

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР: АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ

*Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: aalpatov@ukr.net*

Метою роботи є системний аналіз технологічних особливостей відведення фрагментів космічного сміття (КС) з робочих орбіт. Нові результати відображають можливість зміни концепції боротьби з забрудненням навколоземного космічного простору. Суть полягає в забезпеченні можливості утилізації космічного сміття (КС) замість його знищення. В статті виконано короткий аналіз різних аспектів проблеми боротьби з КС в навколоземному космічному просторі. Розглянуто різні методи і засоби запобігання утворенню КС і зменшення його кількості. Сформульовано наукові завдання, що виникають при розробці різних засобів і методів боротьби з забрудненням ближнього космосу.

Целью работы является системный анализ технологических особенностей увода фрагментов космического мусора (КМ) с рабочих орбит. Новые результаты отражают возможность изменения концепции борьбы с загрязнением околоземного космического пространства. Суть состоит в обеспечении возможности утилизации космического мусора (КМ) вместо его уничтожения. В статье выполнен краткий анализ различных аспектов проблемы борьбы с КМ в околоземном космическом пространстве. Рассмотрены различные методы и средства предотвращения образования КМ и уменьшения его количества. Сформулированы научные задачи, возникающие при разработке различных средств и методов борьбы с загрязнением ближнего космоса.

The aim of this work is a system analysis of the engineering features of the deorbiting of space debris fragments. New results reflect a possibility to change the concept of near-Earth space debris mitigation from space debris elimination to space debris utilization. The paper presents a brief analysis of different aspects of the problem of space debris mitigation in near-Earth space. Different methods and means to prevent the space debris formation and to reduce space debris population are considered. Scientific problems involving the development of methods and means for near-Earth space debris mitigation are formulated.

Ключевые слова: космический мусор, защита космического аппарата, очистка околоземного пространства, тросовые системы, увод космического мусора, активное удаление, кластер, орбита утилизации.

Общие замечания. Под термином "космический мусор, space debris" (КМ) обычно понимают космические объекты как искусственного, так и естественного происхождения, прекратившие работу объекты космической техники и их фрагменты, а также объекты, попавшие в околоземное пространство из глубин далекого космоса. И те, и другие несут опасность функционирующим космическим комплексам. Более значимую часть представляют объекты антропогенного происхождения, именно они делают проблему борьбы с загрязнением космического пространства особенно актуальной [1].

В настоящее время на орбитах с высотами до 2000 км летают несколько сотен тысяч фрагментов космического мусора (ФКМ). Оценки количества ФКМ зависят от размеров учитываемых фрагментов. Столкновение обитаемых станций и космических аппаратов (диапазон относительных скоростей до 16 км/с и, соответственно, огромные запасы кинетической энергии) с фрагментами КМ приводит к катастрофическим последствиям.

Особенно высока плотность КМ на так называемых рабочих орбитах: тех, которые максимально соответствуют функциональному назначению космического аппарата (КА). Это три диапазона высот орбит (300–800) км, (1500–2000) км и 36000 км [1].

Существуют различные подходы к классификации КМ: по размерам, функциональным особенностям, по орбитам, по конфигурации, по массам.

© А. П. Алпатов, 2018

Используя сложившиеся подходы, можно указать техногенные объекты различного состояния и облика. К ним относятся функционирующие КА, неразрушенные нефункционирующие КА, фрагменты разрушенных космических объектов, последние ступени ракет-носителей (РН), оставшиеся на рабочих орбитах после отделения КА, конструктивные элементы РН, отделившиеся в полете.

Размеры и массы указанных объектов находятся в достаточно широком диапазоне – от долей миллиметра до нескольких метров. Объекты от 5 мм могут наблюдаться оптическими и радиолокационными системами наблюдения. Объекты от 10 см каталогизированы. Минимальный размер объектов, доступный для наблюдения, определяется высотой орбиты. Для геостационарных орбит это 20 см, для низких – более 5 см. По этой причине наблюдаемый КМ составляет примерно (14 – 16) % всего КМ, присутствующего в околоземном космическом пространстве. В связи с этим актуальны орбитальные системы наблюдения, которые в состоянии наблюдать и оценивать распределение КМ в пространстве, формируя информационное поле, дополняющее систему наземного наблюдения.

Угроза столкновения с орбитальным мусором для действующих КА или пилотируемых кораблей является одним из основных факторов безопасности функционирования космических систем в околоземном пространстве. Классическим примером такой ситуации может служить столкновение вышедшего из строя российского спутника "Космос-2251" и аппарата Iridium 33 в феврале 2009 года, что привело к значительному росту числа обломков на орбите. В ведущих космических державах создана система контроля космического пространства, предназначенная для получения необходимой информации о космических объектах, с целью формирования необходимых воздействий на указанные объекты. В районе околоземных орбит до высот около 2000 км находится, по разным оценкам, порядка 220 тыс. (300 тыс. по данным Управления ООН по вопросам космического пространства, 2009 [2]) техногенных объектов общей массой до 5800 тонн. Число объектов более 1 см не определено и может достигать 60000 – 100000. Примерно 10 % внесены в каталоги с помощью наземных радиолокационных и оптических средств. Наиболее известны каталоги стратегического командования США (каталог U.S. Strategic Command USSSTRATCOM) и российский каталог. Офис Европейского космического агентства, ответственный за космический мусор, предоставляет прогнозы событий и оценку риска столкновений в качестве сервиса для миссий. Объекты отслеживаются US Space Surveillance Network, которая составляет каталог космического мусора от 5 до 10 сантиметров на низкой околоземной орбите и до 1 метра на геостационарной орбите. По разным оценкам, количество обломков размером порядка одного миллиметра исчисляется миллионами.

Распределение фрагментов КМ. Две трети космического мусора приходится на Россию и США. На счету России ориентировочно 5900 фрагментов космического мусора, на счету США – 5000. 3400 фрагментов КМ принадлежит Китаю. Меньше у Франции (около 500 фрагментов КМ), у Японии примерно 200, у Индии 190, у Европейского космического агентства около 100, к другим странам относятся почти 600 фрагментов. Приведенные данные носят приближенный характер, их оценки достаточно быстро претерпевают изменения, связанные как с интенсивной пусковой деятельностью, процессами взаимодействия фрагментов по Кесслеру (новый мусор, возникающий при случайных

столкновениях космических объектов на орбитах), так и с постоянно совершенствующимися методами наблюдения, подсчета и моделирования [1, 2].

Распределение мусора по размерам на низких орбитах примерно следует степенному закону, где количество фрагментов резко возрастает с уменьшением размера. Поэтому основная угроза столкновений исходит от мелких фрагментов мусора. Эти частицы мусора слишком малы, чтобы отслеживаться средствами наблюдения, но обладают достаточной кинетической энергией, чтобы нарушить работу активных КА.

