

ОТЗЫВ

Официального оппонента, исполняющей обязанности начальника центра автоматических космических систем и комплексов АО "ЦНИИМаш", доктора технических наук Твердохлебовой Екатерины Михайловны на диссертационную работу Свотиной Викторией Витальевны "Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 - "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Актуальность темы диссертации

Проблема космического мусора стала актуальной в последние десятилетия, когда количество космических объектов на орбите Земли значительно увеличилось. Космическим мусором являются отработавшие объекты космической техники, фрагменты их распада или столкновений, которые представляют собой техногенную угрозу осуществления космической деятельности.

Особенно остро стоит вопрос космического мусора на геостационарной орбите (ГСО). ГСО является не самоочищающейся орбитой (в обозримый промежуток времени) ввиду высоких значений времен баллистического существования космических аппаратов на ней. В виду экономической целесообразности использования ГСО и невозможности самоочищения этой орбиты, актуальной становится задача обеспечения очистки космического пространства.

Увод отработавших космических аппаратов (КА) с рабочей орбиты на орбиту захоронения за счет использования собственной двигательной установки зачастую невозможен. Как правило, аппараты эксплуатируются на орбите до последнего грамма топлива. Отработавшие модели спутников не

могут быть дозаправлены на орбите, т.к. при их проектировании не были заложены такие технические решения. Поэтому применение для этих целей отдельного сервисного КА представляется весьма обоснованным.

Вышесказанное обуславливает актуальность выбранной темы диссертационной работы Свотиной В.В.

Новизна полученных результатов и выводов

Для удаления объектов космического мусора (ОКМ) предполагается использование сервисного космического аппарата (СКА), который будет дистанционно воздействовать на ОКМ высокоскоростным ионным пучком, тем самым уводя его с рабочей орбиты. В работе показано, что взаимодействие с ОКМ посредством плазменной струи, создаваемой электроракетной двигательной установки (ЭРДУ), является универсальным способом отчистки космического пространства от ОКМ различной геометрии и размера.

В предложенном автором облике СКА в качестве плазменного источника, который взаимодействует с ОКМ, используется высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД). ВЧИД обладает высокими тяговыми и энергетическими характеристиками, обеспечивает наименьший угол расходимости пучка и толерантен к используемому рабочему телу.

Проведенные автором проектные исследования высокочастотного ионного двигателя с малым углом расходимости пучка являются новыми, а результаты, выносимые автором на защиту, впервые получены лично автором и научная новизна их также не вызывает сомнений. В частности, соискателем впервые:

- проведено моделирование ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИД с щелевой и гексагональной круглой перфорациями электродов с построением моделей полных факторных экспериментов и выполнена оптимизация параметров ИОС с целью получения минимальных углов расходимости генерируемого ионного пучка;

- оценены необходимые параметры ЭРДУ СКА для выполнения СКА целевой задачи по уводу ОКМ на орбиты захоронения, решена задача по выбору конкретного ОКМ или цепочки ОКМ, которые могут быть уведены из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения заданной ЭРДУ СКА в рамках единичной миссии СКА;

- сформирован облик ЭРДУ СКА, включающей разработанный ВЧИД, выполняющий задачи фазирования СКА относительно ОКМ и оказывающий силовое воздействие на ОКМ.

Значимость результатов для науки и производства

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют произвести моделирование конструктивных элементов ВЧИД и получить регрессионные зависимости для углов расходимости ионных пучков, генерируемых ИОС с щелевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов, что позволяет без проведения полномасштабного моделирования оценить интегральные параметры ВЧИД, а также оптимизировать конструкцию ИОС ВЧИД. С помощью разработанных методов проектного анализа может быть оценена возможность и целесообразность увода конкретных ОКМ.

Результаты диссертации Свотиной В.В. могут быть полезны при разработке СКА для очистки космического пространства от ОКМ. Следовательно, результаты диссертации могут быть использованы организациями-разработчиками космических аппаратов - АО "РКЦ "Прогресс", АО "Решетнев", АО "Корпорация "ВНИИЭМ", АО "НПО Лавочкина" и др.

