



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША»
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

Онежская ул., д. 8, Москва, Россия, 125438
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228
ОКПО 47430587 ОГРН 1217700095667 ИНН/КПП 7743355574 / 774301001
kerc@elnet.msk.ru; <https://keldysh-space.ru>

21.08.2023 № 300-15/158
на № 010/1728-2 от 04.07.2023

Отзыв на диссертацию Свотиной В.В.

Председателю диссертационного совета
Д 24.2.327.06 на базе федерального
государственного образовательного
учреждения «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,
д.т.н., профессору

Равиковичу Ю. А.

МАИ, Волоколамское шоссе 4,
Москва, 125993

Уважаемый Юрий Александрович!

Высылаю отзыв официального оппонента на диссертационную работу Свотиной Виктории Витальевны «Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: отзыв в двух экземплярах на 7 листах каждый.

С уважением,

Главный научный сотрудник, д.т.н.

Семёнкин А.В.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

22.08.2023

ОТЗЫВ

Официального оппонента Семёнкина Александра Вениаминовича на диссертационную работу Свотиной Виктории Витальевны «Высокочастотный ионный двигатель системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Актуальность темы исследования

Засорение околоземного космического пространства (ОКП) отработавшими объектами космической техники, фрагментами их распада или столкновений представляет собой техногенную угрозу осуществления космической деятельности, играющей важную роль в экономике и жизни общества. Во всем мире ведутся исследования различных методов очистки критически важных орбит, в том числе геостационарной орбиты (ГСО), от крупных фрагментов космического мусора и вышедших из строя космических аппаратов.

Цель работы – выбор и оптимизация параметров высокочастотного ионного двигателя электроракетной двигательной установки специального космического аппарата (ВЧИД ЭРДУ СКА), для удовлетворения им требований, предъявляемых к исполнительному элементу системы бесконтактной транспортировки объектов космического мусора (ОКМ).

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ обстановки в окружающем космическом пространстве (ОКП) в части загрязнения техногенными ОКМ, а также методов, средств и технических устройств, которые могут быть использованы для увода ОКМ на орбиты захоронения. Оценить потребные запасы характеристической скорости для увода ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения. Выработать рекомендации к построению ЭРДУ СКА и сформировать облик ЭРДУ СКА.
2. Выполнено моделирование ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИД с целевой и гексагональной круглой перфорациями электродов с построением моделей полных факторных экспериментов размерности 2^8 с оптимизацией параметров ИОС для получения минимальных углов расходимости генерируемого ионного пучка; оценить баланс мощности и частиц в газоразрядной камере (ГРК) ВЧИД на базе разработанной методики усреднения энергий возбуждения и ионизации энергетических термов рабочих тел с учетом изменения массового потока атомов рабочего тела при прохождении перфораций в электродах.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

22.08.2023

3. Изготовлен и испытан на различных рабочих телах экспериментальный образец ВЧИД с использованием в конструкции нескольких конфигураций ИОС, полученных при моделировании, с электродами из нового конструкционного материала, подтвердить интегральные характеристики ВЧИД как исполнительного элемента системы бесконтактной транспортировки ОКМ.
4. Проведено моделирование силового воздействия ионного пучка на ОКМ и проектно-баллистический анализ виртуальной связки СКА-ОКМ с подтверждением возможности увода нескольких ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения за одну миссию СКА.

Таким образом, тематика и направление работ диссертации, решаемые задачи, безусловно, являются актуальными и имеют важное практическое значение.

Результаты работы прошли широкую научную апробацию

По тематике диссертации автором представлены доклады на ведущих профильных научных конференциях. По теме диссертации опубликованы 27 работ, в том числе 8 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 17 статей в рецензируемых научных изданиях, получены 2 патента на изобретение.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, включает в себя 131 рисунок, 30 таблиц, а также 273 библиографические ссылки.

Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

Во введении обоснована актуальность темы, определен объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ накопления ОКМ на орбитах, близких к ГСО, показано, что основными источниками возникновения ОКМ в ОКП являются самопроизвольные и/или преднамеренные разрушения КА на орбите, которые приводят к долгосрочному засорению ОКП (40% всех ОКМ являются следствием разрушения крупных ОКМ на околоземных орбитах); ОКМ, высвобождаемый во время функционирования орбитальных ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и КА.

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 оценок сформированы требования к ЭРДУ СКА, целевым назначением которой является увод ОКМ из защищаемой области ГСО. Показана необходимость исследования ВЧИД как ключевого элемента системы бесконтактной транспортировки ОКМ.