Специфическую опасность несет в себе падение КМ на Землю. Крупные объекты, находящиеся на низких околоземных орбитах, постепенно снижаются и через какое-то время входят в атмосферу. Некоторые их фрагменты достигают поверхности Земли. Падения ФКМ может привести к разрушению опасных объектов на поверхности Земли. Небольшие объекты космического мусора попадают в плотные слои атмосферы практически ежедневно, более крупные – несколько раз в месяц. По данным Nicholas Johnson (НАСА), почти ежегодно отдельные фрагменты спутников или ракет достигают поверхности. В связи с этим Межагентским координационным комитетом разрабатывается концепция активного удаления мусора (active debris removal, ADR).

Актуальные проблемы. Анализ известных в настоящее время концепций увода космического мусора с орбит позволяет сформулировать три ключевые проблемы:

- экономическая и физическая жизнеспособность предлагаемой системы борьбы с КМ;

- минимизация операционных рисков, в том числе минимизация угроз дополнительного засорения орбит рабочего диапазона;

- необходимость создания соответствующей нормативно-правовой базы для увода отработанных объектов, принадлежащих различным владельцам.

Актуальность задачи обеспечения безопасности космических полетов в условиях техногенного загрязнения околоземного космического пространства (ОКП) и снижения опасности для объектов на Земле при неконтролируемом вхождении космических объектов в плотные слои атмосферы и их падении на Землю стремительно растет. Поэтому международное сотрудничество по проблематике "космического мусора" развивается по следующим приоритетным направлениям:

- экологический мониторинг ОКП, включая область геостационарной орбиты (ГСО): наблюдение за "космическим мусором" и ведение каталога объектов "космического мусора";

- математическое моделирование "космического мусора" и создание международных информационных систем для прогноза засоренности ОКП и ее опасности для космических полетов, а также информационного сопровождения событий опасного сближения космических объектов (КО) и их неконтролируемого входа в плотные слои атмосферы;

- разработка способов и средств защиты космических аппаратов от воздействия высокоскоростных частиц "космического мусора";

- разработка и внедрение мероприятий, направленных на снижение засоренности ОКП [1 – 3].

Международный и юридический аспекты. Проблема космического мусора имеет несколько составляющих: научную, техническую, юридиче-

скую, экологическую и технологическую. Различные аспекты проблемы КМ периодически обсуждаются на многочисленных комитетах и комиссиях международных организаций, таких как Международная астронавтическая федерация (IAF), Комитет по Исследованию Космического пространства Международного совета Научных союзов (COSPAR), Международный союз электросвязи (ITU), Международный институт космического права (ISJ). Последние десятилетия проблема изучается и подвергается международной координации в Межагентском координационном комитете по космическому мусору (IADC) и Научно-техническом подкомитете Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (STCS UN COPUOS).

Первой и совершенно понятной проблемой является предупреждение дальнейшего накопления КМ на околоземных орбитах. Это означает необходимость строгого выполнения руководящих принципов, разработанных IADC. Вместе с тем возникает коллизия, связанная с необязательностью выполнения этих требований странами, реализующими космические технологии и обеспечивающими космические услуги. Особенно критичными являются технологии двойного и военного назначения, в ходе реализации которых не всегда обеспечиваются интересы международного сообщества.

Еще одна проблема очистки космического пространства связана с юридическим статусом крупных (идентифицированных) фрагментов космического мусора. Несанкционированный увод фрагментов может быть поводом для международных правовых коллизий [1 – 4].

Защита КА. Одним из последствий такого состояния дел с КМ явилась тенденция разработки защиты КА, повышение требований к прочностным характеристикам. Понятно, что абсолютную защиту КА организовать крайне сложно, учитывая кинетическую энергию даже небольших фрагментов КМ. Вместе с тем новые технологии проектирования предполагают минимизацию вреда функциональным возможностям КА при локализованных разрушениях части аппарата. Другое направление защиты КА от разрушения связано с выбором менее напряженных в аспекте КМ орбит, а также повышением маневренности КА для избежания столкновений. Последнее особенно касается обитаемых космических станций. Также следует иметь в виду, что значительная масса объектов движется по орбитам в примерно совпадающих направлениях, то есть они имеют достаточно малые различия по скоростям движения в локальных зонах по критерию близости орбит [1, 3].

Технологии очистки околоземного пространства от фрагментов КМ. Работа над различными аспектами проблемы КМ привела к оживлению исследований в этих направлениях, привлекая внимание широкой научной общественности. Однако это по-прежнему не снижает актуальности проблемы очистки ближнего околоземного пространства. Подходы к очистке существенным образом зависят от размеров фрагментов КМ, что, в свою очередь, предполагает развитие соответствующих адекватных технологий. Все виды технологий можно разбить на два больших класса: контактные и бесконтактные. Контактные технологии предполагают наличие стыковочных и субстыковочных операций, что влечет необходимость решения локальных и глобальных навигационных задач, использования соответствующего оборудования и энергетического обеспечения.

Для бесконтактных технологий требования по сближению фрагмента КМ и обслуживающего аппарата мягче и набор возможных технологических подходов по удалению КМ, видимо, шире.

В текущий период предложено достаточно много подходов к реализации различных способов борьбы с КМ и развитие соответствующих способов и технических реализаций происходит активно и интенсивно. Технологически операции увода сложны и опасны. Космические обломки разнообразны по форме и механическим свойствам. Они характеризуются сложным движением вокруг центра масс (беспорядочное вращение, плоское вращение, колебания с большими амплитудами и т. д.), что усложняет стыковку. Другое возможное решение состоит в том, чтобы выполнить операцию захвата с помощью вспомогательных устройств (например, сеть или гарпун), выпущенных с КА [1 – 3]. В этом случае главная трудность, возможно, связана с развертыванием и наведением устройства захвата, которое, кроме того, было бы трудно использовать в дальнейшем для повторных операций удаления.

Концепция удаления обломков, основанная на импульсно-лазерных системах, имеет в этом случае существенное преимущество, поскольку позволяет управлять далекими целями на орбите, возможно даже с Земли. К сожалению, маленький импульс, полученный при абляции материала, не может быть эффективным для объектов с размером больше 20 см [1 – 3].

Бесконтактное удаление КМ. Существует несколько подходов к удалению КМ бесконтактными методами. К числу их относятся методы на основе использования ионного пучка, который формируется с помощью электрореактивного двигателя или струи газа; методы, основанные на применении лазера; методы, основанные на применении магнитных взаимодействий с физическими полями.

Одним из подходов для решения проблемы КМ является использование КА – пастуха с ионным лучом (ПИЛ) [4 – 6] для удаления космического мусора больших размеров из переполненных областей низких околоземных орбит (НОО). Основной принцип этой концепции заключается в использовании потока ионов электрореактивного двигателя (ЭРД) в качестве средства, передающего силовой импульс объекту КМ для его торможения. Концепция ПИЛ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими концепциями, а именно: эффективность увода, низкий уровень риска, возможность повторного использования, технологическая готовность.

