

На правах рукописи



Свотина Виктория Витальевна

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ОБЪЕКТОВ
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Специальность 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Хартов Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Семенкин Александр Вениаминович**, доктор технических наук, доцент

АО «Государственный научный центр Российской Федерации – «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», главный научный сотрудник

Твердохлебова Екатерина Михайловна, доктор технических наук, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», И.о. начальника Центра автоматических космических систем и комплексов

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»**

Защита состоится «18» сентября 2023 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06

д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цели, приоритеты и задачи государственной политики Российской Федерации в области исследования, освоения и использования космического пространства определяются «Основами государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу», утвержденными Президентом Российской Федерации 19/04/2013 № Пр-906. Основными принципами осуществления Федеральной космической программы Российской Федерации в целях решения задач государственной политики в области космической деятельности в 2016–2025 годах являются техническая актуальность и реализуемость, существующие научно–технический и научно–технологический потенциалы, инновационность предлагаемых к реализации проектов и технологий, обеспечивающих мировой уровень технических и эксплуатационных характеристик космических аппаратов (КА). 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. Возникающее в результате деятельности человека загрязнение ОКП носят название «космический мусор» или объекты космического мусора (ОКМ).

Наиболее критичным с учетом потенциального экономического ущерба является возникновение ОКМ на геостационарной орбите (ГСО) – важной области ОКП с точки зрения функционального назначения размещаемых на ней КА, их высокой стоимости (как самого КА, так и его выведения) и невозможности самоочистения орбиты в обозримый промежуток времени ввиду высоких значений времен баллистического существования КА на ней. Минимальные требования по защите ГСО сводятся к необходимости обеспечить отсутствие ОКМ в области пространства, ограниченной по высоте: высота ГСО плюс/минус 200–300 км, а по широте, ограниченной областью плюс/минус 15° (Рисунок 1).

При рассмотрении стратегии очистки ОКП от ОКМ различными исследователями показано, что наиболее эффективно защита зоны рабочих орбит достигается при удалении крупногабаритных ОКМ техногенной природы. При такой стратегии снижаются риски лавинообразного размножения ОКМ из-за столкновения крупных ОКМ между собой (синдром Кесслера). Рисунок 2 представляет оценку степени загрязненности ОКП ОКМ с учетом различных сценариев активного увода ОКМ в конце срока активного существования

(САС) на базе построенных вероятностных моделей эволюции числа ОКМ на околоземных орбитах. Приведенные здесь данные свидетельствуют об актуальности задачи активного увода крупных ОКМ ввиду серьезности угрозы для осуществления безопасной космической деятельности в ближайшем будущем.

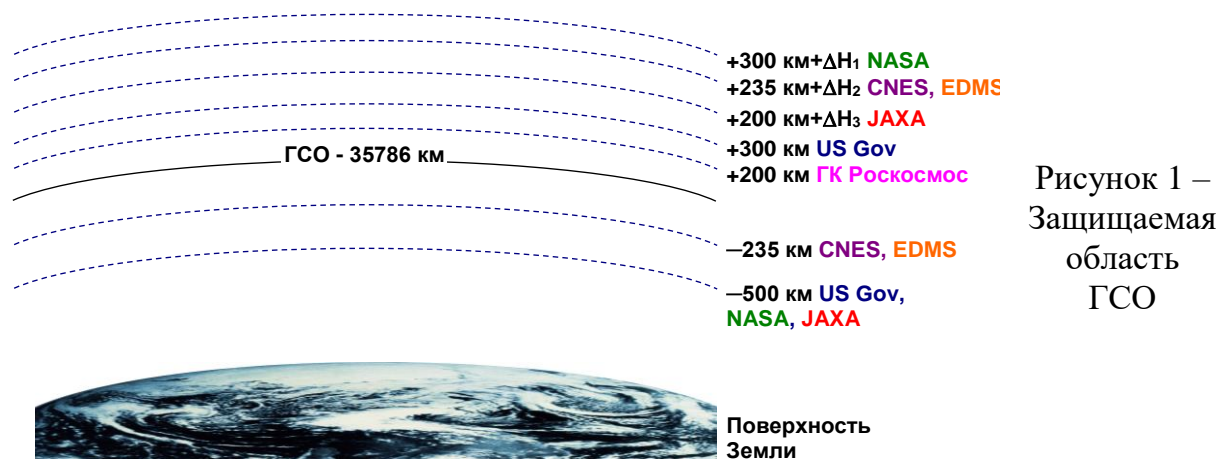
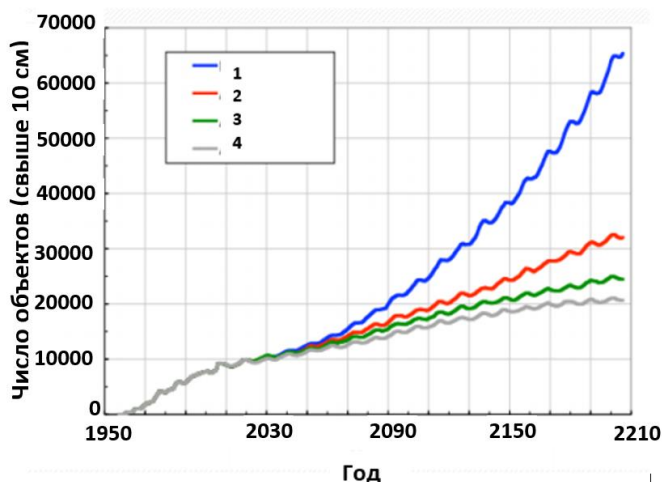