*Обоснованность и достоверность научных положений и выводов,
сформулированных в диссертации*

Автором на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Облик ЭРДУ СКА для бесконтактной транспортировки ОКМ техногенной природы, состоящей из компенсирующих стационарных плазменных двигателей и ВЧИД, выполняющего две функции: точного позиционирования СКА и воздействия на ОКМ.
2. Метод оценки угла расходимости ионного пучка в зависимости от геометрических параметров ИОС, позволяющий оптимизировать конструкцию узла ИОС в соответствии с требованиями к системе бесконтактной транспортировки ОКМ. Методика усреднения энергий ионизации и возбуждения энергетических уровней термов рабочих тел для построения балансовой модели частиц и мощности в ГРК ВЧИД с учетом вариации массового потока атомов рабочего тела.
3. Результаты исследовательских испытаний экспериментального образца ВЧИД, использующего в своем составе ИОС с различной конфигурацией электродов, в том числе и из нового конструкционного материала, при работе на различных рабочих телах.
4. Модель воздействия ионного пучка на ОКМ и результаты проектно-баллистического анализа виртуальной связки "СКА-ОКМ", показывающие принципиальную возможность последовательного увода нескольких ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения одним СКА.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается поставленными задачами, целью и логикой исследования, теоретической базой, строгостью использования математического аппарата, верификацией математических моделей и полученных результатов с известными математическими моделями и опубликованными результатами, полученными другими авторами, использовавшими иные методы и методики.

Краткая характеристика основного содержания работы

Диссертация Свотиной В.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 273 наименований.

Введение посвящено обоснованию актуальности тематики диссертационного исследования. Определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту, указан личный вклад соискателя в исследование, положенные в основу диссертационной работы.

В *первой главе* представлен анализ накопления ОКМ на орбитах, близких к ГСО, показано, что основными источниками возникновения ОКМ в околоземном космическом пространстве (ОКП) являются самопроизвольные и/или преднамеренные разрушения КА на орбите, которые приводят к долгосрочному засорению ОКП; ОКМ, высвобождаемый умышленно во время функционирования орбитальных ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и КА. В главе приведен анализ основных способов, устройств и методов увода ОКМ из защищаемых областей ОКП, проведено их сравнение, представлены оценочная массовая модель СКА и результаты предварительного проектного анализа виртуальной связки "СКА-ОКМ". На базе данных оценок сформированы требования к ЭРДУ СКА, целевым назначением которой является увод ОКМ из защищаемой области ГСО. Показана необходимость исследования высокочастотного ионного двигателя как ключевого элемента системы бесконтактной транспортировки ОКМ из защищаемой области геостационарной орбиты. Рассматриваемый ВЧИД входит в состав ЭРДУ СКА. Под СКА понимается интенсивно разрабатываемые в последнее время специальные автоматические КА, предназначенные для осуществления различных операций обслуживания с целью продления ресурса или перевода на другие орбиты размещенных ранее на рабочих орбитах КА. В предложенном в работе варианте ЭРДУ СКА включает СПД в качестве компенсирующих двигателей и ВЧИД, на который возлагаются как транспортные операции в части фазирования СКА относительно ОКМ, так и задача генерации высокоимпульсного потока для бесконтактной транспортировки ОКМ. С учетом сформулированных требований к системе бесконтактной транспортировки ОКМ сформирован облик ЭРДУ СКА.

Вторая глава посвящена физико-математическому моделированию ВЧИД как элемента системы бесконтактной транспортировки ОКМ. Описан принцип работы типового ВЧИД. Кратко представлен существующий научно-технический задел по разработке ИД. Рассмотрены физические процессы, протекающие во ВЧИД, и на их базе сделаны выводы о необходимом конструктивном исполнении ВЧИД, в целом, и его критических элементов, в частности, которыми являются ионно-оптическая система и газоразрядная камера, для обеспечения выполнения требований, предъявляемых к ЭРДУ СКА.