Предварительные оценки показали, что масса "пастуха" с топливом не будет более 10 % от массы уводимых объектов. Так, для увода 1,5- тонного объекта с круговой орбиты высотой 1000 км на орбиту высотой 500 км потребуется около 23 кг рабочего тела (ксенона). Такого же порядка масса потребуется и для второго двигателя. С учетом веса конструкции КА и других его подсистем ожидаемая масса "пастуха" не будет превосходить 150 кг. Для сравнения отметим, что 150 кг – это приблизительно масса топлива верхних ступеней РН для одноимпульсного перевода их на орбиту с перигеем 50 км [7 – 13]. Низкий уровень риска связан с отсутствием прямого контакта с объектом. Номинальное расстояние между объектом и "пастухом" по предварительным оценкам составит (10 – 20) м [12, 13]. Передаваемый импульс не зависит от формы и собственного движения объекта. Это преимущество представляется весьма существенным, поскольку механические контакты с нестабилизированной (вращающейся) целью порождают трудности взаимодействия. Существенным по-

ложительным качеством также является возможность многократного использования. Количество миссий будет определяться запасами рабочего тела на борту.

Облучение небольшого обломка лазером в течение часа только за счет давления света приводит к изменению траектории движения объекта и дальнейшему его сходу с орбиты. Частичное испарение объектов создает движущую силу, уменьшает количество кинетической энергии фрагмента КМ и, в результате, обеспечивает увод его с орбиты. Однако следует заметить, что развитие этой технологии несет в себе соблазн уничтожения "чужих" КА. Вместе с тем лазерная технология может оказаться весьма эффективной и обеспечить большую производительность операций увода КА с рабочих орбит.

Технологии космического невода. Эти технологии основаны на использовании специальной сети, которая предназначена для захвата обломков и их транспортировки в плотные слои атмосферы. Проблема состоит в том, что диапазон скоростей фрагментов КМ достаточно широк, что затрудняет массовый подход к уводу КМ из-за высоких относительных скоростей и необходимости быстрой идентификации фрагментов, особенно незначительных размеров. По этой причине метод "ловли неводом" труден в реализации. Тем не менее Electro Dynamic Debris Eliminator (EDDE) разрабатывает эту идею. По мнению разработчиков этой организации этот метод позволит захватывать спутники и другие объекты, сбившиеся с пути, такой сетью. По их оценкам такой способ относительно экономичен, удобен и может переводить фрагменты КМ на низкую околоземную орбиту. Разработчики предполагают, что EDDE мог бы убирать около 150 объектов в три года, а 12 EDDE могли бы убрать примерно 2500 объектов на НОО весом более 2 килограммов за семь лет. К сожалению, не все эти оценки представляются достаточно убедительными и часто не содержат оценок экономических. Цена вопроса может быть немалой при углубленной проработке проблемы, поскольку и энергетические, и навигационные модули в данной задаче могут оказаться сложными в реализации [1 – 3].

Гарпун как средство стыковки. Идея использовать гарпун для стыковки фрагмента КМ с КА оператором обсуждается достаточно давно. Разработкой этой идеи последнее время занимается Electro Dynamic Debris Eliminator. Область ее возможного применения – крупные фрагменты КМ. Но идея гарпуна может получить и другое развитие, связанное с десантированием на фрагмент КМ специального стандартизованного модуля, который обеспечит уход фрагмента КМ с орбиты. Вопрос разработки таких автономных модулей связан с развитием различных способов увода и соответствующих проектных и технологических решений.

Другой способ захвата фрагмента КМ основан на использовании сетки, которая, как и гарпун, выстреливается в зону конструктивных элементов фрагмента и тем самым осуществляет необходимый контакт для последующего увода фрагмента КМ.

Аэродинамические системы увода космических объектов с околоземных орбит [14]. Кристин Гейтс предложил увеличивать аэродинамическое сопротивление КА за счет применения надувных конструкций с использованием различных физических принципов их реализации, тем самым приводя его к снижению в атмосферу Земли (проект Gossamer Orbit Lowering Device, или GOLD

System). Такая технология значительно сокращает время пребывания нефункционирующих объектов ракетно-космической техники на рабочей орбите (рис. 1).

В последние годы появился ряд проектов космических надувных конструкций (рис. 1). Накопленный опыт создания надувных космических аэродинамических систем послужил созданию целого класса аэродинамических систем увода (АСУ). АСУ можно разделить на две группы: АСУ на основе одиночных или сгруппированных оболочек и АСУ на основе развёртываемых плёночных каркасных и бескаркасных конструкций. Существует большой массив конструктивных решений, многие из которых защищены патентами. На рис. 1, 2 представлен пример одного из таких решений.

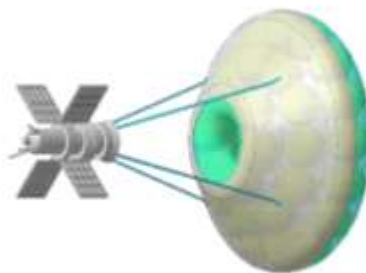
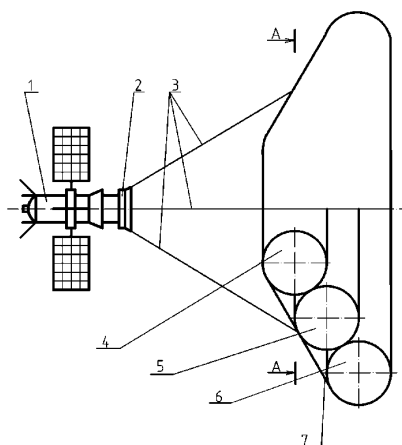


Рис. 1 – Функциональная схема аэродинамической системы увода



- 1 – орбитальный объект, 2 – контейнер для хранения АСУ,
3 – стропы или штанги, 4 – 6 – внутренние локальные оболочки,
7 – наружная коническая тонкоплёночная оболочка

Рис. 2 – Схема устройства для орбитального снижения космических объектов

Наддув оболочки позволяет увеличить площадь поперечного сечения и, соответственно, силу аэродинамического сопротивления, и объект будет постепенно снижаться до плотных слоёв атмосферы. Данная система позволит уменьшить баллистический коэффициент уводимого объекта на несколько порядков. Наддув оболочки предполагается проводить с помощью бортовых запасов газа. Данная система привлекательна с точки зрения простоты и технической реализуемости, однако она имеет существенные недостатки, так как подвержена воздействию повреждающих факторов космического пространства, в частности фрагментов космического мусора. Так, при попадании

фрагмента КМ в оболочку образуется отверстие, нарушится герметизация оболочки, она начнёт терять форму и её эффективность резко снизится. Вставные надувные элементы (на рис. 2 это элементы 4, 5, 6) значительно повышают живучесть конструкции. Кроме того, следует отметить, что надёжность конструкции должна обеспечить возможность ее использования в конце срока службы космического аппарата, который измеряется годами.