Рисунок 1 – Защищаемая область ГСО



- 1 – без увода в конце САС; 2 – увод в конце САС плюс активный увод 5 ОКМ;
- 3 – увод в конце САС плюс активный увод 10 ОКМ;
- 4 – увод в конце САС плюс активный увод 20 ОКМ в год, начиная с 2020 года

Рисунок 2 – Сравнение четырех различных сценариев степени загрязненности ОКП ОКМ

Использование на практике систем активного увода ОКМ способно существенно изменить загрязненность ОКП ОКМ техногенной природы.

Степень разработанности темы исследования. Одним из вариантов очистки ГСО от крупногабаритных ОКМ является исследуемый в МАИ метод бесконтактной транспортировки ОКМ с использованием высокоимпульсного электроракетного двигателя (ЭРД), входящего в состав электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) сервисного космического аппарата (СКА). Высокоимпульсные ЭРД исследуются и разрабатываются в ряде организаций (АО ГНЦ «Центр Келдыша», АО «ОКБ «Факел»). Однако все эти разработки ставят своей целью достижение высокой эффективности ЭРД как тягового устройства. Для задачи бесконтактной транспортировки ОКМ требования отличны и ранее не рассматривались. С учетом этого актуальность исследования обусловлена существующими современными тенденциями долговременного обеспечения безопасности

осуществления космической деятельности в части реализации всех возможных способов защиты и очистки ОКП от ОКМ техногенной природы.

Объект исследования – модифицированный высокочастотный (ВЧ) ионный двигатель (ИД), обеспечивающий в составе ЭРДУ СКА выполнение требований как к устройству для осуществления транспортных операций с КА, так и как к основному элементу системы бесконтактного увода ОКМ.

Предмет исследования – особые требования к системе генерации и ускорения ионных потоков ВЧИД для эффективного увода ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения.

Цель работы – выбор и оптимизация параметров ВЧИД ЭРДУ СКА, для удовлетворения им требований, предъявляемых к исполнительному элементу системы бесконтактной транспортировки ОКМ.

В соответствии с целью диссертации были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ: обстановки в 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. Выполнить моделирование ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИД с щелевой 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.
3. Изготовить и испытать 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. Провести 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.

Научная новизна результатов исследований состоит в том, что впервые:

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. Предложена методика оценки усредненных значений энергий возбуждения и ионизации энергетических уровней термов рабочих тел (ксенона и криптона) и проведена оценка баланса мощности и частиц в ГРК ВЧИД с учетом вариации массового потока атомов рабочего тела.
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

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 «ИПРЕССКОН®» по ТУ 23.99.14.130-859-56897835-2019. 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.