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 ИОС и ГРК, для обеспечения выполнения требований, предъявляемых к ЭРДУ СКА.

В главе представлена математическая модель воздействия ионного пучка на ОКМ, на базе которой показана необходимость генерации высококоллимированных (сфокусированных) ионных пучков. Показано, что для решения поставленной задачи необходимо разработать такую конструкцию ВЧИД, которая бы обеспечивала минимальный угол расходимости ускоренного ионного потока. Для принятого базового размера ОКМ – 5м, получена оценка максимального расстояния, с которого необходимо оказывать воздействие ионным пучком на ОКМ. Это расстояние не должно превышать 35–40 м (площадь воздействия - 20 м²; угол расходимости ионного пучка - 4°). С увеличением расстояния воздействия на ОКМ требуемое значение угла расходимости ионного пучка уменьшается, но конструктивное изготовление такого ВЧИД повлечет необходимость уменьшения межэлектродных зазоров и существенного повышения точности изготовления и сборки ВЧИД, что не оправдано с технологической точки зрения.

Исходя из полученных требований, проведена оптимизация ИОС ВЧИД с щелевой и гексагональной круглой перфорациями электродов с оценкой влияния на расходимость ионных пучков геометрических параметров ИОС: толщин электродов (эмиссионный электрод (ЭЭ), ускоряющий электрод (УЭ), замедляющий электрод (ЗЭ)), межэлектродных расстояний, диаметров отверстий/ширины щелей.

В третьей главе представлены результаты испытаний экспериментального образца ВЧИД с щелевой и гексагональной круглой перфорациями на криптоне и ксеноне. Приведены данные о режимах двигателя и границах его эффективной работы.

Получены режимы, обеспечивающие минимальные углы расходимости ионных пучков. Для каждого случая построена геометрия ионного пучка и определены плотности ионного тока в сечениях ионного пучка.

Показана хорошая сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными.

В четвертой главе, в качестве примера практического применения, представлены результаты проектно-баллистического анализа связки СКА-ОКМ и результаты моделирования транспортировки ОКМ на примере КА Горизонт 18 (перигей: 35896,3 км; апогей: 36185,1 км, наклонение: $13,7^\circ$, большая полуось: 42411 км; период обращения: 1448,6 минут, эксцентриситет: 0,00345).

Показано, что единичная миссия СКА позволит увести на орбиту захоронения цепочку из семи ОКМ (все ОКМ имеют начальное наклонение орбиты, превышающее 13°). Масса ксенона, необходимая для транспортировки – 265,25 кг. Полное время миссии – 514 суток. Оптимальная дата старта СКА с орбиты ожидания – 2/072022, 5: 47 UTC. В целом увод семи ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиту захоронения создает условия для улучшения ситуации с безопасностью осуществления космической деятельности в весьма востребованной для народного хозяйства области.

Заключение содержит основные результаты и выводы по работе, показывающие, что поставленные в диссертационной работе задачи решены. Сформулированы практические рекомендации по практическому применению результатов работы.

Результаты диссертационной работы обладают научной новизной и практической полезностью.

Научная новизна результатов исследований состоит в том, что:

1. Проведено моделирование ИОС ВЧИД с малым углом расходимости ионного потока с щелевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов с построением моделей полных факторных экспериментов размерности 2^8 . Выполнена оптимизация параметров ИОС с целью получения минимальных углов расходимости

генерируемого ионного пучка, расчетным путем определен ресурс ВЧИД. Рассчитаны и экспериментально подтверждены выходные интегральные характеристики основных узлов ВЧИД как элемента системы бесконтактного увода ОКМ.

2. Сформирована **модель воздействия ионного пучка на ОКМ, которая позволяет** оценить 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 орбиту захоронения заданной ЭРДУ СКА в рамках единичной миссии СКА. Сформирован облик ЭРДУ СКА, включающей пару компенсирующих СПД и разработанный ВЧИД, выполняющий задачи точного позиционирования СКА относительно ОКМ и оказывающий силовое воздействие на ОКМ.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований заключается в следующем:

1. Оценены параметры ЭРДУ СКА для выполнения целевой задачи по уводу ОКМ с ГСО на орбиты захоронения. Решена задача по выбору ОКМ или цепочки ОКМ, которые могут быть перемещены из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения заданной ЭРДУ СКА в рамках единичной миссии. Сформирован облик ЭРДУ СКА, включающей пару компенсирующих ЭРД на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) и разработанный ВЧИД, выполняющий задачи точного позиционирования СКА относительно ОКМ и оказывающий силовое воздействие на ОКМ для его транспортировки на орбиту захоронения.
2. Результаты проведенного моделирования конструктивных элементов ВЧИД и полученные регрессионные зависимости для углов расходимости ионных пучков, генерируемых ИОС с щелевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов, позволяют без проведения полномасштабного моделирования оценить интегральные параметры ВЧИД, а также оптимизировать конструкцию ИОС ВЧИД с целью удовлетворения требований, предъявляемых ко ВЧИД как к элементу системы бесконтактной транспортировки ОКМ.
3. С использованием результатов предварительного моделирования разработана конструкция экспериментального образца ВЧИД, проведены его исследовательские испытания на различных рабочих телах. Проведены испытания электродов из нового высокоплотного углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) на основе нетканого каркаса. Подтверждены результаты проведенного моделирования и интегральные характеристики

ВЧИД. Расчетным путем получена оценка ресурса экспериментального образца ВЧИД при его работе на разных рабочих телах и с использованием различных по конструктивному исполнению электродов.

4. С помощью разработанных методов проектного анализа оценена возможность и целесообразность увода конкретных ОКМ. Данные методы обладают практической значимостью для выбора цепочки ОКМ, подлежащих уводу в рамках единичной миссии СКА. Выработанные рекомендации позволяют провести проектную проработку ЭРДУ СКА. С помощью построенной модели силового воздействия ионного пучка на ОКМ можно оценить возможность увода конкретного ОКМ ВЧИД с заданными параметрами, уточнить необходимые параметры работы системы управления СКА и углы отклонения компенсирующих ЭРД; получить необходимые диапазоны варьирования параметров ВЧИД, размещенного на борту СКА заданной массы, для увода конкретного ОКМ.

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается применением аттестованной современной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения. Достоверность теоретических исследований подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчетов с результатами эксперимента.

В качестве недостатков работы можно отметить следующее:

1. В работе рассматривается использование высокочастотного ионного двигателя для формирования сфокусированного ионного пучка, воздействующего на объект космического мусора. Однако не приведены данные о применимости результатов, полученных в работе, для использования другого типа ионного двигателя - построенного по схеме Кауфмана, и о сопоставлении ВЧИД и двигателя схемы Кауфмана для решения поставленной задачи.
2. Не приведен анализ возможной закрутки ОКМ под воздействием направленного ионного потока ВЧИД и возможности управления закруткой ОКМ за счет управления направлением ионного пучка.
3. Не приведены оценки влияния распыленного материала ОКМ на работу ионного двигателя и специального космического аппарата в целом.
4. Оценка ресурса ионного двигателя, создающего сфокусированный пучок для воздействия на ОКМ, проведена только расчетным путем и без прямого экспериментального подтверждения скорости эрозии электродов ВЧИД в режимах, предпочтительных для воздействия на ОКМ.

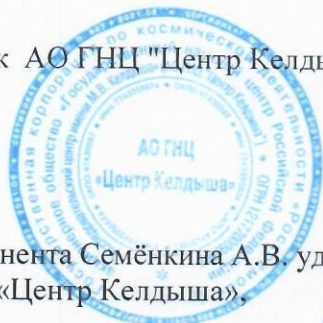
Однако отмеченные недостатки не снижают общего положительного представления о диссертации как о цельной научной работе и не ставят под сомнение полученные результаты и разработанные рекомендации. Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решены важные задачи, имеющие большое значение для создания и применения электроракетных двигательных установок на основе стационарных плазменных и высокочастотных ионных двигателей.

Диссертационная работа является актуальной, обладает новизной и практической полезностью, выводы и рекомендации, сделанные в работе, обоснованы.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.

В целом диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ, а ее автор В.В. Свотина заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Главный научный сотрудник АО ГНЦ "Центр Келдыша",
доктор технических наук



А.В. Семёнкин

Подпись официального оппонента Семёнкина А.В. удостоверяю
Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
кандидат военных наук

Ю.Л. Смирнов

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
«Исследовательский центр имени И.В.Келдыша», адрес: Онежская ул., д.8, г. Москва, 125438
Электронная почта: semenkin@kerc.msk.ru
Телефон: 8 (495) 456-20-63

С отзывом ознакомлено

Файер В.В. Свотина
22/08/2023