

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ОЧИСТКИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В. А. Кириллов, И. Р. Багатеев, И. С. Тарлецкий, Т. Н. Баландина*, Е. А. Баландин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru

Безопасность полетов космических аппаратов различного назначения определяется множеством факторов, одним из которых является возможность их разрушения или повреждения при случайном соударении с космическим мусором техногенного характера. Космический мусор техногенного характера – это все находящиеся на околоземной орбите космические объекты искусственного происхождения, включая фрагменты или части таких объектов, которые закончили свое активное функционирование.

Исходя из официальных данных, с каждым годом количество объектов космического мусора техногенного характера растет. Объекты космического мусора техногенного характера в случае столкновения с ними могут привести к прекращению всякой деятельности в космосе, поскольку скорость движения этих объектов на разных орбитах может достигать сверхзвуковой. Ввиду особенностей геостационарной орбиты, связанных с неподвижностью космического аппарата относительно подспутниковой точки на Земле, по окончании срока эксплуатации космический аппарат должен быть уведен на орбиту захоронения. Это необходимо для обеспечения возможности установки в данную орбитальную позицию нового космического аппарата. Выход из строя геостационарного космического аппарата делает невозможным использование этой орбитальной позиции в будущем.

Таким образом, актуальность работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью освобождения орбитальной позиции, занятой выработавшим свой ресурс космическим аппаратом, с другой стороны, исключением угрозы столкновения неисправного космического аппарата с действующими.

Представлена информация о запусках космических объектов в околоземное космическое пространство и количестве объектов космического мусора в нем за последние семь лет. Также рассмотрены существующие концепции очистки околоземного космического пространства. Приведены данные по концепции сервисного космического аппарата, разрабатываемой инженерами АО «ИСС» на базе существующих негерметичных платформ для геостационарных космических аппаратов.

Цель данного исследования заключается в проведении анализа существующего техногенного засорения околоземного космического пространства и анализе существующих концепций очистки околоземного космического пространства.

В заключение отмечено, что результаты анализа рассмотренных концепций учтены инженерами АО «ИСС» при разработке концепции сервисного космического аппарата для увода космического мусора из области геостационарной орбиты.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор техногенного характера, околоземное космическое пространство, геостационарная орбита, орбитальная позиция.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 343–351

ANALYSIS OF CLEANING CONCEPTS OF NEAR-EARTH SPACE

V. A. Kirillov, I. R. Bagateev, I. S. Tarleckiy, T. N. Balandina*, E. A. Balandin

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru

The flight safety of the spacecrafts used for different purposes is determined by a great number of factors, one of which is the possibility of their destruction or damage due to a random collision with technogenic space debris. The technogenic space debris is all space objects of artificial origin being in the near-earth orbit, including fragments or parts of such objects, which terminated their active operation.

According to the official data, every year the number of technogenic space debris objects is increasing. The technogenic space debris objects could result in termination of any activity in space as the velocity of these objects in different orbits can reach the supersonic. Taking into account the geostationary orbit peculiarities related to the spacecraft immobility with respect to the subsatellite point on the Earth, the end-of-life spacecraft must be deorbited.

It is necessary in order to provide the possibility to perform positioning of the new spacecraft into this orbital slot. The geostationary spacecraft failure makes the use of this orbital slot impossible in the future.

Thus, the relevance of the work is determined, on the one hand, by the necessity to vacate the orbital position occupied by failed spacecraft, and by the avoidance of risk of failed spacecraft collision with operational spacecrafts, on the other hand.

This paper contains the information concerning the space objects launches into the near-Earth space and the number of space debris objects in it for the last seven years. The current concepts of the near-Earth space clearance are also considered. The paper presents the data on the service spacecraft concept, being developed by engineers of the JSC "ISS" based on existing unpressurized platforms for geostationary spacecrafts.

The objective of this research consists of the analysis of current technogenic clogging of the near-Earth space and the analysis of existing concepts of the near-Earth space cleaning.

In conclusion it is noted that the results of analysis of these concepts are taken into account by engineers of the JSC "ISS" during the development of the service spacecraft intended to remove the space debris from the geostationary orbit area.

Keywords: spacecraft, the technogenic space debris, near-Earth space, the geostationary orbit, orbital slot.

Введение. С начала космической эры всеми космическими державами было осуществлено около 5000 запусков, в результате чего в околоземное космическое пространство (ОКП) было выведено порядка 30000 крупных (более 10 см) космических объектов. На 1 октября 2009 года было зарегистрировано около 33500 объектов [1]. Из них более двух третей все еще остаются на орбитах и контролируются наземными и космическими средствами наблюдения.