Дальнейшее развитие идеи пленочных конструкций привело к созданию развёртываемых модулей, которые представляют собой класс аэродинамических устройств, выполненных с использованием различного вида мачт и тонкоплёночных материалов. Конструкторами разработаны несколько конфигураций устройства в формах шара, тора, зонта из нескольких сегментов, закреплённых на надувных мачтах, и пр. [14].

Задачи, которые приходится решать при создании таких систем, связаны с выбором материала и разработкой конструктивных схем, обеспечивающих необходимую продолжительность их эксплуатации в условиях космического пространства, а также схем развёртывания, например радиальное выдвижение, радиальное раскручивание, спиральное развёртывание, скользящее складывание и т. д.

Кроме того, аэродинамическая поверхность должна быть разработана таким образом, чтобы функционировать в качестве устройства торможения при любом пространственном положении спутника. Это позволяет исключить увеличение массы этого спутника, а также необходимость сохранения запаса топлива после окончания миссии данного спутника.

Массовые характеристики таких систем представляются удовлетворительными, поскольку не увеличивают существенно полезный вес системы. Пример в виде результатов расчета массовых характеристик для системы с оболочкой в форме шара представлен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры аэродинамической системы "Шар" с учетом воздействия факторов космического пространства для обеспечения срока баллистического существования 25 лет

Высота орбиты, км	700	800	900	1000
Масса аэродинамического элемента, кг	40	163,6	471	1095
Масса системы наддува, кг	0,3	1,8	1,5	2,1
Масса системы хранения, кг	0,75	1,92	3,9	6,81
Масса АСУ, кг	41,05	167,32	476,4	1104
Площадь мицелева сечения, м ²	37	156	452	1041

Реактивный буксир. Крупные объекты несут в себе особую опасность реализации эффекта Кesslera, то есть опасность возникновения коллизий и как результат столкновения космических объектов на орбите, возникновения облака обломков. По этой причине специалистами Межагентского комитета по космическому мусору предложена идея и сформулирована концепция активного удаления крупногабаритных фрагментов КМ. Эта концепция предполагает создание специальных систем – буксировщиков для удаления этих крупных фрагментов в плотные слои атмосферы. Например, проект CleanSpaceOne от EPFL предполагает

ет создание специального сборщика КМ. Экономические расчеты показали высокую стоимость каждой миссии такого проекта [1 – 3].

Солнечный парус. Привлекает внимание разработчиков идея солнечного паруса. Причин несколько, основная состоит в том, что солнечное излучение является прямым источником энергии. Давление солнечного излучения, как физический фактор, может быть использовано практически в любой точке окосолнечного пространства. Помимо этого, солнечный парус может выполнять функции как интегратора механического импульса, так и служить площадкой для преобразования солнечной энергии в электрическую, которая в свою очередь может быть преобразована в энергию механическую [2, 3, 15].

Surrey Space Centre работает над HybridSail — системой, объединяющей большой разворачиваемый отражающий парус с тросами для буксировки объектов с орбиты. Система будет сводить объекты с орбиты за счет аэродинамического сопротивления и обмена импульсом с заряженными тросами и ионосферной плазмой. В этой схеме специализированный КА должен состыковаться с фрагментом космического мусора, положив начало фазе схода с орбиты.

Существует ряд идей, которые носят элементы научной фантастики и недостаточно научно и технически обоснованы. Примером служит идея с использованием вольфрамовой пыли.

Вольфрамовая пыль на орбите. Отдельной трудной задачей борьбы за чистоту орбит является задача удаления мелкого мусора. Трудно разрешимыми являются задачи и обнаружения, и удаления мелкого мусора. Существует не однозначно удачная идея формирования облака вольфрамовой пыли на орбите для создания местного атмосферного сопротивления. С увеличением лобового сопротивления высота орбит должна интенсивнее уменьшаться и мелкие фрагменты мусора постепенно сходили бы со своих орбит в течение нескольких десятилетий. Однако вызывает сомнение такая постановка задачи, поскольку не очень понятно, где взять такое количество вольфрамовой пыли (частицы не более 30 мкм в поперечнике) и как эта пыль будет влиять на работу функционирующих КА. Она может повредить чувствительное оборудование, например, солнечных панелей. Следовательно, ее с большими оговорками можно рассматривать только как модель полного очищения земной орбиты.

Идея, похожая на вариант с вольфрамовой пылью, предложена Джеймсом Холлопетером из GIT Satellite. По его мнению, в космос можно отправить ракеты, заполненные водой. После того как они выгрузят свой груз на орбите, появится поле кристаллизовавшейся воды, в которое будет попадать орбитальный мусор и сходить с орбиты. К сожалению, идея грешит противоречием: непонятно, почему орбитальный мусор начнет терять высоту. Просто количество мусора на орбитах, в виде кристаллов льда, увеличится. И будут эти кристаллы льда двигаться с соответствующей орбитальной скоростью по своим орбитам [2, 3].

Телескоп с лазером. Одним из продуктивных подходов к очистке околоземного космического пространства от фрагментов КМ малых размеров (порядка сантиметра и менее) может оказаться их увод с орбиты с помощью лазера и уничтожение в атмосфере Земли. Одним из носителей этой идеи является Тошиказу Ебисузаки из Калифорнийского университета. Технический орбитальный комплекс для решения такой задачи состоит из четырех основ-

ных модулей: лазер, источник энергии для его накачки, телескоп для обнаружения фрагментов КМ и их идентификации, а также орбитальный аппарат со служебной аппаратурой и энергоустановкой для задач перемещения и ориентации в пространстве.

Предварительные оценки производительности такого комплекса позволяют утверждать, что с его помощью большая часть мусора указанных размеров может быть устранена с низких орбит за пятилетний интервал времени. Конечно, следует критично относиться к таким оценкам, вместе с тем идея уничтожения этой категории КМ таким методом представляется достаточно реалистичной. Одним из узких мест является получение необходимых объемов энергии. Очевидны два типа источников: ядерный и солнечные электростанции. Последний представляется более предпочтительным. В качестве оптического наблюдателя может использоваться телескоп типа Extreme Universe Space Observatory (EUSO). Его особенности – мощная оптика и широкое поле зрения – позволяют использовать его в качестве инструмента для определения небольших обломков мусора, которые и будут объектами для уничтожения. Прототипом высокоэнергетического лазера может служить лазерная система CAN, которая была спроектирована для нового поколения ускорителей частиц. Лазеры CAN используют массив из тысяч оптоволокон, которые действуют сообща и производят мощный плазменный импульс, который способен замедлять фрагмент КМ, пока тот не сгорит в атмосфере Земли.

