

А. П. Алпатов¹, К. Бомбарделли², С. В. Хорошилов¹

¹ Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск

² Мадридский технический университет, Мадрид, Испания

КОНЦЕПЦИЯ АКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Проведен анализ материалов и выделены основные результаты работы Украинско-европейского семинара по активному удалению космического мусора, который прошел 20–21 мая 2015 г. в городе Днепропетровск в рамках программы 5-й Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее».

Ключевые слова: космический мусор.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ведущими космическими державами уделяется повышенное внимание проблеме загрязненности околоземного космического пространства большим количеством искусственно созданных объектов, не выполняющих полезных функций (обломки ступеней ракет-носителей (РН), нефункционирующие космические аппараты (КА) и др.). Моделирование популяции космического мусора (КМ), выполненное ведущими космическими агентствами, показывает, что ситуация для некоторых околоземных орбит уже является критической и требуются решительные и эффективные действия для улучшения ситуации [15]. При этом многими экспертами высказывается мнение, что для решения проблемы необходимо выполнять операции по активному удалению КМ, предполагающие его непосредственный увод с околоземных орбит.

В настоящее время прорабатывается ряд концепций активного удаления орбитальных обломков, в которых рассматриваются различные подходы от непосредственного захвата объекта КМ с помощью вспомогательных устройств (на-

пример, сети или гарпуна) перед удалением их с орбиты, до применения лазерных систем [16] и электродинамических связей [17].

Одним из подходов для решения проблемы КМ является использование КА-пастуха с ионным лучом (ПИЛ) [14] 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.

Проект LEOSWEEP [4], посвященный развитию технологии ПИЛ, объединил усилия 11 команд из ведущих научно-исследовательских и конструкторских центров Европейского Союза и Украины и финансировался в рамках 7-й Европейской рамочной программы. Рабочей программой этого проекта предусмотрена организация Украинско-европейского семинара по активному удалению космического мусора. Проведение такого семинара обусловлено необходимостью обсуждения задач

проекта LEOSWEEP и достигнутых результатов, а также привлечения внимания широкой аудитории к проблеме космического мусора.

Семинар по активному удалению космического мусора прошел с 20 по 21 мая 2015 г. во Дворце студентов Днепропетровского национального университета и был включен в программу 5-й Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», которая организована Государственным космическим агентством Украины, ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» и другими украинскими предприятиями и организациями под эгидой Международной академии астронавтики. Сопредседателями семинара выступили руководитель команды проекта LEOSWEEP профессор А. П. Алпатов, Институт технической механики (ИТМ) НАН Украины и ГКА Украины, и научный руководитель проекта доктор К. Бомбарделли, представляющий Мадридский технический университет.

В настоящей статье проведен анализ материалов семинара и выделены основные представленные на нем результаты.

Пленарный доклад о проблеме удаления орбитального мусора. Накануне начала работы семинара заведующий отделом системного анализа и проблем управления ИТМ НАН Украины и ГКА Украины, член руководящей группы Межагентского комитета по космическому мусору (МККМ) А. П. Алпатов выступил на пленарном заседании 5-й Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее» с докладом, посвященным проблеме космического мусора и путям ее решения. Такой доклад позволил существенно расширить аудиторию, которой может быть интересна проблема космического мусора, учитывая то, что в этом году в конференции приняли участие более 300 специалистов из 20 стран. В докладе был представлен обзор деятельности ведущих космических держав, связанной с проблемой КМ, а также работы украинских экспертов в МККМ за весь период членства в комитете ГКАУ начиная с 2001 г. Особое внимание в докладе уделено вопросам моделирования популяции КМ, прогнозирования падения на Землю орбитальных объектов, разработки нормативных документов

для уменьшения техногенного загрязнения космического пространства, проблеме увода с орбит космической техники, выполнившей свои задачи, контактными и бесконтактными методами активного удаления КМ.

На семинаре основное внимание было уделено задачам и результатам, связанным с развитием технологии ПИЛ в рамках проекта LEOSWEEP.