Методология и методы исследования В работе использованы: фундаментальные законы сохранения, методы расчета механики космического полета, математическое и статистическое моделирование, экспериментальные методы исследования характеристик ВЧИД, методы обработки экспериментальных данных, методы объектно-ориентированного программирования. Для оценки взаимного влияния геометрических параметров ИОС на угол расходимости ионного пучка моделирование проводилось в валидированном программном комплексе IGUN с использованием метода покоординатного спуска. Статистическое моделирование применено для построения моделей полного факторного эксперимента размерностями 2^8 и 2^3 для ИОС с щелевой и гексагональной круглой

перфорациями электродов. Верифицированный программный комплекс IOS-3D применялся для оценки эрозии электродов ИОС и ресурса ВЧИД в целом. Экспериментальные исследования выполнены для определения основных тягово-энергетических характеристик экспериментального образца ВЧИД, работающего на различных рабочих телах, с использованием в его составе ИОС с различными электродами, в том числе и из нового конструкционного материала. Методы физического и математического моделирования задействованы при построении модели воздействия ионного пучка на ОКМ. Методы объектно-ориентированного программирования эксплуатировались при проведении проектно-баллистического анализа виртуальной связки СКА-ОКМ.

Вклад автора в проведенное исследование

Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями, а именно:

1. Проведены: анализ засорения ОКП различными ОКМ техногенного происхождения; анализ средств, способов и технических устройств, которые могут быть использованы для построения СКА, осуществляющего увод ОКМ на орбиты захоронения в соответствии с требованиями нормативной документации; предварительный проектно-баллистический анализ, позволяющий выбрать группу (цепочку) ОКМ, подлежащую уводу в рамках одной миссии СКА.
2. Сформулированы требования к построению и техническим характеристикам ЭРДУ СКА, предназначенного для увода техногенных ОКМ из защищаемой области ГСО и сформирован облик ЭРДУ СКА.
3. Выполнены: анализ влияния геометрических параметров ИОС с щелевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов на угол расходимости ионного пучка с построением моделей полного факторного эксперимента размерности 2^8 ; анализ баланса частиц и мощности в ГРК на базе предложенной модели усреднения энергий возбуждения и ионизации рабочих тел с учетом изменения массового потока атомов рабочего тела при прохождении ионной оптики.
4. Изготовлен и испытан экспериментальный образец ВЧИД с ИОС с щелевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов при работе на различных рабочих телах с использованием в составе ИОС электродов из нового конструкционного материала. Проведена оценка эрозии электродов с различными перфорациями из нового конструкционного материала.

5. Построена модель воздействия ионного пучка на ОКМ, проведен проектно-баллистический анализ виртуальной связки СКА-ОКМ, показана возможность последовательного увода нескольких ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиты захоронения одним СКА, который может быть построен на базе существующих унифицированных космических платформ отечественной разработки

Положения, выносимые на защиту

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 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.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается хорошим соответствием полученных в диссертации результатов с аналогичными результатами, достигнутыми другими авторами, использовавшими иные методы и методики; опубликованными результатами экспериментальных исследований; применением апробированного математического аппарата; обоснованным выбором существующих методик измерений параметров испытываемого экспериментального образца ВЧИД, эксплуатацией при проведении исследовательских испытаний современной аттестованной экспериментальной базы и поверенных и/или калиброванных средств измерений.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы обсуждались на научных семинарах в МАИ, а также докладывались на 19 российских и международных

конференциях: 3 International Conference for Aero-Space Sciences, Версаль, Франция, 6–9/07/2009; 5, 6 and 7 European Conferences for Aeronautics and Space Sciences, Мюнхен, Германия, 1–5/07/2013, Краков, Польша, 29/06–4/07/2015, Милан, Италия, 3–7/07/2017; Joint Conference of 30 ISTS, 34 IEPC, 6 NSAT, Кобе, Япония, 4–10/07/2015; 15, 16, 17, 21 Международные конференции Авиация и космонавтика, Москва, РФ, 14–18/11/2016, 20–24/10/2017, 19–23/11/2018, 21–25/11/2022; 6 Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application, Самара, РФ, 28/08-2/09/2016; 7 European Conference on Space Debris, Дармштадт, Германия, 18–21/04/2017; 3 IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems, Москва, РФ, 30/05-1/06/2017; 68 IAC, Аделаида, Австралия, 25–29/09/2017; XXI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта, РФ, 24–31/05/2019; XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, Алушта, РФ, 6–13/09/2020; 2 International Conference on Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP): Engineering 2020, Красноярск, РФ, 16–18/04/2020; XLIV Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration, Москва, РФ, 28-31/01/2020; XXII Международная конференция ВМСППС, Алушта, РФ, 5–13/09/2021; 13 Мультиконференция по проблемам управления, Санкт-Петербург, 6–8/10/2020

Публикации. 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 работы. Работа представляет собой рукопись объемом 185 страниц печатного текста, включая 131 рисунок, 30 таблиц, 273 библиографических ссылок. Текст диссертации включает введение, 4 главы, выводы, список обозначений и сокращений, список литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 исследования, положенные в основу диссертационной работы.

