного ИПО (утилизируемого объекта), в конструкции аппарата должно быть предусмотрено наличие генератора мелкодисперсных частиц (МДЧ). Генератор создает газопылевую среду, заполняющую пустоты и, кроме того, увеличивающую диаметр искусственного образования за счет окружения космического мусора снаружи. Подвергаясь ионизации под воздействием радиации космического пространства, а также источников излучений, находящихся в составе бортовых систем КАУ или в числе ингредиентов ИПО, указанное плазменное образование осуществляет «сращивание» газопылевого окружения с элементами утилизируемых конструкций вследствие генерации между ними электростатических и магнитных взаимодействий. С целью активации ионизационных процессов в состав генерируемой среды вводят легкоионизируемые щелочные и щелочноземельные вещества. Известны способы эжектирования в ИПО таких элементов, как Li, Ba, Na, Cs, при использовании их в качестве наполнителей или компонентов термитных смесей, создающих плазменные образования в виде космических облаков, что подтверждает освоенность данной технологии.

В случае необходимости усилить электростатическое взаимодействие ингредиентов ИПО для повышения способности газопылевой плазмы удерживаться в окружении КМ, что особенно важно при увеличивающейся интенсивности аэродинамического воздействия следов земной атмосферы при уменьшении высоты, можно использовать дополнительно к космическому ионизирующему излучению воздействие искусственно созданной радиации генераторной среды [17]. Способом такого форсирования процессов ионизации в создаваемом искусственном плазменном образовании является добавление к генераторным средам пылевых присадок радиоактивных веществ, излучающих сильно ионизирующие нейтронные и электромагнитные потоки. Установлено, что некоторые радиоактивные вещества обладают замечательным свойством: без всякого вмешательства со стороны непрерывно самопроизвольно испускать нейтроны и жесткое электромагнитное излучение (гамма-излучение), являющиеся сильными ионизаторами среды ИПО [18].

В качестве источников ионизирующих излучений можно использовать следующие спонтанно излучающие долгоживущие изотопы:

- Калифорний 252 (непосредственное расщепление);
- Plutonium-238-beryllium, plutonium-239-beryllium или бериллий америция;
- Сурьма (Sb) в стабильных изотопах.

Специалисты считают, что калифорниевые источники имеют неоспоримые преимущества по сравнению с множеством других нейтронных источников, поскольку при крайне малом массовом количестве они обеспечивают большой нейтронный поток.

Следует также учесть, что для указанных целей можно использовать подходящие по периоду полураспадов измельченные вещества отработанных топливных элементов и других радиоактивных отходов, подлежащих утилизации в местах «захоронения» [19]. Опыт, полученный при испытаниях атомных бомб и ядерных реакторов в космическом пространстве, показал, что при входе в плотные слои земной атмосферы происходит мощное термическое воздействие, при котором измельченные радиоактивные вещества превращаются в пар и рассеиваются на большие площади, незначительно повышая природный радиационный фон.

С целью повышения эффективности нейтронов при возбуждении ими химических и ядерных превращений в среде ИПО необходимо предусмотреть использование в генераторном наполнении присадок химических соединений, содержащих водород, например, тяжелой воды. Ядро атома водорода состоит из одного протона, масса которого приблизительно равна массе нейтрона. Поэтому при взаимодействии с налетающим быстрым нейтроном осуществляется эффективный энергообмен, приводящий к замедлению нейтрона и, как следствие, к значительному увеличению вероятности его захвата другими встречающимися ядрами. Захваты нейтронов способствуют образованию радионуклидов всех веществ, которые, в свою очередь, испускают ионизирующие радиационные излучения, проводящие к заметному увеличению концентрации заряженных частиц в ИПО.

Создание условий для осуществления замедления нейтронной компоненты ИПО позволяет использовать в его объеме процесс формирования реакции превращения стабильного природного урана-238 в спонтанно излучающий радиацию плутоний-239. Организация такого процесса позволяет получать радиоактивное вещество в ИПО на протяжении всего периода его баллистического полета к плотным слоям атмосферы. С целью осуществления указанного превращения в состав генераторных газопылевых веществ в виде мелкодисперсной присадки должен быть добавлен природный уран-238. Наличие в составе ИПО водородсодержащего замедлителя нейтронов позволяет активировать интенсивность протекания такой ядерной реакции.