Анализ эффективности увода с орбиты верхних ступеней ракет-носителей. В соответствии с международными правилами объекты космической техники необходимо уводить с НОО после завершения их миссии таким образом, чтобы срок их пребывания на орбите не превышал 25 лет. Традиционный подход при выполнении этой задачи приводит к существенному увеличению массы топлива реактивных двигателей (РД). Например, для увода верхней ступени РН массой 2000 кг масса ракетного топлива составляет 100 кг и более в зависимости от ее начальной орбиты. Учитывая эту особенность, рассмотрен сценарий, когда ПИЛ сначала выполняет операции по уводу верхней ступени РН, которая вывела его, а затем приступает к задачам удаления КМ [5]. Результаты расчетов показывают, что такой подход позволяет уменьшить массу топлива для увода верхней ступени в 4—8 раз. Например, при уводе верхней ступени РН массой 2100 кг с начальной орбиты высотой 900 км, использование технологии ПИЛ позволяет уменьшить массу топлива на 60 кг в сравнении со случаем использования РД с удельным импульсом 330 с. Предлагаемый подход дает возможность для рассмотренной задачи экономить 130 кг рабочего тела в сравнении со случаем применения двигателя с удельным импульсом 160 с. Эти особенности целесообразно учитывать при планировании будущих миссий по активному удалению КМ.

Пути снижения затрат химического топлива в системе управления пастуха с ионным лучом. В процессе увода выбранного объекта ПИЛ вынужден совершать перемещения как в плоскости орбиты увода, так и в перпендикулярном направлении. Для выполнения таких маневров в настоящее время в проекте LEOSWEEP предполагается использование химических двигателей малой тяги. С точки зрения авторов доклада [1] более

энергетически экономичным может быть метод, основанный на использовании механизма, перемещающего с помощью электрического привода оба основных ЭРД по граням корпуса КА-пастуха таким образом, чтобы относительно его центра масс не возникал дополнительный момент, усложняющий работу системы ориентации. Используя предлагаемое решение, можно существенно снизить применение химического топлива на борту ПИЛ, заменив его солнечной энергией. Для этого солнечные батареи (СБ) КА-пастуха должны получать максимальное количество энергии в любой точке орбиты, не находящейся в тени Земли. Один из немногих случаев, когда КА может не изменять ориентацию главного отсека и направлять СБ строго на Солнце только за счет их вращения вокруг их собственных продольных осей, соответствует расположению Солнца в плоскости орбиты КА. Во всех остальных случаях для совмещения орта нормали к рабочей поверхности СБ с ортом направления на Солнце КА должен совершать повороты относительно оси крена. В докладе представлены результаты расчетов, позволяющие определить необходимое значение такого угла поворота, а также графики изменения этого угла и угла поворота СБ во времени, соответствующие максимальному получению энергии на освещенных участках орбиты. Для иллюстрации результатов авторами были подготовлены и продемонстрированы анимации, позволяющие увидеть движение КА-пастуха и его СБ для различных случаев расположения орбиты по отношению к Солнцу.

Упрощенная модель сил ионного пучка, действующих на мишень. В докладе [8] представлены результаты по построению упрощенной модели сил ионного пучка, действующих на сферическую мишень. Создание такой модели позволяет лучше понять закономерности воздействия пучка на мишень, упростить синтез законов управления движением и выполнить аналитические оценки их эффективности. При проведении исследований предполагалось, что плотность ионного пучка имеет гауссовское распределение, а поверхность сферы не выходит за пределы пучка. В силу громоздкости вычисления интегралов по поверхности сферы в общем случае рассмотре-

на возможность приближенного аналитического описания силы. Для рассмотренного случая получены достаточно простые выражения с погрешностью описания силы в несколько процентов.

Исследование орбитального движения системы «пастух — цель». В докладе [11] рассмотрены особенности изменения орбиты космического объекта при малых трансверсальных ускорениях, обусловленных работой ЭРД. Такая задача занимает значимое место в проекте по активному удалению КМ с помощью технологии ПИЛ. Авторами показано, что постоянное трансверсальное ускорение не приводит к значительному увеличению эксцентриситета орбиты, и она остается квазикруговой.