Показано, что использование ВЧИД для задачи транспортировки ОКМ обусловлено его преимуществами перед другими высокоимпульсными ЭРД, в частности ионным двигателем с разрядом постоянного тока, - в части возможности регулировки выходных характеристик по нескольким каналам; меньшим количеством систем электропитания, а, следовательно, меньшей массой и повышенной надёжностью системы в целом; а также слабой чувствительностью элементов двигателя к загрязнениям, возникновение которых возможно при распылении поверхностей ОКМ ионным потоком и формировании обратного движения и осаждения распыленных атомов на элементах двигателя. В главе представлена математическая модель воздействия ионного пучка на ОКМ, на базе которой показана необходимость генерации высококоллимированных ионных пучков. Рассмотрено несколько моделей ионно-оптических систем: с круглой гексагональной перфорацией электродов и с щелевой перфорацией электродов. Приведен расчет баланса частиц и мощности в газоразрядной камере и тягово-энергетических параметров ионного двигателя

В *третьей главе* представлены результаты испытаний экспериментальных образцов ВЧИД с различными конструктивными исполнениями ионно-оптической системы: с щелевой и гексагональной круглой перфорациями. Рассмотрено конструктивное исполнение экспериментальных образцов двигателей. Приведено построение модели факторного эксперимента для оптики с круглой перфорацией и с щелевой перфорацией. Описаны постановка и результаты испытаний экспериментальных образцов высокочастотного ионного

двигателя для двух вариантов ИОС, работающих на ксеноне и криптоне. Обоснованы интегральные характеристики экспериментального образца высокочастотного ионного двигателя.

В четвертой главе на основе проведенных экспериментальных исследований и физико-математического моделирования представлены результаты проектно-баллистического анализа виртуальной связки "СКА-ОКМ" и результаты моделирования транспортировки ОКМ на примере КА "Горизонт 18". Определены алгоритмы управления связкой "сервисный космический аппарат - объект космического мусора". Дана оценка силового воздействия ионного пучка для различных схем расположения ОКМ в связанной системе координат сервисного космического аппарата. Приведены результаты расчета увода нескольких близко расположенных ОКМ одним сервисным КА.

Замечания по диссертационной работе

1) Не представлен анализ возможных способов удержания объекта космического мусора в центре плазменного пучка ионного двигателя сервисного КА.

2) Не рассмотрены вопросы загрязнения сервисного КА продуктами распыления материалов объекта космического мусора и устойчивости алгоритма управления связки "СКА+ОКМ" в случае критической деградации характеристик дальномеров.

3) Не приведены расчеты максимального возможного числа ОКМ, которые могут быть сведены с рабочей орбиты одним СКА.

4) Не приведено экономическое обоснование выбора орбит, подлежащих первоочередной очистке от объектов космического мусора.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и их можно рассматривать как направления дальнейшей научной работы соискателя.

Апробация работы и публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 27 статьях, в том числе в 8 статьях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, из которых 8 соответствуют специальности 2.5.15., 22 статьях Scopus, в том числе 17 Web of Science. В сборниках тезисов и трудов конференций опубликовано 26 работ. Результаты работы используются в 2 патентах.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Диссертационная работа Свотиной В.В. "Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора" соответствует паспорту специальности 2.5.15 - "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов" (по пунктам 1, 2, 5, 6, 21, 22, 24).

Заключение

Рассмотренная диссертационная работа Свотиной Виктории Витальевны на тему "Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора" представляет собой законченный, выполненный на высоком уровне научный труд, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью. Выводы достоверны и согласуются с результатами, опубликованными в научной литературе. Работа в целом и библиография, в частности, свидетельствуют о широком научном кругозоре и высоком уровне компетентности автора в рассматриваемой предметной области.

Диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, в которой решается актуальная научная и техническая задача - разработка высокочастотного ионного двигателя для выполнения бесконтактной транспортировки объектов космического мусора в составе работы сервисного космического аппарата, что имеет большое

значение для обеспечения безопасности космической деятельности ракетно-космической отрасли.

По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости диссертация Свотиной Викторией Витальевны на тему "Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора" соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно пп. 9-14 "Положение о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 01.10.2018 № 1168), а её автор - Свотина Виктория Витальевна - заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 - "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

И.о. начальника Центра автоматических космических систем и комплексов, Акционерное общество "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")
доктор технических наук



Екатерина Михайловна Твердохлебова

02.08.2023

Почтовый индекс, адрес организации:

141070, Московская область, г.о. Королев, ул. Пионерская, д. 4, корп. 22

Телефон: +7(495) 513-59-51

Адрес электронной почты: corp@tsniimash.ru

Веб-сайт: <https://tsniimash.ru>

С отзывом ознакомлена
Файш - Ю.В. Свотина 09/08/2023