Кроме того, для усиления электрических взаимодействий в объеме искусственного плазменного образования следует произвести инъекцию в его среду легкоионизируемых щелочных и щелочноземельных газопылевых веществ, способных создавать высокую степень ионизации плазмы, а значит получать значительные величины зарядов на твердых фрагментах КМ [20].

Выполнена приближенная оценка эффективности данного способа утилизации космического мусора. Известно, что воздействие аэродинамических сил следов атмосферы, вследствие их малости, приводит к снижению и утилизации в плотных слоях атмосферы КА, отработавших свои сроки на орбите функционирования высотой 800 км, только через ~300 лет. При увеличении площади миделева сечения этого объекта космического мусора на два порядка, осуществленного с помощью ИПО с упрочненными кулоновскими связями частиц среды, время очистки околоземного пространства составит приблизительно три года.

В последние 15 лет стало известным еще одно уникальное свойство газоплазменной среды, способствующее её структурированию в условиях невесомости. В невесомости динамические взаимодействия частиц в плазме могут привести к структурированию новых плазменных образований до жидкого и даже кристаллического состояния, формирующихся в результате появления значительных по величине электростатических сил.

Эксперименты в условиях микрогравитации убедительно подтвердили, что пылевая плазма по своей структуре становилась кристаллической или проявляла свойства жидкостей. В отличие от идеального газа, в котором молекулы движутся хаотично (см. тепловое движение), пылевая плазма, будучи изначально газом, проявляет свойства твердых и жидких тел. Очевидно, что вследствие большого заряда пылевых частиц потенциальная энергия их электростатического взаимодействия может превышать тепловую энергию пылинок. Тем самым появляется возможность усиления взаимодействия ближнего порядка и даже кристаллизации в системе пылевых частиц.

Кроме этого, показано, что дополнительно к природным явлениям ионизации газопылевой среды можно использовать искусственные воздействия ионизирующих излучений, например воздействия с помощью ультрафиолетового лазера. Указанные процессы формирования искусственных плазменных образований (рис. 1) предлагается осуществлять с помощью специализированного космического аппарата утилизации орбитального мусора, в составе которого используется ядерная энергетическая установка (присужден патент на изобретение).

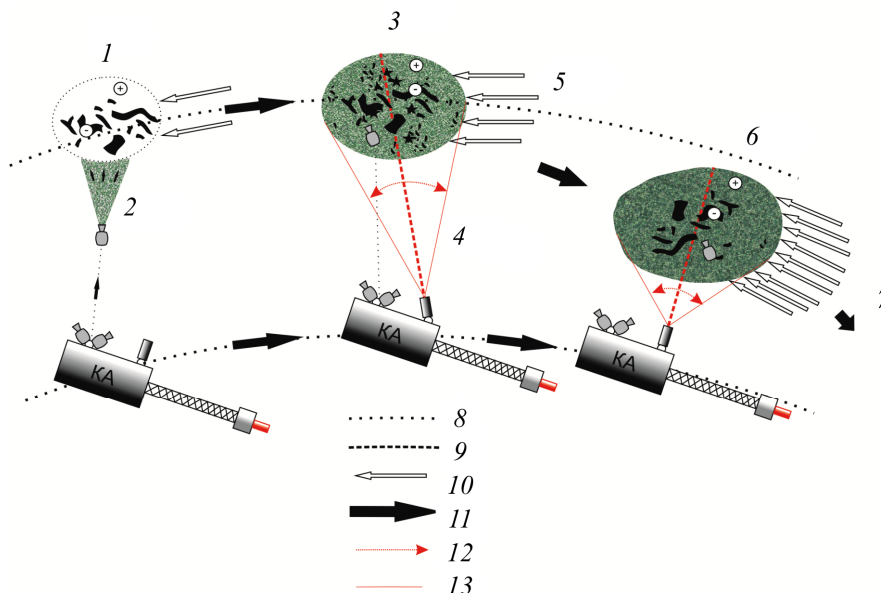


Рис. 1. Способ утилизации космического мусора с помощью искусственного плазменного образования: 1 – группа объектов космического мусора (облако КМ), 2 – направленный поток газопылевой среды из генератора мелкодисперсного образования (МДО); 3 – искусственное плазменное образование: фрагменты космического 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 объектов: 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