К 2012 году на орбитах вокруг Земли реально функционировало 994 космических аппарата (КА). Большинство из них действовало в низкоорбитальной области и на геостационарной орбите (ГСО) (47 % – на низких орбитах, 42 % – на ГСО, остальные – на средних и высокоэллиптических орбитах). Для сравнения, в 2008 году действующих искусственных спутников Земли (ИСЗ) было около 850 КА, и соотношение было большее в пользу ГСО. Из действующих КА (активных, находящихся в резерве, проходящих летные испытания и частично действующих) наибольшие группировки имеют США (446 КА), Россия (135 КА) и Китай (132 КА).

Относительные орбитальные скорости околоземных объектов техногенного происхождения могут достигать 10 км/с, поэтому даже небольшие объекты способны привести к серьезным повреждениям действующих КА. При столкновении образуется огромное количество мелкого космического мусора (КМ). Большинство околоземных объектов техногенного происхождения возникло в результате 175 разрушений КА на орбите. Из них 48 – в результате преднамеренных разрушений КА или разрушений при столкновении различных КА (каталогизировано 2244 объекта КМ), 52 – в результате взрывов двигательных установок (каталогизировано 3558 фрагментов КМ), 7 – в результате неисправностей в системах КА (каталогизировано 618 объектов КМ) [2].

В последнее время было зафиксировано несколько столкновений искусственных спутников в космосе: первое столкновение – это столкновение российского спутника «Космос-2251» с американским спутником Iridium 33 [3]. Столкновение произошло 10 февраля 2009 года. В результате столкновения образовалось около 600 обломков. Второе столкновение – российский микроспутник «Блиц», являющийся частью международной системы лазерного зондирования,

столкнулся с обломком китайского метеоспутника «Фэньюнь-1С».

Согласно разработанным комитетом ООН по космосу Руководящим принципам по предотвращению образования космического мусора и требованиям [4], отработавшие КА должны быть уведены из рабочей зоны орбиты в зону захоронения так, чтобы исключить возможность их столкновения с космическими объектами, которые продолжают работать на орбите, но в реальности это не всегда реализуется. Так, зоной захоронения КА на ГСО является сегмент сферической оболочки ОКП, определяемой из следующих условий: минимальная высота равна высоте геостационарной орбиты минус 200 км; максимальная высота равна высоте геостационарной орбиты плюс 200 км.

По состоянию на 31 августа 2015 г. общее количество находящихся в космическом пространстве и каталогизированных в базах данных автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в ОКП космических объектов техногенного происхождения составило 17250 космических объектов (КО). Из них 1362 КО – это действующие КА, а остальные 15888 КО – КМ.

В последние годы операторы все чаще и чаще получают сообщения об угрозе столкновения функционирующих КА с каталогизированными объектами КМ (размером, как правило, более 10 см). Столкновение КА с таким объектом в лучшем случае повлечет за собой полную или частичную потерю функциональности, а в худшем – сильный взрыв с образованием большого количества новых фрагментов КМ.

Весьма популярной спутниковой орбитой является ГСО. На ней располагаются сотни КА, каждый стоимостью в десятки, а то и в сотни миллионов долларов. В среднем осуществляется порядка 30 запусков КА на ГСО ежегодно. Тенденция заполнения ГСО и орбит с высотой, близкой к ГСО, приведена на рис 1.

Особенностью ГСО является то, что спутник, находящейся на ней, постоянно располагается в одной и той же точке стояния, называемой орбитальной позицией. Выход из строя геостационарного КА делает невозможным использование этой орбитальной позиции в будущем. Одним из таких примеров является потерянный в ноябре 2015 года израильский спутник Amos-5, который в настоящий момент дрейфует по геостационарной дуге и представляет проблемы для

других владельцев геостационарных спутников. Для предотвращения столкновения с такими спутниками необходимо производить их увод в зону захоронения.

Анализ существующих концепций очистки околоземного космического пространства. В настоящее время, с учетом все возрастающей интенсивности использования околоземного космического пространства, рассмотрение возможности его очистки от отработавших КА и фрагментов разрушившихся КА становится весьма актуальным. По данной теме предлагается широкий спектр различных технических устройств, которые могут обеспечить увод элементов КМ на безопасные орбиты или их спуск в атмосферу Земли. В качестве возможных методов очистки ОКП от отработавших КА могут рассматриваться концепции использования космических буксиров, захвата КА с помощью сети, разворачивания солнечного паруса в конце срока активного существования (САС), ионного пучка и др.

1. Проект CleanSpace (Swiss Space Center). Швейцарский космический центр разрабатывает систему захвата КМ механическим путем [5]. CleanSpace выходит в окрестность своей цели, ему нужно захватить и стабилизировать ее, используя специальный механизм захвата. Как только это будет сделано, CleanSpace возвращается в атмосферу Земли, где эти два спутника сгорают. Захват CleanSpace с КМ представлен на рис. 2.