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 умышленно во время функционирования орбитальных ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и КА. Фрагменты ОКМ, возникающие в результате столкновений ОКМ с КА или ОКМ/КА между собой, как предполагается, станут значительным источником ОКМ, так как за последние годы наблюдается тенденция к увеличению частоты таких эпизодов.

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 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. 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. Традиционно ЭРДУ СКА содержит от двух до четырех однотипных ЭРД, обеспечивающих только транспортные операции. В большинстве случаев выгодно использовать СПД. В предложенном варианте ЭРДУ СКА включает пару 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 ИОС и ГРК, для обеспечения выполнения требований, предъявляемых к ЭРДУ СКА.

Использование ВЧИД для задачи транспортировки ОКМ обусловлено его преимуществами перед другими высокоимпульсными ЭРД, в частности ИД 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. Рисунок 3 представляет принципиальную схему использования ионного пучка для воздействия на ОКМ.

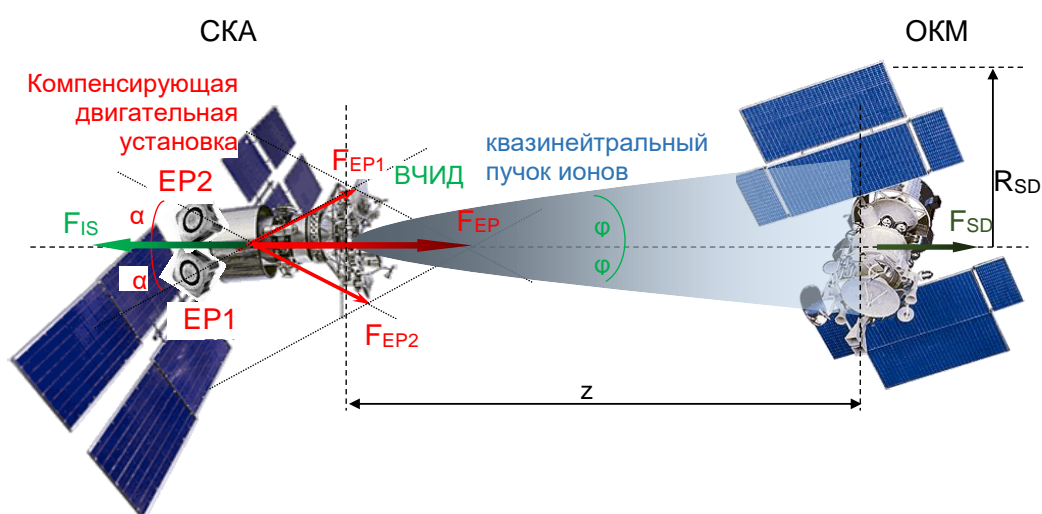


Рисунок 3 –
Принципиальная
схема
использования
ионного пучка
для воздействия
на ОКМ

Исходя из предположения, что распределение ионного тока в пучке подчиняется закону Гаусса имеем $\frac{I_i|_{d=0}}{I_i|_{d=\infty}} = 1 - \exp(-\sigma^{-2})$, где $I_i|_{d=0}$ – ионный ток на срезе ВЧИД; $I_i|_{d=\infty}$ – ионный ток на некотором удалении от среза, σ^2 определяет начальное распределение плотности ионного тока (для случая учета 95% ионного тока $\sigma=0,(3)$). С учетом амбиполярной диффузии электронов и ионов в слабо ионизированной плазме величина радиуса ионного пучка, распространяющегося в космическом пространстве, не подчиняется прямолинейному закону, а носит существенно более сложный характер, поскольку меняется и полуугол расходимости ионного пучка. Зависимость радиуса ионного пучка от удаления от среза ВЧИД может в безразмерных координатах быть описана соотношением

$\frac{d\bar{R}}{dz} = \sqrt{tg^2\alpha_0 + 12 \frac{\ln \bar{R}}{M^2}}$, где: $\bar{R} = R/R_0$ – безразмерная радиальная координата (R_0 – радиус ионного пучка на выходе из ВЧИД; R – радиус ионного пучка на удалении z); $dz = z/R_0$ – безразмерная продольная координата; α_0 – полуугол расходимости ионного пучка на срезе ВЧИД; $M^2 = 2q_i U_0 / T_e$ – начальное значение квадрата числа Маха ионного пучка; $q_i = 1,01e$ – заряд ионов с учетом 1% доли двухзарядных ионов, формирующихся в ГРК. Зависимость коэффициента передачи импульса от расстояния между СКА и ОКМ при различных габаритных размерах ОКМ представлена на графиках (Рисунок 4).