Рассмотрены особенности задачи с учетом переменности ускорения, направленного вдоль трансверсали к орбите, обусловленного необходимостью отключения ЭРД при заходе системы в тень Земли. С учетом влияния на орбитальное движение второй зональной гармоники геопотенциала показана возможность существенного резонансного изменения эксцентриситета орбиты за счет отключения ЭРД на ее теневой стороне. Рассмотрена возможность управления орбитальным движением путем выбора времени включения / выключения двигателей и проведен анализ такой задачи.

Расчет воздействия факела электрореактивного двигателя на объект космического мусора. Одним из ключевых вопросов, возникающих при исследовании концепции ПИЛ, является определение силы, передаваемой пастухом объекту КМ. Знание этой силы необходимо как для успешной реализации выбранной программы увода, так для решения задач навигации и управления относительным движением системы «пастух — объект космического мусора».

Традиционный подход определения передаваемой силы основывается на интегрировании элементарных сил по поверхности объекта. Однако для его реализации необходима информация о точной форме, размерах объекта и его ориентации, а его применение для рассматриваемой задачи представляется затруднительным.

В связи с этим в докладе [2] предложен другой подход, позволяющий определять передаваемую

силу на основании существенно меньшего объема информации об уводимом объекте (мишени), а именно по его центральной проекции на выбранную плоскость.

Для получения изображения центральной проекции мишени на орбите предложено использовать фотокамеру. Разработаны алгоритмы вычисления контура мишени, определения на основании этого контура элементов луча, попадающих на уводимый объект, а также расчета передаваемой силы. Исследованы вопросы неточности определения контура мишени вследствие несовпадения фокальной точки фотокамеры с вершиной воображаемого конуса луча. Предложены алгоритмы коррекции контура, определенного по фотоснимкам смещенной камеры. Проведены численные расчеты, иллюстрирующие эффективность предложенного подхода. Представлен общий алгоритм обработки фотоснимков для получения контура мишени.

Управление относительным движением системы «пастух — мишень». В докладе [3] проанализирована возможность использования в законе управления относительным движением «пастух — объект космического мусора» информации о воздействии факела ЭРД на объект. При этом предполагается, что информация о величине воздействия факела получена на основе геометрии контура объекта на картинной плоскости фотокамеры. Задача решается путем сравнения результатов моделирования относительного движения рассматриваемой системы для случая, когда относительное пространственное положение элементов системы считается известным, и величина воздействия факела ЭРД определяется непосредственным интегрированием по поверхности объекта КМ, и для случая, когда величина воздействия факела получена на основе геометрии контура объекта КМ. Как один из возможных вариантов рассматривается также случай определения пространственного положения объекта КМ на основе геометрии его контура на картинной плоскости. Сделан вывод о применимости предложенного ранее подхода определения факела ЭРД на орбитальный объект в процессе управления относительным движением рассматриваемой системы.

Визуальное моделирование динамики в проекте LEOSWEEP. В докладе [13] представлены особенности разработки модели неуправляемого движения спутника в составе программного обеспечения Design Simulation Facility (DSF), предназначенного для моделирования в проекте LEOSWEEP. Разработка DSF ведется в пакете визуального моделирования Simulink. Разработана модель орбитального и углового движения с учетом действия возмущений, вызванных нецентральностью гравитационного поля Земли, притяжением Солнца и Луны, давлением солнечного излучения, аэродинамическим торможением и влиянием магнитного поля. Выполнены оценки величин возмущений с точки зрения необходимости их учета при моделировании движения спутника и объекта КМ в рамках задач проекта. Показано, что наиболее существенное влияние на орбитальное движение оказывают низшие гармоники геопотенциала и силы аэродинамического торможения, а на угловое движение — момент гравитационных сил, аэродинамический момент, и при определенных условиях — момент, действующий со стороны геомагнитного поля. Учет только этих возмущений позволяет существенно упростить компьютерную модель и сократить время расчетов. В докладе также отмечено, что применение пакетов визуального моделирования связано с рядом трудностей, возникающих при реализации моделей возмущений, описываемых громоздкими формулами, а также рассмотрены пути преодоления таких сложностей.