2. Harpoon (Astrium UK). На рис. 3 представлен пример концепции, предложенной Astrium UK [6]. В ней предполагается, что КА, оснащенный телескопической штангой с гарпуном на конце, сможет захватывать и переводить на орбиты захоронения нефункционирующие КА. Гарпун имеет длину около 30 см. При расстоянии 20 м гарпун фотографирует цель и отправляет снимки на Землю для геометрической оценки. После оценки цели гарпун захватывает и переводит цель на орбиту захоронения.

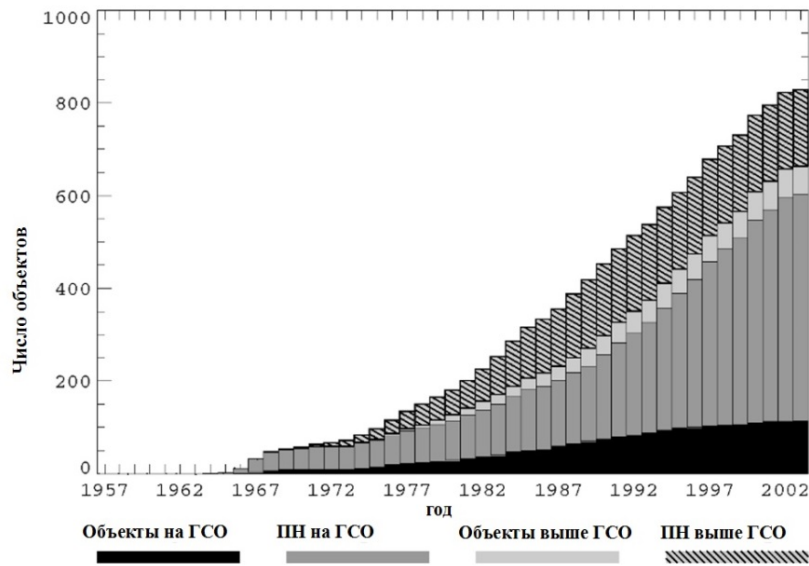


Рис. 1. Тенденция заполнения ГСО и орбит с высотой, близкой к ГСО

Fig. 1. Tendency of filling the geostationary earth orbit and orbits with the height close to GEO



Рис. 2. Проект CleanSpace (Swiss Space Center)

Fig. 2. Project “CleanSpace” (Swiss Space Center)

3. Robotic arm (Deutsch Orbital Servicing Mission). Основная цель состоит в том, чтобы использовать роботизированную руку для обслуживания на орбите (рис. 4) для дальнейшего перевода цели на орбиту захоронения [7].

4. Стальная сеть для сборки космического мусора (Japan Aerospace Exploration Agency). В японском проекте предполагается, что специальный спутник выведет на орбиту и развернет электродинамический трал [8]. Это металлическая сетка длиной 300 метров, шириной 30 сантиметров и толщиной нитей – около 1 миллиметра (рис. 5). Трал будет двигаться по орбите, генерируя магнитное поле и захватывая часть мелкого мусора. Через несколько месяцев «невод» с уловом под воздействием магнитного поля Земли изменит орбиту и войдет в плотные слои атмосферы, где и сгорит.

5. Солнечный парус (National Aeronautics and Space Administration). Установка на спутнике паруса, который при выходе спутника из строя будет раскрываться и, используя давление солнечного света, увести его с орбиты в верхние слои атмосферы Земли, где спутник будет сгорать.

6. Проект ConeXpress (European Space Agency). ConeXpress использует электрический двигатель для перелета с переходной эллиптической орбиты на геостационарную. Перелёт длится приблизительно 6 месяцев и оптимизирован на минимальное время при помощи непрерывного импульса от двух электрических двигателей, работающих одновременно [9]. ConeXpress работает в три этапа: определение позиции, снимок цели и стыковка. Первый этап заключается в определении позиции ConeXpress и клиентского спутника с помощью наземной системы контроля космического пространства. Во время второго этапа ConeXpress фотографирует клиентский спутник для очень точного определения позиции. ConeXpress пристыковывается к одной из сторон спутника-цели (рис. 6) и переводит его на орбиту захоронения. Срок службы ConeXpress зависит от массы клиентского спутника и типа требуемых операций. Как только спутник транспортировали на орбиту захоронения, ConeXpress может расстыковаться со спутником и возвратиться на геостационарную орбиту для работы с другой целью.