Известен еще один подход к использованию связки мощного телескопа и мощного лазера. Он состоит в том, чтобы с помощью энергии лазерного луча уничтожать частицы КМ малых размеров, которые представляют опасность для эксплуатируемых космических объектов.

Манипуляторы. Расширение области орбитального применения манипуляторов связано с созданием систем борьбы с космическим мусором. При этом ужесточаются функциональные требования как к самим механизмам, так и к системам управления этими манипуляционными устройствами, которые предназначены как для захвата фрагментов КМ, так и для различных операций транспортировки [16].

Функциональная система состоит из орбитального корабля или специализированного КА и фрагмента КМ, соединенных многозвенным, как правило, антропоморфным манипуляционным механизмом, образованным вращательными кинематическими парами пятого класса. Взаимное положение элементов системы "КА–манипулятор–ФКМ" определяется действием моментов, создаваемых в шарнирах манипулятора приводами степеней подвижности. Трудности локальной навигации определяются такими свойствами:

- подвижность основания манипулятора в инерциальном пространстве;
- малая масса манипуляционного механизма по сравнению с массами КА и ФКМ;
- конечная жесткость звеньев и редукторов;
- малая мощность двигателей приводов степеней подвижности.

В силу принятых допущений количество движения и момент количества движения системы орбитальный корабль – манипулятор – полезный груз неизменны:

$$\begin{aligned} m_1 \bar{V}_1 + m_2 \bar{V}_2 &= \bar{O}, \\ m_1 \bar{r}_1 \times \bar{V}_1 + J_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{r}_2 \times \bar{V}_2 + J_2 \bar{\omega}_2 &= \bar{C}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1, m_2 – массы КА и ФКМ соответственно; J_1, J_2 – тензоры инерции относительно центра масс ОК и ПГ соответственно; $\bar{r}_1, \bar{r}_2$ – радиусы–векторы центров масс КА и ФКМ соответственно относительно инерциального базиса с началом в центре масс системы КА–манипулятор–ФКМ; $\bar{V}_1, \bar{V}_2$ – линейные скорости центров масс ОК и ПГ соответственно относительно того же базиса; $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2$ – угловые скорости КА и ФКМ соответственно относительно того же базиса; $\bar{N}$ – постоянный вектор, определяемый начальным положением и начальными скоростями КА и ФКМ, $\bar{O}$ – нулевой вектор соответствующей размерности.

Модель демонстрирует трудности как выбора параметров такого космического объекта, так и трудности формирования соответствующих динамических режимов в процессе реализации необходимых функций.

Вектор обобщенных координат $X = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T$, где T – символ транспонирования, элементы которого – углы взаимного поворота смежных звеньев кинематической цепи в шарнирах рыскания плеча, тангажа плеча, тангажа локтя, тангажа кисти, рыскания кисти и крена кисти соответственно, однозначно определяет конфигурацию манипулятора. В принятых обобщенных координатах уравнения динамики системы ОК–манипулятор–ПГ имеют вид:

$$A(X) \ddot{X} + B(X, \dot{X}, \bar{C}) = M, \quad (2)$$

где $\dot{X}, \ddot{X}$ – векторы, элементы которых соответственно первые и вторые производные по времени от элементов вектора X ; $A(X)$ и $B(X, \dot{X}, \bar{C})$ – матрицы, элементы которых зависят от элементов соответствующих векторов; $M = [M_1, M_2, \dots, M_6]^T$ – вектор моментов, создаваемых приводами в соответствующих шарнирах. Отличительной особенностью системы (2) является учет подвижности основания манипулятора без увеличения порядка дифференциальных уравнений. При известном векторе $\bar{N}$, однозначно определяемом начальными условиями, система (2) шести обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно шести независимых обобщенных координат X полностью описывает движение механической системы ОК–манипулятор–ПГ в инерциальном базисе. Снижение порядка системы дифференциальных уравнений в рамках принятых допущений достигается использованием первых интегралов движения (1).

Космические тросовые системы (КТС). КТС на протяжении десятков лет рассматриваются как одно из перспективных направлений развития космонавтики [1 – 4]. В последние годы большое внимание исследователей уделяется электродинамическим КТС (ЭДКТС) и их использованию для создания эффективных средств увода отработавших свой срок космических аппаратов и ступеней ракет-носителей с низких околоземных орбит [3, 4, 7 – 12]. Применение ЭДКТС для решения этих задач представляется многообещающим и экономически целесообразным [1, 5, 7 – 14].

Создание эффективных ЭДКТС связано с решением сложных взаимосвязанных проблем динамики космических тросовых систем, физики плазмы, электродинамики, механики и физики космического полета, термодинамики. Сложный междисциплинарный характер исследуемых задач, тонкие специфические эффекты, проявляющиеся в ЭДКТС и оказывающие на ее работу существенное влияние, создают объективные трудности реализации этого подхода к проблеме очистки околоземного космического пространства.

Если рассматривать проблему увода космического мусора, то основное внимание в исследованиях уделяется гравитационно стабилизированной ЭДКТС [8 – 11]. К настоящему времени в этих исследованиях получено большое количество содержательных результатов. Предложена модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой, и показана эффективность оголенного провода для собирания из ионосферы электронного тока [8, 11, 15]. Результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, связанную с резонансами колебаний системы относительно центра масс и действием амперовых [1, 3] и аэродинамических [1, 16] моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС.

Необходимый эффект для увода фрагмента КМ с рабочей орбиты достигается благодаря силе Лоренца, действующей на заряды КТС [17].

Для получения адекватной математической модели движения ЭДКТС необходимы экспериментальные данные, что связано со сложной научно-технической задачей создания экспериментальных систем. Это является на текущий момент сдерживающим фактором развития технологии применения ЭДКТС для задач увода фрагментов КМ [18 – 20].

Солнечные электростанции космического базирования (СЭСКБ).

Практически все известные технологические решения увода КМ с рабочих орбит требуют наличия запасов энергии в одной из ее форм реализации. В условиях космического пространства наиболее естественным источником энергии является излучение Солнца. Поэтому представляется перспективным использование СЭСКБ для задач обеспечения в первую очередь энергоемких процессов при реализации таких технологий, как бесконтактные технологии с использованием ионного луча и лазерные технологии.

В настоящее время исследования с СЭСКБ проводятся космическими агентствами США, Японии, России и Украины. Возможность строительства таких станций изучается также во Франции, Германии и Канаде. А такие компании как Boeing Aerospace Corp., Lockheed Martin, Grumman Aerospace Corp., Rockwell Inc., EADS Astrium, Ontario Power Generation, Space Energy Inc. и КБ им. Лавочкина уже выполняют практические работы, связанные с созданием солнечных электростанций космического базирования.

