

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ БОРЬБЫ С АНТРОПОГЕННЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ БЛИЖНЕО КОСМОСА

Аннотация. Представленные в докладе результаты отражают возможность изменения концепции борьбы с загрязнением околоземного космического пространства. Выполнен краткий анализ различных аспектов информационного моделирования и борьбы с загрязнением околоземного космического пространства, включая различные методы предотвращения образования фрагментов мусора антропогенного происхождения. Сформулированы научные задачи, включая энтропийный подход к моделированию процессов развития облака космического мусора, а также предложена новая концепция его утилизации.

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

"Космический мусор, space debris" (КМ) представлен космическими объектами как искусственного, так и естественного происхождения. Это, в первую очередь, прекратившие работу объекты космической техники и их фрагменты. а также объекты космического происхождения. Более значимую часть представляют объекты антропогенного происхождения, [1]. В настоящее время на орбитах с высотами до 2000 летают несколько сотен тысяч фрагментов космического мусора. (ФКМ). Оценки количества зависят от размеров учитываемых фрагментов. Особенно высока плотность КМ на так называемых рабочих орбитах, тех которые максимально соответствуют функциональному назначению космического аппарата (КА).

Угроза столкновения с орбитальным мусором для действующих КА или пилотируемых кораблей является одним из основных факторов безопасности функционирования космических систем в околоземном пространстве. 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 неопределенно и может достигать 60000 – 100000. Примерно 10% внесены в каталоги с помощью наземных радиолокационных и оптических средств [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. В этой связи интересен информационный подход к проблеме моделирования облака КМ, основанный на энтропийных оценках.

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).

Одной из актуальных задач описания и прогноза развития процессов загрязнения ближнего космоса является 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 КО и их неконтролируемого входа в плотные слои атмосферы, [3].

Проблема космического мусора имеет несколько составляющих: научную, техническую, юридическую, экологическую и технологическую. Различные аспекты проблемы КМ периодически обсуждается 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 (ICJ). Последние десятилетия проблема изучается и подвергается международной координации в Межагентском координационном комитете по космическому мусору (IADC) и Научно-техническом подкомитете

тет Комитете 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 странам, реализующими космические технологии и обеспечивающих космические услуги. Особенно критичными являются технологии двойного и военного назначения, в ходе реализации которых не всегда обеспечиваются интересы международного сообщества.

Следует заметить, 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].

Проблема возрастающего загрязнения околоземного космического пространства привела к оживлению исследований в этих направлениях. Подходы к очистке существенным образом зависят от размеров фрагментов КМ, что, в свою очередь, предполагает развитие соответствующих адекватных технологий, которые можно разбить на два больших класса: контактные и бесконтактные. Контактные технологии влекут 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. К числу бесконтактных относятся методы на основе использования ионного пучка, который формируется с помощью электро-реактивного двигателя или струи газа; методы, основанные на применении лазера; методы, основанные на применении магнитных взаимодействий с физическими полями (проект LEOSWEEP) .

В ИТМ НАНУ_ГКАУ разрабатываются аэродинамические системы увода космических объектов с околоземных орбит [14]. В последние годы появился ряд проектов космических надувных конструкций. Накопленный опыт создания надувных космических аэродинамических систем послужил созданию целого класса аэродинамиче-

ских 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. Такая технология значительно сокращает время пребывания нефункционирующих объектов ракетно-космической техники на рабочей орбите

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.

Крупные объекты несут в себе особую опасность реализации эффекта Кesslera, то есть опасность возникновения коллизий и, как результат столкновения космических объектов на орбите, – возникновение 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.

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 околосолнечного пространства. [2, 3, 15]. Surrey Space Centre работает над HybridSail — системой, объединяющей большой развёртываемый отражающий парус с тросами для буксировки объектов с орбиты. Система будет сводить объекты с орбиты за счет аэро-

динамического сопротивления и обмена импульсом с заряженными тросами и ионосферной плазмой.

Отдельной трудной задачей борьбы за чистоту орбит является задача удаления мелкого мусора. Трудно разрешимыми являются задачи и обнаружения и удаления мелкого мусора. Существует 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. 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 сходиться 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].

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. 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. 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.

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 транс-портировки [16].

Функциональная система состоит из орбитального корабля или специализированного КА и фрагмента КМ (ФКМ), 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 последние годы широко исследуются 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, термодинамик. Сложный междисциплинарный характер исследуемых задач, тонкие специфические эффекты, проявляющиеся в ЭДКТС и оказывающие на ее работу существенное влияние, создавая объективные трудности реализации этого подхода к проблеме очистки околоземного космического пространства. Для получения адекватной математической модели движения ЭДКТС необходимы экспериментальные данные, что связано со сложной научно-технической задачей создания экспериментальных систем. Это является на текущий мо-

мент 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 солнечных электростанций космического базирования (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.