Некоторые правовые проблемы, возникающие в связи с активным удалением космического мусора. В докладе [7] отмечено, что проблема КМ является новой для международного космического права и национальных законодательств космических стран. Международное космическое право создавалось в 1960—1970-е гг., когда доминировал подход к космическому пространству как безграничному, и считалось, что емкость космических орбит неограниченна.

В настоящее время включение вопроса разработки международно-правового инструмента по минимизации КМ в качестве самостоятельного пункта повестки дня юридического подкомитета UN COPUOS блокируется рядом государств.

Однако определенные шаги по формированию международно-правового режима обращения с КМ предпринимаются на уровне различных международных организаций. По информации, полученной UN COPUOS от 22 государств, ровно половина из них, включая Украину, имеют свои национальные инструменты по минимизации загрязнения космического пространства. Основное внимание в этих документах сосредоточено на предотвращении образования КМ, в то время как вопросы удаления уже существующего мусора рассмотрены лишь схематично.

В докладе отмечается, что в условиях отсутствия специальных обязательных международно-правовых механизмов обращения с КМ необходимо руководствоваться положениями пяти общих договоров ООН по космосу, рекомендациями международных организаций, национальными законодательствами, соглашениями между заинтересованными сторонами.

В докладе [12] освещены международно-правовые вопросы обеспечения транспарентности деятельности в космическом пространстве при решении задач активного удаления КМ.

Выездное заседание семинара. 21 мая 2015 г. состоялось выездное заседание Украинско-европейского семинара в лаборатории Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, где находится плазмодинамический стенд. В рамках выездного заседания с участием научного руководителя проекта LEOSWEEP К. Бомбарделли и заведующего отделом механики ионизированных сред ИТМ НАН Украины и ГКА Украины профессора В. А. Шувалова состоялось обсуждение задач проекта в части моделирования взаимодействия ионного пучка с конструкционными материалами объектов ракетно-космической техники. Был определен состав и перечень материалов, механизмы взаимодействия ионов пучка с объектами КМ, которые приводят к эрозии и разрушению поверхности материалов, уточнены сроки и задачи проекта, которые предстоит решить с использованием плазмодинамического стенда.

На семинаре также были представлены доклады, посвященные проблеме космического

мусора, которые непосредственно не связаны с выполнением проекта LEOSWEEP. Авторы доклада [10] представили аналитический обзор современных идей, методов, тенденций и проектов, посвященных проблеме космического мусора. В докладе [6] представлены результаты исследований различных схем увода в плотные слои атмосферы, построенные на совместном использовании как активных средств, таких как маршевые и электрореактивные двигательные установки, так и пассивных средств, выполненных на основе солнечного и аэродинамического паруса. Проведен анализ эффективности таких схем увода КМ с различных орбит. Доклад [9] посвящен методике проектирования аэродинамических систем увода КА с околоземных орбит, в которой реализован итерационный подход к расчету параметров и оцениванию эффективности на различных этапах ее проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе семинара было заслушано 14 докладов, посвященных как научно-техническим вопросам решения проблемы уменьшения загрязнения космического пространства, так и правовым вопросам международного сотрудничества. В работе семинара и обсуждении докладов приняли участие более 50 участников. Обсуждались различные методы удаления объектов космического мусора с рабочих орбит, среди которых активные и пассивные, контактные и бесконтактные. Наибольшее внимание было уделено решению задач реализации технологии «пастух с ионным лучом». Обсуждение проблем загрязнения околоземного космического пространства на Украинско-европейском семинаре по активному удалению космического мусора будет способствовать успешному выполнению проекта LEOSWEEP, решению общей проблемы космического мусора, а также повысит эффективность сотрудничества между украинскими и европейскими учеными.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта LEOSWEEP, финансируемого в рамках 7-й Европейской рамочной программы (грант № N.607457).