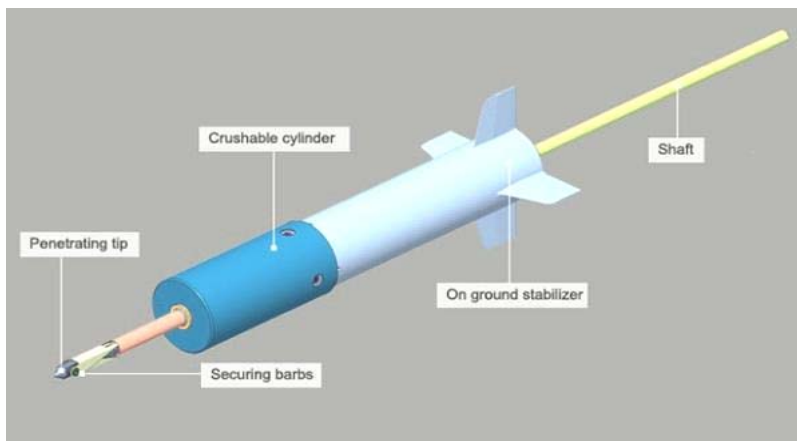


Рис. 3. Концепция Harpoon (Astrium UK)

Fig. 3. Conception “Harpoon” (Astrium UK)

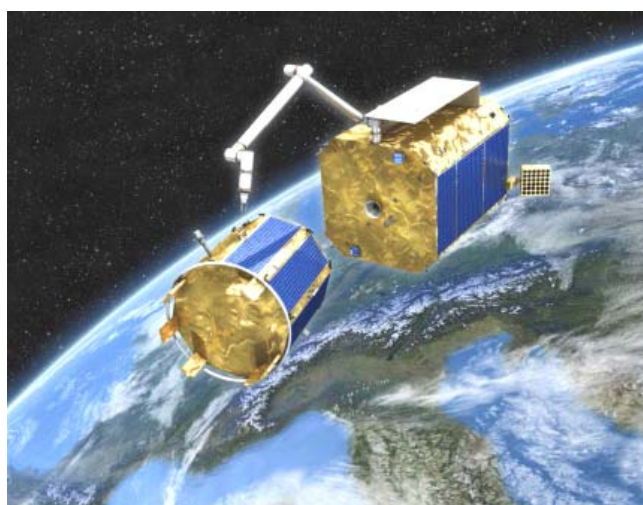


Рис. 4. Стыковка Robotic arm с целью

Fig. 4. Integration “Robotic arm” with the aim

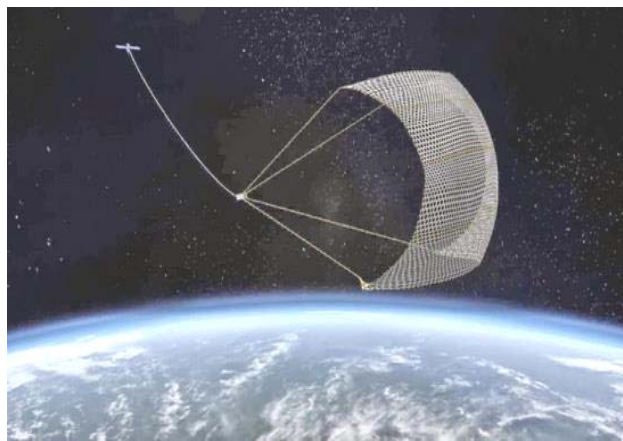


Рис. 5. Стальная сеть для сборки космического мусора

Fig. 5. Steel net for collecting space debris



Рис. 6. Стыковка ConeXpress (слева) с клиентским спутником

Fig. 6. Integration "ConeXpress" (on the left) with the client satellite

7. Продление срока активного существования КА (Orbital ATK). В начале 2016 года компания Orbital ATK анонсировала подписание с компанией Intelsat контракта на оказание услуг по продлению САС КА [10]. Согласно контракту Orbital ATK осуществит производство, тестирование и запуск первого аппарата (Commercial Servicing Vehicle – CSV), который должен будет продемонстрировать возможность коммерческой эксплуатации логистических космических систем. В рамках общего проекта (текущее наименование Mission Extension Vehicle-1 (MEV-1) (рис. 7)) аппарат выполнит ряд орбитальных операций по отработке новой технологии, а затем в 2019 году попытается продлить срок активного существования космических аппаратов спутникового оператора. В части технико-экономических аспектов создаваемой системы компания Orbital обнародовала следующую информацию: платформой обслуживающего аппарата будет выступать GEOSTar; САС аппарата составит около 15 лет; изделие будет ориентировано на выполнение операций по корректировке орбиты аппаратов; КА сможет подсоединяться к другим аппаратам несколько раз; первой операцией аппарата будет перемещение спутника связи компании Intelsat; Intelsat получит право на приоритетный дозаказ дополнительных обслуживающих аппаратов.