Однако реализация метода очистки орбит от космического мусора при использовании сопровождения ИПО аппаратом утилизации требует больших материальных затрат по сравнению с описанным выше способом. Данное обстоятельство предопределило разработку способа утилизации КМ с самоионизирующимся ИПО. Использование такого способа (рис. 2) позволяет значительно увеличить производительность целевого функционирования КАУ.

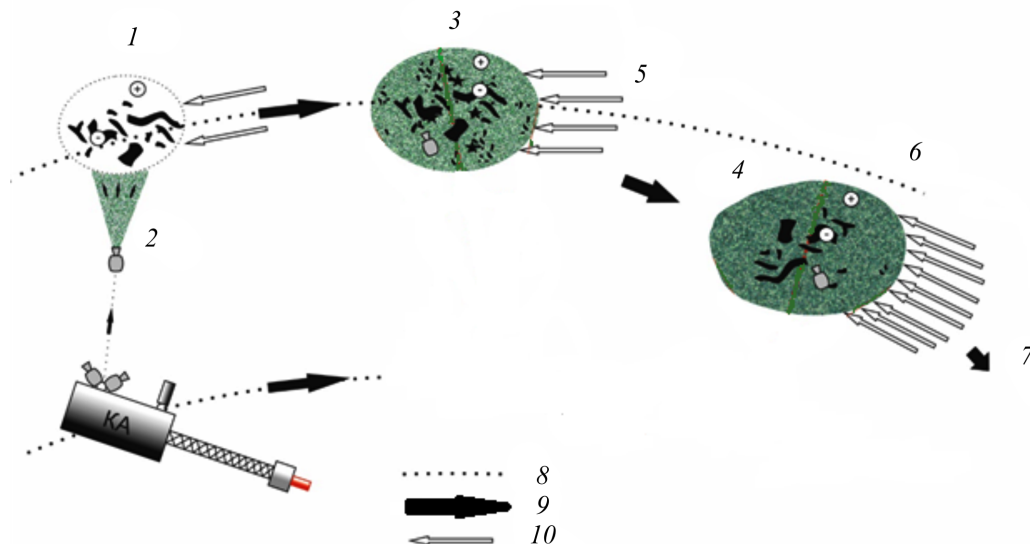


Рис. 2. Способ утилизации космического мусора с помощью самоионизирующегося искусственного плазменного образования: 1 – группа объектов космического мусора (облако КМ), 2 – направленный поток МДЧ из генератора МДО; 3 – искусственное самоионизирующееся плазменное образование; 4 – сход облака с орбиты; 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

В приведенном способе используется генератор газопылевой среды, в корпусе которого располагаются газовые баллоны высокого давления со сжатыми пылеобразными веществами (рис. 3).

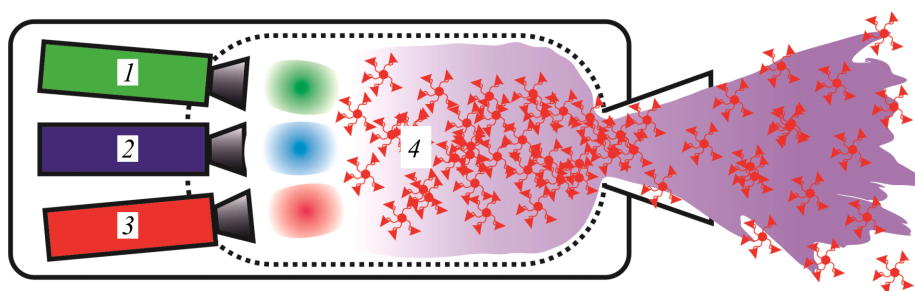


Рис. 3. Схема генератора мелкодисперсного образования с присадкой радионуклидов и изображением радиационно-ионизирующих процессов в среде газопылевого генераторного наполнения: 1 – компонент, содержащий водород; 2 – спонтанно излучающие нейтроны радионуклиды и диспергированный пылеобразный природный  $U_{238}$ ; 3 – компоненты мелкодисперсных образований с низким потенциалом ионизации (щелочные и щелочноземельные вещества); 4 – камера генератора

В результате смешения ингредиентов газоплазменной среды в камере генератора и образования избыточного давления происходит истечение полученной субстанции из генератора в облако космического мусора.