1. Алпатов А. П., Закржевский А. Е. Пути снижения затрат химического топлива в системе управления космического аппарата «пастух» // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 80—81.
 2. Алпатов А. П., Закржевский А. Е., Мерино М. Расчет воздействия факела электрореактивного двигателя на объект космического мусора // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 84.
 3. Алпатов А. П., Савчук А. П., Фоков А. А., Хорошилов С. В. Использование информации о контуре объекта космического мусора (КМ) в управлении относительным движением системы «пастух — объект КМ» // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 82.
 4. Бомбарделли К., Алпатов А. П., Пироженко А. В. и др. Проект «Космического пастуха» с ионным лучом. Идеи и задачи // Космічна наука і технологія. — 2014. — **20**, № 2. — С. 55—60.
 5. Бомбарделли К., Гонсало Х. Л., Уррутксау О. Анализ эффективности увода с орбиты верхних ступеней ракет-носителей с использованием космического аппарата-пастуха с ионным лучом // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 80.
 6. Дроч Н. М., Голубек А. В., Хорольский П. Г., Дубовик Л. Г. Анализ схем увода космических объектов с околоземных орбит // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 80.
 7. Мальшева Н. Р. Некоторые правовые проблемы, возникающие в связи с активным удалением космического мусора // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 81.
 8. Маслова А. И., Пироженко А. В. Упрощенная модель сил ионного пучка, действующих на шар // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 81.
 9. Палий А. С. О методике проектирования аэродинамических систем увода космических аппаратов // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 26.
 10. Панасенко О. Э., Бондаренко С. Г. К вопросу о методах борьбы с космическим мусором // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 81.
 11. Пироженко А. В., Маслова А. И., Волошинюк О. Л. Об изменении орбитального движения системы пастух-цель // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 81.
 12. Стельмах О. С. Международно-правовой режим обеспечения транспарентности деятельности в космическом пространстве // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 82.
 13. Храмов Д. В. Визуальное моделирование динамики в проекте LEOSWEEP // Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: Тез. докл. — Днепропетровск, 2015. — С. 83.
 14. Bombardelli C., Peláez J. Ion beam Shepherd for contactless space debris removal // JGCD. — 2011. — **34**, N 3. — P. 916—920.
 15. Liou J.-C., Anilkumar A. K., Bastida B., et al. Stability of the future Leo environment — an IADC comparison study // Proc. “6th European Conference on Space Debris” Darmstadt, Germany, 22—25 April 2013 (ESA SP-723). — 2013.
 16. Phipps C. R., Reilly J. P. ORION: clearing near-Earth space debris in two years using a 30-kW repetitively-pulsed laser // SPIE Proceedings of the International Society for Optical Engineering. — 1997. — P. 728—731.
 17. Takeichi N. Practical operation strategy for deorbit of an electrodynamic tethered system // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — **43**, N 6. — P. 1283—1288.
- Стаття надійшла до редакції 17.11.15*
- А. П. Алпатов¹, К. Бомбарделли², С. В. Хорошилов¹*
- ¹ Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ
- ² Мадридський технічний університет, Мадрид, Іспанія
- ### КОНЦЕПЦІЯ АКТИВНОГО ВИДАЛЕННЯ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ
- Проведено аналіз матеріалів і виділено основні результати роботи Українсько-європейського семінару з активного видалення космічного сміття, що відбувся 20—21 травня 2015 р. у м. Дніпропетровськ у рамках програми 5-ї Міжнародної конференції «Космічні технології: теперішнє і майбутнє».
- Ключові слова:** космічне сміття.
- A. P. Alpatov¹, C. Bombardelli², S. V. Khoroshylov¹*
- ¹ Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Dnipropetrovsk
- ² Technical University of Madrid, Madrid, Spain
- ### CONCEPTIONS OF THE ACTIVE SPACE DEBRIS
- We review the presentations and summarize the main results, which were given during the Ukrainian — European seminar on active removal of space debris (20—21 May, 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine). This seminar was hold as a part of the program of the 5th International Conference “Space Technologies: Present and Future”.
- Key words:** space debris.