8. Использование ионного пучка для увода элементов космического мусора с околоземных орбит. Ионный пучок может быть использован для воздействия на фрагменты КМ или КА в целом с целью увода на орбиты захоронения [11; 12]. Для этого на борту сервисного КА, находящегося в непосредственной близости от КА-цели, генерируется высокоскоростной ионный пучок (рис. 8). Ионы ускоряются до 30 км/с и более, заряд КА нейтрализуется испусканием электронов катодом-нейтрализатором. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность КА-цели, воздействует на него с некоторой силой, величина которой примерно равна величине тяги источника ионов.

В табл. 1 представлен анализ недостатков предложенных различными мировыми организациями сценариев увода КМ из ОКП.

Концепция сервисного космического аппарата для увода объектов космического мусора с геостационарной орбиты, разрабатываемая инженерами АО «ИСС». В последнее десятилетие подавляющее количество отечественных спутников связи и ретрансляции, предназначенных для работы на ГСО, разработаны и изготовлены на базе негерметичных платформ среднего класса семейства «Экспресс-1000Н».

Модульный принцип построения, достигнутые функциональные и технические характеристики платформы позволяют не только создавать на ее базе целый ряд спутников связи и ретрансляции, но и использовать ее в качестве основы для создания сервисного КА для очистки области ГСО от КМ. Сервисный КА предназначен для многократного выполнения операций по уводу крупногабаритных объектов КМ, к которым относятся нефункционирующие КА и отработанные разгонные блоки. Увод КМ осуществляется посредством воздействия ионного пучка, генерируемого источником, размещаемым на сервисном КА. Реализация технологии бесконтактного воздействия позволяет избежать ряда сложностей, неизбежных при жестком или гибком механическом соединении сервисного КА и КМ, описанных в табл. 1.

Функционирование сервисного КА на ГСО включает в себя следующие этапы:

1) режим ожидания сервисного КА в заданной орбитальной позиции на ГСО;

2) перевод сервисного КА из позиции ожидания в область нахождения КМ и выполнение маневра сближения;

3) выполнение процедур инспекции КМ для оценки его основных динамических и геометрических параметров;

4) «прицеливание» ионного пучка в условный центр масс КМ;

5) увод КМ из области ГСО на орбиту захоронения;

6) возвращение с орбиты захоронения в область нахождения следующего КМ или переход в режим ожидания на орбите захоронения.

Выдача импульсов тяги для орбитального движения связки «сервисный КА – КМ» осуществляется двумя одновременно работающими электроракетными холловскими двигателями. Они же одновременно являются двигателями для компенсации противоимпульса со стороны ионного пучка. Регулирование результирующей тяги осуществляется посредством установки двигателей на двухступенные поворотные платформы.

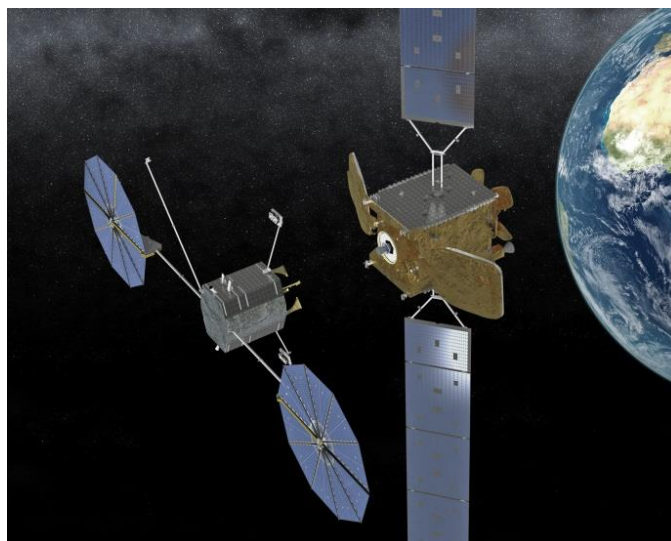


Рис. 7. Стыковка КА CSV (слева) компании Orbital ATK к спутнику связи компании Intelsat

Fig. 7. Integration KA "CSV" (on the left) with the communication satellite of the Intelsat company