Стрелками показаны процессы спонтанных радиационных излучений радионуклидов и явлений деактивации, возбужденных ими ядер веществ, совокупность которых приводит к устойчивой ионизации атомов всех ингредиентов газопылевой среды в течение срока баллистического перелета ИПО с космическим мусором к плотным слоям земной атмосферы.

### Заключение

Исследования физических процессов, протекающих в сложных технических системах космического базирования, позволили обнаружить и обосновать явления силового взаимодействия фрагментов космического мусора с собственной внешней атмосферой, в данном способе – искусственно созданной плазменной газопылевой средой. Силовое кулоновское взаимодействие сопряжено с образованием разности электрических потенциалов между средой в объеме СВА и поверхностями твердых объектов космического мусора. Такая селекция зарядов обусловлена более интенсивной конденсацией легкой, а значит быстро движущейся электронной компоненты плазмы, на поверхностях твердых объектов, по сравнению с потоками тяжелых, т.е. медленных, ионов или положительно заряженных частиц пыли, также устремленных на эти поверхности.

Специальное устройство револьверного или обоймного типов, установленное на корпусе КАУ с ядерной энергетической установкой (см. рис. 1 и 2), отстреливает газодинамический генератор мелкодисперсного образования (МДО) в направлении группы объектов космического мусора 1. При полёте к скоплению фрагментов КМ генератор выпускает направленное мелкодисперсное облако 2, в результате чего формируется ИПО, состоящее из совокупности макроскопических и микроскопических ингредиентов, прочно «связанных» друг с другом кулоновскими силами. При действии сил аэродинамического сопротивления остаточной земной атмосферы указанное плазменное образование не разделяется на отдельные фрагменты. Таким образом, слияние МДО с облаком космического мусора формирует искусственное плазменное образование, сохраняющее свою структуру, имеющую новую чрезвычайно важную характеристику – его миделевое сечение на несколько порядков превосходит сумму миделевых сечений отдельных объектов КМ. Это приводит к пропорциональному повышению аэродинамической силы торможения ИПО, а значит к существенному сокращению времени его баллистического полета в околоземном пространстве. Для удержания СВА в окружении объектов КМ 3 при движении по орбите в условиях аэродинамического воздействия следов остаточной атмосферы Земли необходимо обеспечить достаточную напряженность электростатического поля разноименных зарядов: отрицательного – на поверхностях твердых тел и положительного – в объеме окружающей их газопылевой плазмы. Сохранение созданной атмосферы является необходимым условием для стабильного поддержания миделевого сечения ИПО большой площади, обеспечивающего интенсивное аэродинамическое торможение плазменного образования 5 с последующей его утилизацией в плотных слоях земной атмосферы 7. С целью повышения прочности «сцепления» составляющих ингредиентов ИПО за счет кулоновских сил в состав МДО вводят легкоионизируемые щелочные и щелочноземельные пылеобразные вещества, способные обеспечивать высокую степень ионизации плазмы, а значит получать повышенные величины зарядов на фрагментах КМ. Известны способы и устройства эжектирования в космос диспергированных элементов: Li, Ba, Na, Cs, при использовании их в качестве наполнителей или компонентов термитных смесей, применяющихся для создания мелкодисперсных облаков. Такие способы и устройства были разработаны и эксплуатировались при проведении космических экспериментов по изучению расположения силовых линий магнитного поля Земли.