Модульные системы увода. Проблема КМ предполагает как процедуры очистки околоземного космического пространства (активного удаления мусора (ADR), так и предохранение этого пространства от дальнейшего загрязнения. Последнее, в свою очередь, предполагает разработку специальных технологий удаления с рабочих орбит нефункционирующих космических объектов [14]. Одним из направлений разработки таких технологий является создание унифицированных модулей увода разгонных блоков и КА с рабочих орбит. Такие модули могут быть разработаны на основе активных и пассив-

ных систем. Первые предполагают использование различных двигателей с запасами рабочего тела, последние могут быть использованы в пассивном режиме, то есть без затрат рабочего вещества. К таким относятся, например, аэродинамические системы, электродинамические тросовые системы, системы, использующие запасы магнитной энергии и др. Такие модули устанавливаются на соответствующий космический объект и включаются в работу, активируются, после окончания активной фазы функционирования космического объекта. Кроме того, такие модули могут быть дистанционно установлены на фрагменты КМ для их удаления.

Сервисные операции. Один из новых аспектов проблемы КМ связан с созданием перспективных технологий – сервисных операций в космическом пространстве. Сервисные системы, с одной стороны, позволяют продлить сроки полезной работы КА, с другой – позволяют обеспечить при необходимости увод отработанных КА из космического пространства. Предполагается, в частности, обслуживать в первую очередь метеорологические спутники и аппараты дистанционного зондирования Земли, как наиболее распространенные практические системы. В эту категорию попадают также навигационные и связные спутники. Последние, как правило, расположены на геостационарных орбитах, являются дорогими, сложными и громоздкими комплексами. Сервисные регламенты таких спутников несут значительную экономическую выгоду. К числу сервисных операций в первую очередь относят такие операции, как осмотр КА, замена отдельных блоков, раскрытие антенны, наращивание или замена солнечных панелей, дозаправка топливом, обеспечение орбитального маневра, ремонт защитных покрытий, съем информационных модулей, замена объективов, настройка автоматических систем и др. Наиболее вероятной функциональной схемой сервисного аппарата будет пилотируемый вариант. Впрочем, вполне возможна реализация беспилотной концепции, основанной на подходах, предполагающих сервисные операции с помощью оператора, который находится на земной поверхности [16].

Космический мусор – ресурсы индустрии на орбите [21]. Основой большинства технологий борьбы с существующим космическим мусором является идея его увода на низкие орбиты, с тем, чтобы он сгорал при входе в плотные слои атмосферы. Чем выше орбита КМ, тем больше затрат энергии необходимо для его увода в атмосферу для уничтожения. Вместе с тем в настоящее время на космических орбитах по разным оценкам находится до 7000 тонн космических обломков, содержащих в своих конструкциях дорогостоящие материалы. Выведение одного килограмма массы на орбиту стоит достаточно дорого. В зависимости от высоты орбиты – 10 тыс. долл. и больше. Поэтому имеет смысл рассмотреть существующий КМ не как мусор, а как один из видов ресурсов ближнего космоса.

Возникает новая задача, задача утилизации фрагментов КМ. На первом ее этапе нужно собрать все обломки в несколько кластеров, каждый из которых будет размещен на одной из орбит утилизации. Обломки из окрестностей этих орбит будут транспортироваться не на далекую Землю, а к ближнему центру утилизации. Таким образом, можно разработать более дешевые технологии сбора КМ с одной стороны, с другой – сохранить их как материал для будущей индустриализации космоса. Несколько десятков и даже сотен центров утилизации не будут угрозой для функционирующих КА.

На первом этапе следует выполнить кластеризацию орбит для оптимизации размещения орбит утилизации. Например, кластеры орбит ФКМ могут быть сформированы по критериям близости одного или нескольких их орбитальных параметров на основе данных каталогов ФКМ.

Наличие собственного каталога или доступ к иному открытому и обновляемому каталогу параметров орбит КА позволяет осуществлять баллистический анализ заполнения ОКП орбитами КА различного функционального назначения.

В настоящее время полноценно функционируют и поддерживают в актуальном состоянии динамические каталоги объектов искусственного происхождения только две системы средств наблюдения и контроля космического пространства (СККП) в США и в России. Они создавались для обнаружения КО, представляющих опасность с военной точки зрения. Для решения этой задачи организованы обнаружение и контроль движения не только действующих КА, но и всех остальных крупных КО.

Каталог NORAD ежедневно публикует параметры орбит более 15000 КО. Кроме того, публикуются параметры орбит КА различного функционального назначения, сгруппированные в отдельные файлы. Эта информация доступна в сети Интернет в виде текстовых файлов (см., например, <http://www.space-track.org>), обновляемых иногда несколько раз в сутки.

Возможность ограниченного доступа к актуальному каталогу параметров орбит NORAD (объединённой системы аэрокосмической обороны США и Канады) позволила провести баллистический анализ заполнения околоземных орбит КА различного назначения.

На рис. 3 представлена блок-схема классификации околоземных орбит КА. Пунктирные линии указывают на неоднозначность определения принадлежности к группам для некоторых классов орбит.

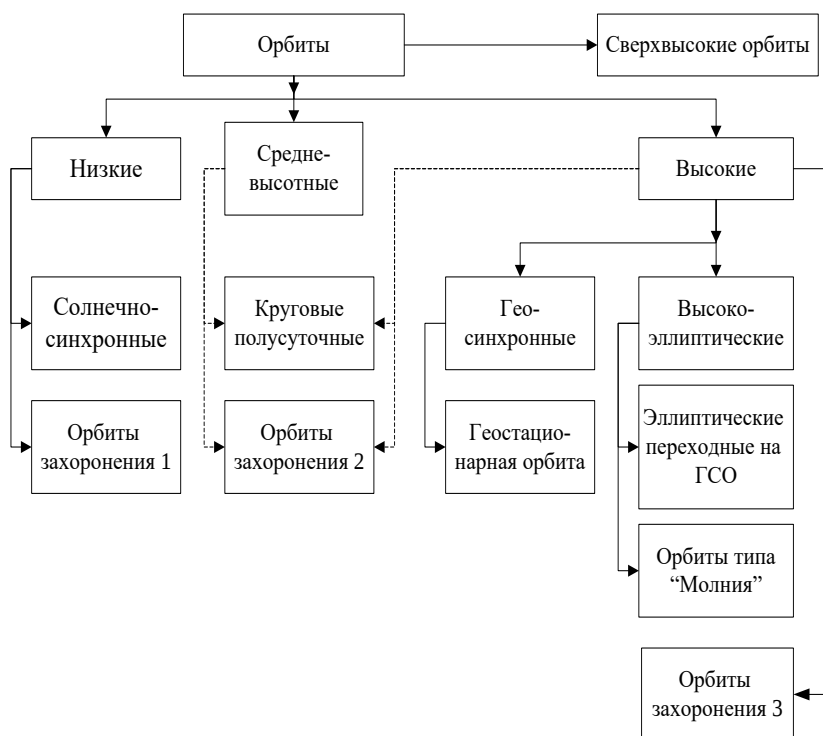


Рис. 3 – Блок-схема классификация околоземных орбит

Анализ заполнения ОКП КА различного назначения целесообразно проводить после пересчета наборов орбитальных элементов каталога КА к кеплеровским элементам орбиты и визуализации с использованием составных гистограмм распределений количества орбит КА. Например [22], гистограммы, представленные на рис. 4 – 5, изображают на общих графиках распределения частот количества орбит КА связи, навигации и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в зависимости от кеплеровских элементов орбиты. Частоты количества орбит КА откладываются по левой оси, а значения кеплеровских элементов орбиты – по нижней оси.