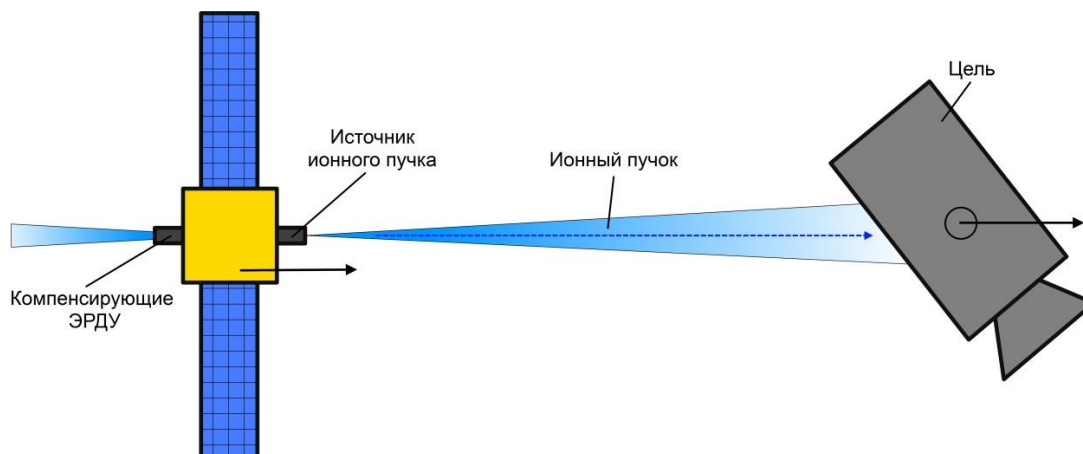


Рис. 8. Схема воздействия ионного пучка на фрагмент КМ

Fig. 8. Scheme of the impact of ion beam on the fragment KM

Концепция сервисного КА основывается на применении (в качестве сервисного модуля) модернизированной платформы «Экспресс-1000», сопряженной с целевым модулем, включающим источник ионного пучка. В настоящее время инженерами АО «ИСС» ведется проработка вопросов детализации данной концепции в части определения компоновочного облика сервисного КА, состава и характеристик служебных систем, а также алгоритмов их функционирования и взаимодействия при выполнении целевой

миссии, интеграции средств бесконтактного воздействия с обеспечивающими и управляющими системами.

На рис. 9 представлен предварительный облик сервисного КА на базе негерметичной платформы «Экспресс-1000».

В табл. 2 представлены предварительные технические характеристики сервисного космического аппарата [13–15]. Схема взаимного расположения сервисного КА и объекта КМ в процессе выполнения целевой миссии представлена на рис. 10.

Таблица 1

Недостатки существующих концепций увода космического мусора

Сценарий увода КМ	Недостатки
Использование космического буксира: проект CleanSpace (Swiss Space Center), Harpoon (Astrium UK), проект ConeXpress (European Space Agency), Robotic arm (Deutsche Orbital Servicing Mission)	Данный сценарий подразумевает использование жесткого сцепления сервисного космического аппарата с объектом КМ. При таком виде сцепления, с учетом минимальности расстояний, возможно столкновение двух объектов, что приведет к увеличению засоренности ОКП. Так как КМ может иметь неконтролируемое вращение, это существенно осложняет необходимую конструкцию манипулятора и саму возможность применения метода буксировки
Захват КА с помощью сети: захват КА сетью (Robotic Geostationary Orbit Restorer), стальная сеть для сборки космического мусора (Japan Aerospace Exploration Agency)	Сеть также является жестким сцеплением, а использование сетки с магнитным полем подразумевает увод намагничиваемых металлических объектов с ОКП, но современные КА выполнены из сплавов алюминия и композитов. Неконтролируемое вращение объекта КМ делает невозможным применение сети
Солнечный парус: солнечный парус (National Aeronautics and Space Administration)	Большие временные затраты на перевод КА с ГСО на новую орбиту в конце САС. Солнечный парус является дополнительной конструкцией в составе КА, а следовательно, это ведет к уменьшению массы полезной нагрузки. Применение солнечного паруса требует функциональной исправности системы управления спутника
Продление САС: проект Mission Extension Vehicle-1 (MEV-1)	Необходимо, чтобы аппарат обладал возможностью стыковки с уже существующим изделием
Использование ионного пучка: проект Clean Space One от Федеральной политехнической школы Лозанны, США (EPFL); Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal от Мадридского политехнического университета	Транспортировка в ионном пучке позволяет уводить крупные элементы КМ, в том числе вращающиеся, без необходимости стыковки с ними, однако при этом увеличиваются требуемые затраты рабочего тела для маневров. Также есть определенная проблема в удержании удаляемого объекта в струе ионной пушки