Учитывая массовость применения технологий увода фрагментов КМ одним из направлений их разработки является создание унифицированных модулей. Такие модули могут быть разработаны на основе активных и пассивных систем. Первые предполагают использование различных двигателей с запасами рабочего тела, последние могут быть использованы в пассивном режиме, то есть без затрат рабочего вещества.

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. Наиболее вероятной функциональной схемой сервисного аппарата будет пи-

лотируемый вариант. Впрочем вполне возможна реализация беспилотной концепции, основанной на подходах, предполагающих сервисные операции с помощью оператора, который находится на земной поверхности [16].

В последнее время получает развитие новая концепция, в соответствии с которой космический мусор рассматривается как 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 необходимы 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. .

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 анализа заполнения околоземных орбит КА различного назначения.

На рис. 1 представлена блок-схема классификации околоземных орбит КА. Пунктирные линии указывают на неоднозначность определения принадлежности к группам для некоторых классов 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. 1,2 изображают на общих графиках распределения частот количества орбит КА связи, навигации и ДЗЗ в зависимости от Кеплеровских элементов орбиты. Частоты количества орбит КА откладываются по левой оси, а значения Кеплеровских элементов орбиты – по нижней оси будет значительно выше, чем на объектах, изготовленных на поверхности Земли. Такое оборудование будет экономически более эффективным, обладая при этом большими возможностями.

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 может служить технологии, развиваемые компанией Made In Space, известной как компания, разработавшая 3D-принтеры, находящиеся на борту МКС. Астронавты уже не раз использовали

AMF (Additive Manufacturing Facility) на МКС для печати различных предметов.

Космические конструкции, собранные на орбите, будут оптимизированы для условий невесомости, а не для среды запуска. Это позволит заказчикам экономить на затратах.

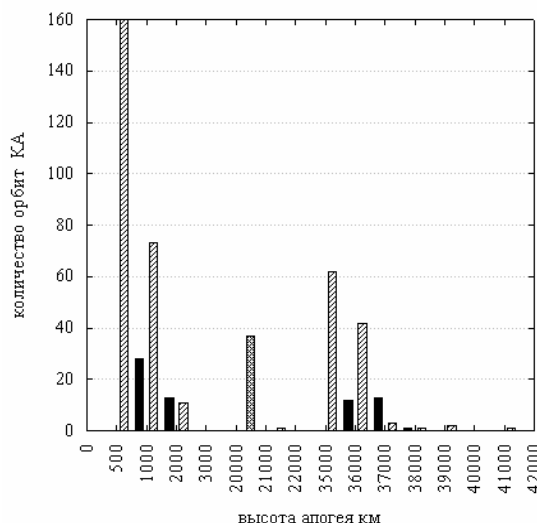


Рисунок 1 – Распределение количества орбит КА по высоте апогея

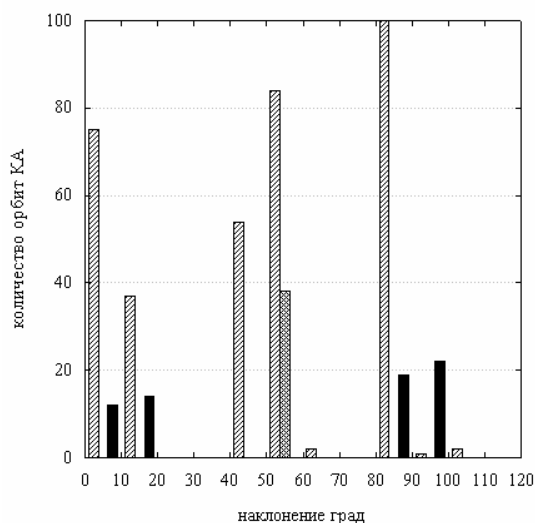


Рисунок 2 – Распределение количества орбит КА по наклонению

Заключение

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:

- модели 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, уменьшению угроз и пассивной защите орбитальных 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 статистиче-

ских моделях распространения, детерминистических каталогах и активном уклонении;

- разработка специальных информационных моделей.

- разработка моделей гиперскоростных столкновений и защита (Hypervelocity Impacts and Protection). Модели предназначены для оценок возможностей пассивной защиты, экранирования и 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.

ЛИТЕРАТУРА

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. 50p.
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. 55–6.

11. Alpatov A. P., Fokov A. A., Khoroshylov 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., Khoroshylov 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., Khoroshylov 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