На основе подобного анализа могут быть выбраны орбиты утилизации, оптимальные по затратам энергии на перевод ФКМ, которые находятся на близких по выбранному критерию орбитах.

В настоящее время достаточно рельефно вырисовываются возможности создания технологических модулей на околоземных орбитах. Примером могут служить технологии, развиваемые компанией Made In Space, известной как компания, разработавшая 3D-принтеры, находящиеся на борту МКС. Астронавты уже не раз использовали эту технологию на МКС для печати различных предметов.

Создание конструкций не на поверхности Земли, а в условиях микрогравитации позволит делать конструкции легкими, менее громоздкими и защищенными. Доля массы и объема полезного оборудования на таких объектах будет значительно выше, чем на объектах, изготовленных на поверхности Земли. Такое оборудование будет экономически более эффективным, обладая при этом большими возможностями.

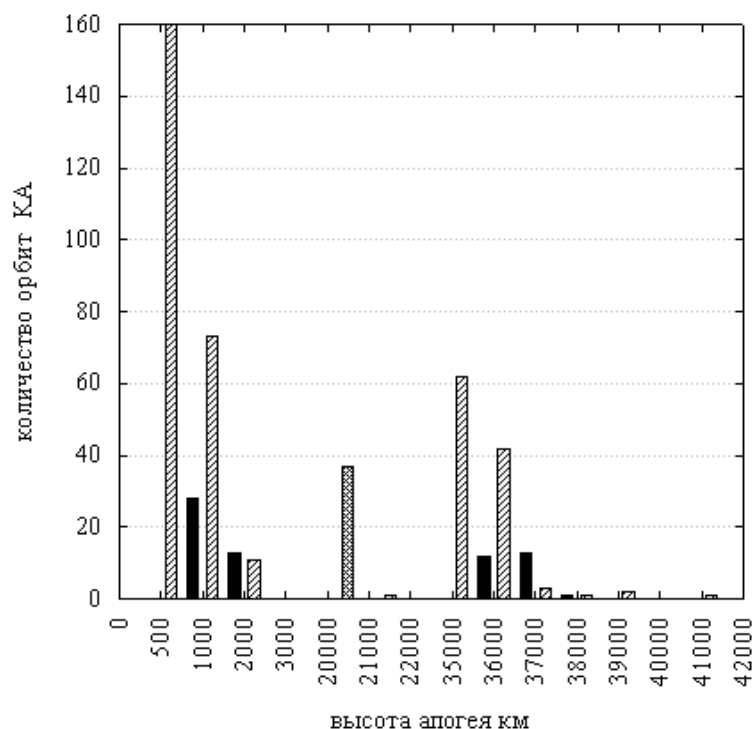


Рис. 4 – Распределение количества орбит КА по высоте апогея

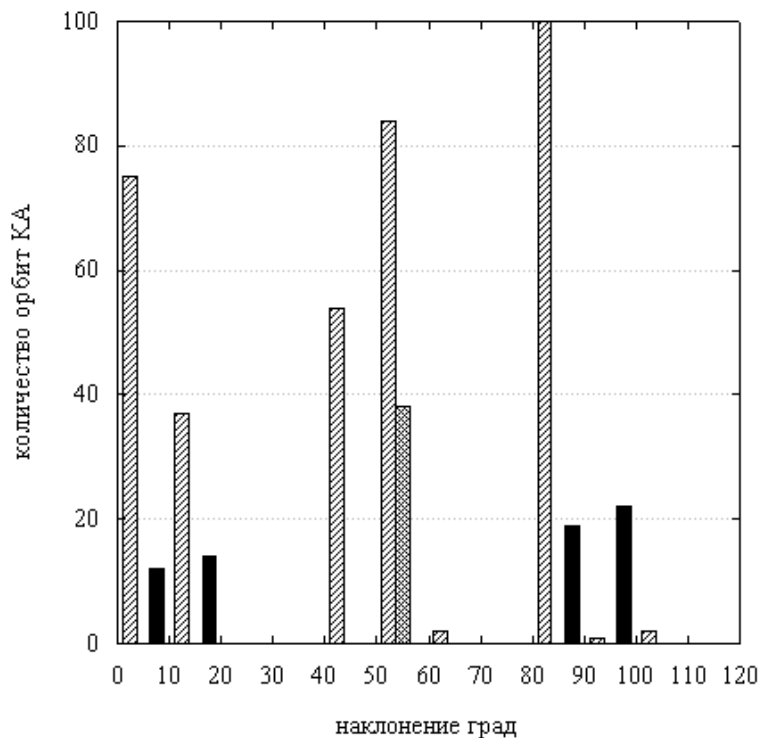


Рис. 5 – Распределение количества орбит КА по наклонению

На рис. 4, 5 используются следующие обозначения: одинарная штриховка – КА связи, двойная штриховка – навигационные КА, черный цвет – КА ДЗЗ.

В настоящее время Made In Space демонстрирует видео-рендеринг более крупной системы – технологической платформы Archinaut, которая позволяет осуществлять автономное производство и сборку космических систем на орбите. Archinaut в перспективе сможет производить и собирать большое оборудование, такое как спутники или даже космическая станция. Разработка Archinaut расширяет производственные и монтажные возможности в космосе. В частности, компания намерена создавать космические аппараты принципиально новой конструкции. С помощью Archinaut можно будет, например, производить и собирать магистральные структуры для больших телескопов, ремонтировать, дополнять или повторно использовать существующие космические аппараты и беспилотные сборки новых космических станций.

Космические конструкции, собранные с помощью Archinaut, будут оптимизированы для условий невесомости, а не для среды запуска. Это позволит заказчикам экономить на затратах. В Made in Space разработали ESAMM, "расширенную структуру для производства дополнительных деталей". Ее конструкция не имеет ограниченной области печати. Ее называют "принтер наизнанку". Принтер размером 30x20x50 см может изготовить ферму длиной в несколько метров или даже больше, достаточно только снабжать его энер-

гией и сырьем. Принтер сможет использовать местные ресурсы, в том числе переработанный космический мусор или материалы, добытые с поверхности астероидов. Это может стимулировать проекты сбора космического мусора за счет появления таких экономических стимулов.