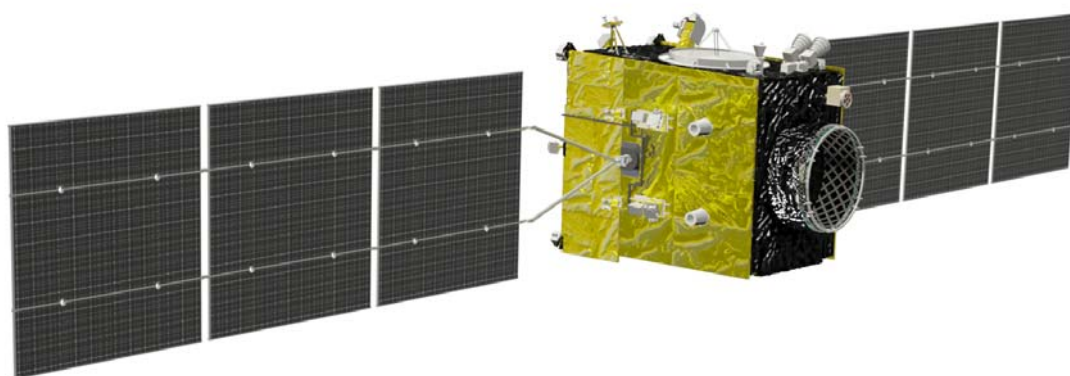


Рис. 9. Предварительный облик сервисного КА на базе негерметичной платформы «Экспресс-1000»

Fig. 9. Preparatory view of the service spacecraft on the basis of non-tight platform “Express-1000”

Предварительные характеристики сервисного КА

Масса сервисного КА на ГСО, кг	1500
Максимальный запас ксенона, кг	300
Потребляемая электрическая мощность целевой аппаратуры, не менее, Вт	3000
САС, не менее, лет	15
Точность удержания в орбитальной позиции ожидания, градусы	$\pm 0,05$
Точность ориентации СОС, градусы	$\pm 0,07$
Количество циклов увода космического мусора	20
Основные параметры источника ионного пучка	
Тяга, мН	50
Потребляемая электрическая мощность, Вт	2200
Основные параметры компенсирующей ЭРДУ	
Количество двигателей ЭРДУ	2
Максимальная тяга одного двигателя, мН	40
Удельный импульс, не менее, с	1860

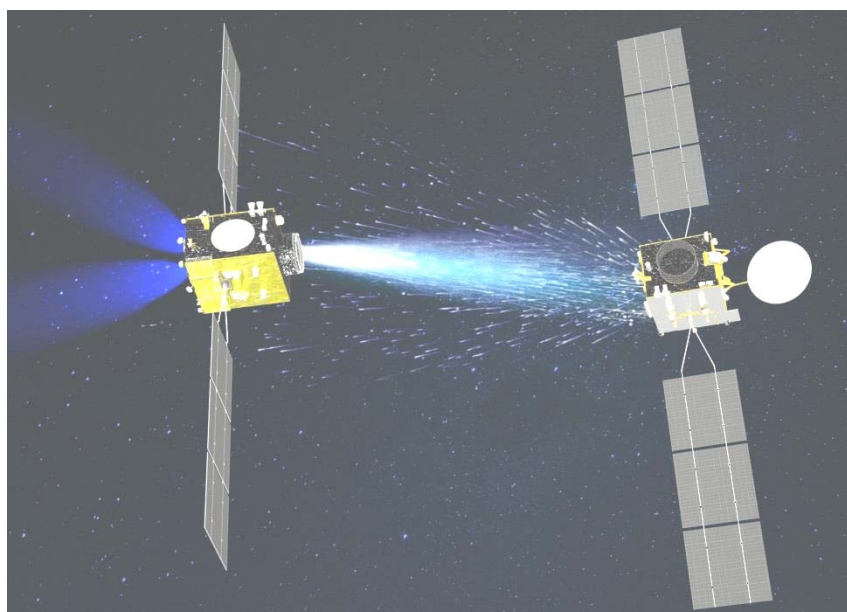


Рис. 10. Схема расположения сервисного КА и объекта КМ

Fig. 10. Scheme of the location of the service spacecraft KA and the item KM

Заключение. В результате проведенного исследования были проанализированы существующие мировые концепции по уводу КМ. Для различных типов орбит могут применяться различные методы очистки от объектов техногенного засорения. В частности, для очистки ГСО перспективным представляется метод бесконтактного воздействия на удаляемый объект. В настоящее время инженерами АО «ИСС» ведутся работы по исследованию проектного облика сервисного КА с бесконтактными средствами воздействия для увода КМ из области ГСО. С учетом возможных к реализации сценариев увода ОКМ из защищаемой области ГСО был сделан вывод о применимости для сервисного КА технического задела, полученного при создании КА связи и ретрансляции на ГСО, имеющих модульный принцип построения. Данный принцип построения КА используется в течение многих лет в АО «ИСС». Разработано и реализовано несколько поколений платформ и космических аппаратов различного назначения, созданных на их основе.