Для сохранения необходимой разности потенциалов между объемом СВА и поверхностями твердых объектов космического мусора при увеличивающейся интенсивности аэродинамического воздействия применяется лазерное ультрафиолетовое излучение. Лазер работает в режиме «сканирования» облака с углом 12 и границами конуса 13. Для выполнения указанных операций в составе КАУ предусмотрено требуемое оборудование: устройство способное



навести и отстрелить газодинамический генератор МДО, а также ультрафиолетовая лазерная установка с возможностью наведения на объект и изменения угла воздействия. Однако необходимость исключения операции сопровождения плазменного облака, транспортирующего КМ, с целью значительного повышения производительности орбитального функционирования космического аппарата утилизации, предлагается способ создания ИПО с самоподдерживающейся ионизацией плазменной среды, осуществляемой за счет её наполнения новой совокупностью ингредиентов. В их состав включены следующие газопылевые компоненты:

- радионуклиды, спонтанно излучающие потоки нейтронов и гамма-квантов;
- легко ионизирующиеся щелочные и щелочноземельные металлы, имеющие низкие потенциалы ионизации;
- радиационно стабильный природный уран-238, превращающийся под действием нейтронов в спонтанно делящийся плутоний-239, генерирующий участвующие в ионизации среды ИПО нейтроны и электромагнитные излучения;
- содержащие водород вещества для замедления нейтронов в объеме ИПО с целью активации процесса превращения урана-238 в плутоний-239.

Приведенные в статье способы утилизации орбитального мусора могут быть использованы для очистки космического пространства от техногенного загрязнения, в том числе от фрагментов и обломков космических аппаратов. Способ также может быть использован для уничтожения других опасных космических объектов.

#### Библиографический список

1. Всероссийская конференция с международным участием «Космический мусор. Фундаментальные и практические аспекты угрозы» / Москва ИКИ РАН, 17–19 апреля 2019 г. – 88 с.
2. Вениаминов С.С., Червонова А.М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, НИЦ РКФ ФБУ 4 ЦНИИ МО РФ, 2013. – 208 с.
3. European Space Agency: About space debris [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Debris/About\\_space\\_debris](https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/About_space_debris) (дата обращения: 18.06.2023).
4. National Aeronautics and Space Administration: Space Debris and Human Spacecraft [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/news/orbital\\_debris.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html) (дата обращения: 16.06.2023).
5. Мозжорин Ю.А., Чекалин С.В. Проблема «космического мусора» // Космос и экология. – М.: Знание, 1991. – С. 5–21.
6. Назаренко А.И. Прогноз на 200 лет, синдром Кесслера [Электронный ресурс]. – URL: <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf> (дата обращения: 18.06.2023).
7. В.В. Миронов, И.В. Усовик. Ретроспектива проблемы космического мусора. Ч. 1. Техногенное засорение космического пространства и средства его контроля [Электронный ресурс]. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=kosiss&year=2020&vol=58&iss=2&file=KosIss2002008Mironov.pdf> (дата обращения: 18.06.2023).
8. Игумина В.А., Карючина А.Е., Реховская Е.О. Проблема засорения космоса. – Текст: непосредственный // Исследования молодых ученых: материалы IX Междунар. науч. конф. (г. Казань, апрель 2020 г.). – Казань: Молодой ученый, 2020. – С. 14–17. – URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/368/15725/> (дата обращения: 18.06.2023).
9. Теория проектирования сложных технических систем космического базирования / Н.А. Тестоедов, В.Д. Атамасов, В.А. Бабук и др.; под ред. В.Д. Атамасова, Н.А. Тестоедова, А.П. Ковалева. – СПб.: АНО ЛА «Профессионал»; СПб.: ФГУП «КБ “Арсенал” имени М.В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, СПб. отделение Академии космонавтики РФ имени К.Э. Циолковского, ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева», 2012. – 559 с.
10. Физика космического пространства. Материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. [Электронный ресурс]. – URL: [http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar\\_r6.pdf](http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf) (дата обращения: 15.06.2023).
11. А.И. Акишин. Работоспособность космического оборудования при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата / Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына.
12. 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.