Заключение. Научные задачи. Проблема космического мусора, являясь комплексной, имеет широкий спектр различных аспектов решения данной проблемы. По этой причине, в связи с необходимостью борьбы с космическим мусором, возник комплекс научных и технологических задач, порожденных особенностями указанной проблемы. К числу таковых относятся следующие задачи:

- создание моделей прогнозирования повреждений. Анализ технологий защиты. Экспериментальные испытания высокоскоростного столкновения (High Velocity Impact - HVI);

- разработка способов борьбы с мусором в формате стандартов (Mitigation and Standards), которые определяют основные меры по борьбе с мусором, уменьшения угроз и пассивной защите орбитальных объектов. Разработка и модернизация наземных и космических измерительных средств, развитие баз данных и методов анализа распространения космического мусора на основе инструментальных измерений;

- моделирование и оптимизация рисков (Modelling and Risk Analysis) на основе анализа характеристик текущего и будущего распространения космического мусора, развития методов орбитального анализа и оценки рисков столкновения, основанных на статистических моделях распространения, детерминистических каталогах и активном уклонении;

- разработка моделей гиперскоростных столкновений (Hypervelocity Impacts and Protection). Модели предназначены для оценок возможностей пассивной защиты и экранирования объектов. Разработка концепции удаления космического мусора (Space Debris Removal Concepts). Разработка активных способов удаления космического мусора – наземных и космических. Развитие новых подходов к активному удалению мелких фрагментов мусора на основе изменения параметров атмосферы (например, использование облака микронной пыли) для создания эффективных сил сопротивления физической среды вдоль орбиты;

- разработка методов мониторинга функционирования в среде космического мусора, контроль обстановки (Operations in Space Debris Environment, Situational Awareness). Исследуются аспекты, направленные на обеспечение безопасности выполнения космических миссий, в частности связанных с воздействием космического мусора, наблюдением за космическим мусором, определением его орбит, созданием и поддержанием каталогов космических объектов, накоплением данных с различных источников, со стандартами обмена данных и анализом пересечения орбит. Развитие энтропийных подходов к моделированию движения облака КМ отражает еще один из возможных аспектов задачи моделирования хаотических процессов относительного движения ФКМ;

- исследование политических, юридических, организационных и экономических аспектов предотвращения образования космического мусора и его удаления (Political, Economic and Institutional Aspects of Space Debris Mitigation and Removal). Анализ состояния процесса организации учета и удаления космического мусора. Оценка экономических мероприятий, в том

числе по выделению средств, анализ политических аспектов, например, роль IADC (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) и UNCOPUOS (United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space); роль международного сотрудничества.

1. Техногенное засорение околоземного космического пространства. Под ред. докт. техн. наук, проф. А. П. Алпатова. Днепропетровск: Пороги, 2012. 378 с.
2. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 245 с.
3. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора. Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 188 с.
4. Technical report on space debris. United Nations. New York, 1999. 50 p.
5. Алпатов А. П., Закржевский А. Е. Пассивное развертывание связки двух тел на орбите. Прикладная механика. 1999. Т. 35. № 10. С. 87–92.
6. Alpatov A. P. Shape control of large reflecting structures in space / A. P. Alpatov, V. P. Gusynin, P. P. Belonozhko, S. V. Khoroshilov, A. A. Fokov // 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, SA. Copyright ©2011 by the International Astronautical Federation. All rights reserved. IAC-11.C2.3.6
7. Bombardelli C., Herrera J., Iturri A., Pelaez J. Space debris removal with bare electrodynamic tethers. Proceedings of the 20th AAS: AIAA Spaceflight Mechanics Meeting, San Diego, CA, 2010.
8. Bombardelli C., Pelaez J. Ion beam shepherd for contactless space debris removal. Journal of guidance, control and dynamics. 2011. V. 34. № 3. P. 916–920.
9. Estes R. D., Lorenzini E. C., Sanmartin J., Pelaez J., Martinez-Sanchez M., Johnson C. L., Vas I. E. Bare Tethers for Electrodynamic Spacecraft Propulsion. Journal of Spacecraft and Rockets. 2000. V. 37. P. 205–211.
10. Бомбарделли К., Алпатов А. П., Пироженко А. В., Баранов Е. Ю., Осинский Г. Г., Закржевский А. Е. Проект "космического пастуха" с ионным пучком. Идеи и задачи. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 2. С. 55–62.
11. Alpatov A. P., Fokov A. A., Khoroshilov S. V. Определение оптимального положения "пастуха с ионным лучом" относительно объекта космического мусора. Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts (Odessa, Ukraine, August 25–28 2015). Одесса, 2015. С. 126.
12. Alpatov A., Cichocki F., Fokov A., Khoroshilov S., Merino M. Algorithm for Determination of Force Transmitted by Plume of Ion Thruster to Orbital Object Using Photo Camera. Proceeding of the 66th International Astronautical Congress (Jerusalem, Israel, 2015. IAC-15-A6.5.5-27732). Jerusalem, 2015.
13. Alpatov A., Cichocki F., Fokov A., Khoroshilov S., Merino M. Determination of the force transmitted by an ion thruster plasma plume to an orbital object. Acta Astronautica. 2016. №119. С. 241–251.
14. Алпатов А. П., Палий А. С., Скорик А. Д. Аэродинамические системы увода космических объектов. Техническая механика. 2015. № 4. С. 126–138.
15. Поляхова Е. Н. Космический полёт солнечным парусом: проблемы и перспективы. М.: Наука, 1986. 304 с.
16. Алпатов А. П., Белоножко П. П., Тарасов С. В., Фоков А. А., Храмов Д. А. Перспективы космической робототехники. Информационные технологии в металлургии и машиностроении; материалы (ИТММ-2014): Материалы научно-технической конференции (Днепропетровск, 25–27 марта 2014). Днепропетровск, 2014. С. 5–6.
17. Sanjurjo Rivo M. Self Balanced Bare Electrodynamic Tethers. Space Debris Mitigation and other Applications : tesis doctoral N 1839 / Manuel Sanjurjo Rivo. Madrid, 2009. 215 с.
18. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., Khoroshilov V. S., Pirozhenko A. V., Troger H., Zakrzhevskii A. E. Dynamics of Tethered Space Systems. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. 223 p.
19. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. San Diego: American Astronautical Society, 2007. 453 p.
20. Fujii H. A. & others Sounding rocket experiment of bare electrodynamic tether system. Journal of Acta Astronautica. 2009. V. 64, № 2–3. P. 313–324.
21. Алпатов А. П., Горбулин В. П. Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. Вісн. НАН України. 2013. № 12. С. 26–38.
22. Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М. Баллистический анализ распределения орбит космических аппаратов различного функционального назначения. Техническая механика. 2017. № 2. С. 33–41.

Получено 11.01.2018,
в окончательном варианте 18.01.2018