Библиографические ссылки

1. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства / И. Р. Багатеев [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 14–15.
2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М. : Университетская книга, 2009. 104 с.
3. Угрозы для спутников более чем реальны [Электронный ресурс]. URL: http://www.infox.ru/authority/defence/2009/02/12/iridium_strela.phtml. (дата обращения: 18.04.2016).
4. ГОСТ Р 52925–2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 2009-01.01. М. : Стандартинформ, 2008. 5 с.

5. Clean Space One [Электронный ресурс]. URL: <http://espace.epfl.ch/>. (дата обращения: 18.04.2016).

6. Astrium Explores Space Debris Harpoon [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spacesafetymagazine.com/media-entertainment/atrium-explores-space-debris-harpoon/>. (дата обращения: 18.04.2016).

7. On Orbit Servicing [Электронный ресурс]. URL: <http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2013/2013iaf-05E.pdf>. (дата обращения: 18.04.2016).

8. JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. [Электронный ресурс]. URL: <http://global.jaxa.jp/>. (дата обращения: 18.04.2016).

9. ConeXpress Orbital Life Extension Vehicle – ESA [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin127/bul127h_caswell.pdf. (дата обращения: 18.04.2016).

10. Pioneers In Space: Orbital ATK Announces Intelsat As Anchor Customer For New Satellite Life Extension Service [Электронный ресурс]. URL: <http://www.intelsat.com/intelsat-news/pioneers-in-space-orbital-atk-announces-intelsat-as-anchor-customer-for-new-satellite-life-extension-service/> (дата обращения: 16.04.2016).

11. Claudio Bombardelli, Jesus Peláez. Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal // *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2011. Vol. 31, No. 3. P. 916–920.

12. S. Kitamura. Large space debris reorbiter using ion beam irradiation // IAC-10-A6.4.8: 61st International Astronautical Congress. Prague, CZ, 2009.

13. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

14. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М. : Бином, 2013. 407 с.

15. Внуков А. А., Рвачёва Е. И. Предпосылки и перспективы создания полностью электрореактивных космических аппаратов для работы на геостационарной орбите // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 4 (56). С. 140–146.

References

1. Bagateev I. R., Tarletskiy I. S., Balandina T. N., Balandin E. A. [Analysis of cleaning concepts of near-Earth space]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Proceed. of XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2016, P. 14–15 (In Russ.).

2. Novikov L. S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of solid of natural and artificial origin on the spacecraft]. Moscow, University book Publ., 2009, 104 p.

3. *Ugrozy dlya sputnikov bolee chem real'ny* [Threats to the satellites are more than real] (In Russ.). Available at: http://www.infox.ru/authority/defence/2009/02/12/iridium_strela.phtml. (accessed 18.04.2016).

4. GOST R 52925–2008. *Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogennoy zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* [State Standard R 52925–2008. Space technology items. General requirements for mitigation of near-Earth space debris population]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 5 p.

5. Clean Space One. Available at: <http://espace.epfl.ch/> (accessed 18.04.2016).

6. Astrium Explores Space Debris Harpoon. Available at: <http://www.spacesafetymagazine.com/media-entertainment/atrium-explores-space-debris-harpoon/>. (accessed 18.04.2016).

7. On Orbit Servicing. Available at: <http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2013/2013iaf-05E.pdf>. (accessed 18.04.2016).

8. JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. Available at: <http://global.jaxa.jp/> (accessed 18.04.2016).

9. ConeXpress Orbital Life Extension Vehicle – ESA. Available at: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin127/bul127h_caswell.pdf (accessed 18.04.2016).

10. Pioneers In Space: Orbital ATK Announces Intelsat As Anchor Customer For New Satellite Life Extension Service. Available at: <http://www.intelsat.com/intelsat-news/pioneers-in-space-orbital-atk-announces-intelsat-as-anchor-customer-for-new-satellite-life-extension-service/> (accessed 16.04.2016).

11. Claudio Bombardelli, Jesus Peláez. Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2011, Vol. 31, No. 3, P. 916–920.

12. S. Kitamura. Large space debris reorbiter using ion beam irradiation, IAC-10-A6.4.8. 61st International Astronautical Congress, Prague, CZ, 2009.

13. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibSau Publ., 2011, 488 p.

14. Сихарулидзе Ю. Г. *Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov* [Ballistics and guidance of aircraft]. Moscow, Binomial Publ., 2013, 407 p.

15. Vnukov A. A., Rvachyova E. I. [Backgrounds and trends of all-electric propulsion geostationary satellites creation]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No 4 (56), P. 140–146 (In Russ.).

© Кириллов В. А., Багатеев И. Р., Тарлецкий И. С., Баландина Т. Н., Баландин Е. А., 2017