13. Дж. Хаффнер. Ядерное излучение в космосе. – М.: Атомиздат, 1971. – 320 с.
14. Солнечное затмение по заказу // Техника-молодежи. – 1978. – № 5. – С. 21–23.
15. Освоение космоса [Электронный ресурс]. – URL: <http://scorcher.ru/art/science/space/space.php> (дата обращения: 15.06.2023).
16. Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. – СПб.: Гидрометеоздат, 2001. – 273 с.
17. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1979. – 304 с.
18. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли / Н.Д. Филипп, В.Н. Ораевский, Н.Ш. Блаунштейн, Ю.Я. Ружин. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 246 с.
19. Новые явления в космическом эксперименте по созданию искусственного солнечного затмения при совместном полете космических кораблей «АПОЛЛОН» – «СОЮЗ» / А.Г. Мильковский, В.Д. Атамасов, И.В. Колбасин, А.Н. Устинов, А.М. Калинина // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26, № 3. – С. 144–151.
20. Г.Ф. Крымский, С.И. Петухов, С.А. Стародубцев, исследования теории космической плазмы [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-teorii-kosmicheskoy-plazmy/viewer> (дата обращения: 15.06.2023).

### References

1. All-Russian conference with international participation "Kosmicheskii musor. Fundamentalnye i prakticheskiye aspekty ugrozy [Space debris. Fundamental and practical aspects of the threat]". Moscow ICI RAS, April 17-19, 2019, 88 p.
2. Veniaminov S.S., Chervonova A.M. Kosmicheskii musor - ugroza chelovechestvu [Space debris is a threat to humanity]. Moscow: IKI RAS, SIC RKO FBU 4 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2013, 208 p.
3. European Space Agency: About space debris [Electronic resource], – URL: Source: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Debris/About\\_space\\_debris](https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/About_space_debris) (accessed 06/18/2023).
4. National Aeronautics and Space Administration: Space Debris and Human Spacecraft [Electronic resource]. – URL: Source: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/news/orbital\\_debris.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html) (accessed 16.06.2023).
5. Mozzhorin Yu.A., Chekalin S.V. Problema «kosmicheskogo musora» [The problem of "space debris"]. Cosmos and ecology, Moscow: Znanie, 1991, pp. 5-21.
6. Nazarenko A.I. Prognoz na 200 let, sindrom Kesslera [Forecast for 200 years, Kessler syndrome] [Electronic resource]. URL: <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf> (accessed 06/18/2023).
7. V.V. Mironov, I.V. Usovik. Retrospektiva problemy kosmicheskogo musora. chast 1. tekhnogennoye zasoreniye kosmicheskogo prostranstva i sredstva yego kontrolya [A retrospective of the space debris problem. Part 1. technogenic contamination of outer space and means of its control] [Electronic resource]. URL: Source: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=kosiss&year=2020&vol=58&iss=2&file=KosIss2002008Mironov.pdf> (accessed 06/18/2023).
8. V.A. Iguminova, A.E. Karyuchina, E.O. Rekhovskaya. Problema zasoreniya kosmosa [The problem of space clogging]. Research of young scientists: materials of the IX International Scientific Conference (Kazan, April 2020), Kazan: Young Scientist, 2020, pp. 14-17, URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/368/15725/> (accessed: 06/18/2023).
9. N.A. Testoyedov, V.D. Atamasov, V.A. Babuk et al. Teoriya proyektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo bazirovaniya [The theory of designing complex technical space-based systems]. St. Petersburg: ANO LA "Professional", St. Petersburg: FSUE "KB "Arsenal" named after M.V. Frunze", Baltic State Technical University. D.F. Ustinov Voenmeh University, St. Petersburg Department of the K.E. Tsiolkovsky Academy of Cosmonautics of the Russian Federation, Academician M.F. Reshetnev ISS OJSC, 2012, 559 p.
10. Fizika kosmicheskogo prostranstva. Materialy teoreticheskikh i eksperimentalnykh issledovaniy, vypolnennykh v nauchno-issledovatel'skom institute yadernoy fiziki imeni D.V. Skobel'syna [Physics of outer space. Materials of theoretical and experimental studies carried out at the D.V. Skobel'syn Research Institute of Nuclear Physics] [electronic resource]. URL: Source: [http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar\\_r6.pdf](http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf) (accessed 15.06.2023)
11. A.I. Akishin. Rabotosposobnost kosmicheskogo oborudovaniya pri vozdeystvii sobstvennoy vneshney atmosfery apparata [The operability of space equipment when exposed to the vehicle's own external atmosphere]. D.V. Skobel'sin Research Institute of Nuclear Physics.

12. Atamasov V.D., Babuk V.A., Nemykin S.A., et al. Yadernyye orbitalnyye komplekсы [Nuclear orbital complexes]. – St. Petersburg: FSUE "KB "Arsenal" named after M.V. Frunze", 2016, 800 p.
13. J. Haffner. Yadernoye izlucheniye v kosmose [Nuclear radiation in space]. Moscow: Atomizdat, 1971, 320 p.
14. Solnechnoye zatmeniye po zakazu [Solar eclipse on request]. " *Tekhnika-molodezhi* ", 1978, No. 5, pp. 21-23.
15. Osvoyeniye kosmosa [Space exploration] [Electronic resource]. URL: Source: <http://scorcher.ru/art/science/space/space.php> (accessed 15.06.2023)
16. Blagoveshchenskaya N.F. Geofizicheskiye efekty aktivnykh vozdeystviy v okolozemnom kosmicheskom prostranstve [Geophysical effects of active impacts in near-Earth space]. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001, 273, p. 9.
- 17 Yu.A. Kravtsov, Yu.I. Orlov. Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred [Geometric optics of inhomogeneous media]. Moscow: Nauka, 1979, 304 p.
18. N.D. Filip, V.N. Oraevsky, N.S. Blaunstein, Yu. Ya. Ruzhin. Evolyutsiya iskusstvennykh plazmennykh neodnorodnostey v ionosfere Zemli [Evolution of artificial plasma inhomogeneities in the Earth's ionosphere]. Chisinau: Stiinza, 1986, 246 p.
19. Milkovsky A.G., Atamasov V.D., Kolbasin I.V., et al. Novyye yavleniya v kosmicheskom eksperimente po sozdaniyu iskusstvennogo solnechnogo zatmeniya pri sovmestnom polete kosmicheskikh korablye «APOLLON» - «SOYUZ» [New phenomena in the space experiment to create an artificial solar eclipse during the joint flight of the APOLLO-SOYUZ spacecraft]. Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 2019, Vol. 26, No. 3, pp. 144-151.
20. G.F. Krymsky, S.I. Petukhov, S.A. Starodubtsev. Issledovaniya teorii kosmicheskoy plazmy [Studies of the theory of cosmic plasma] [Electronic resource]. URL: Source: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-teorii-kosmicheskoy-plazmy/viewer> (accessed 15.06.2023)

#### Об авторах

**Устинов Александр Николаевич** (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, генеральный директор, ОАО «МЗ “Арсенал”» (Санкт-Петербург, 195009, ул. Комсомола, 1–3, e-mail: [Ustinov@mzarsenal.com](mailto:Ustinov@mzarsenal.com)).

**Иванов Константин Михайлович** (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор, ректор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург, 195009, ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: [bgtu@voenmeh.ru](mailto:bgtu@voenmeh.ru)).

#### About the authors

**Alexander N. Ustinov** (St. Petersburg, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, General Director, Arsenal Machine Building Plant (1–3, Komsomola str., 195009, Saint Petersburg, e-mail: [Ustinov@mzarsenal.com](mailto:Ustinov@mzarsenal.com)).

**Konstantin M. Ivanov** (St. Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (1, 1st Krasnoarmeyskaya str., 190005, St. Petersburg, e-mail: [bgtu@voenmeh.ru](mailto:bgtu@voenmeh.ru)).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 17.08.2023

Одобрена: 01.09.2023

Принята к публикации: 12.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Устинов, А.Н. Радиационное искусственное плазменное образование для очистки околоземных орбит от космического мусора / А.Н. Устинов, К.М. Иванов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 63–73. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.06

Please cite this article in English as: Ustinov A.N., Ivanov K.M. Radiation artificial plasma formation for cleaning near-earth orbits from space debris. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 74, pp. 63-73. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.06