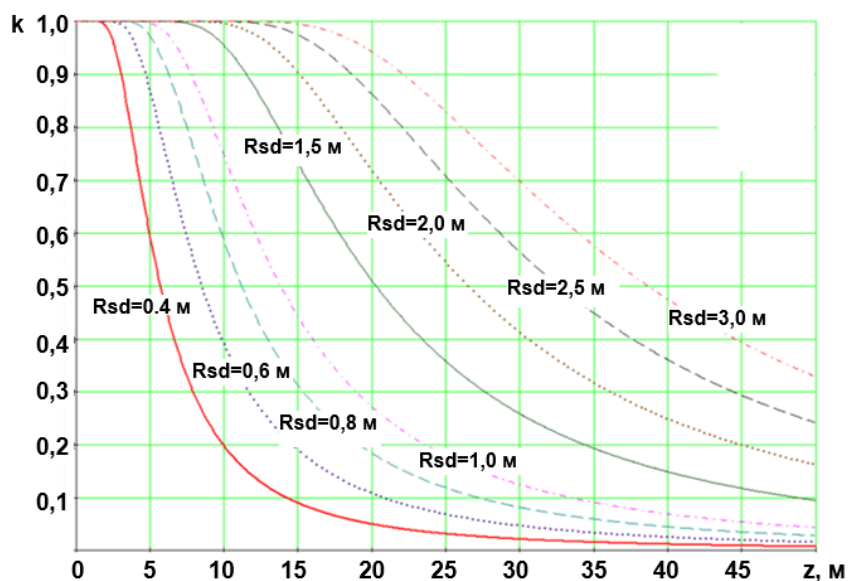


Рисунок 4 – Коэффициент передачи импульса от расстояния между СКА и ОКМ при различных габаритных размерах ОКМ

Для оценки доли усилия ВЧИД, передаваемой на ОКМ, необходимо рассчитать среднеквадратичные отклонения кругового распределения плотности тока ионного пучка в зависимости от тяги двигателя и удаления от среза ВЧИД.

Для нормального закона распределения известны формулы расчета вероятности попадания в круг заданного радиуса, а также вероятность попадания в прямоугольную область с заданными размерами, которые будут определять коэффициент использования ионного пучка.

Вероятность P попадания в круг D радиуса R с центром, совпадающим с центром двумерного нормального Гауссова закона распределения со среднеквадратическим отклонением σ , пропорциональна площади круга D :

$$P(X, Y \in D) = \frac{1}{2\sigma^2} \iint_D \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) dx dy = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

Вероятность попадания в прямоугольник R со сторонами, параллельными главным осям рассеивания:

$$P(X, Y \subset D) = \left[\Phi^* \left(\frac{\beta - m_x}{\sigma_x} \right) - \Phi^* \left(\frac{\alpha - m_x}{\sigma_x} \right) \right] \left[\Phi^* \left(\frac{\delta - m_y}{\sigma_y} \right) - \Phi^* \left(\frac{\gamma - m_y}{\sigma_y} \right) \right], \quad (2)$$

где: α, β, σ_x – положения сторон прямоугольника и среднеквадратическое отклонение по оси X ; γ, δ, σ_y – положения сторон прямоугольника и среднеквадратическое отклонение по оси Y ; Φ^* – нормальная функция распределения.

Для прямоугольника со сторонами a, b и круговым законом распределения со среднеквадратическим отклонением σ вероятность попадания в прямоугольник определяется соотношением:

$$\begin{aligned} P(X, Y \subset D) &= \left[\Phi^* \left(\frac{\alpha - m_x}{\sigma_x} \right) - \Phi^* \left(\frac{\beta - m_x}{\sigma_x} \right) \right] \left[\Phi^* \left(\frac{\gamma - m_y}{\sigma_y} \right) - \Phi^* \left(\frac{\delta - m_y}{\sigma_y} \right) \right] = \\ &= 2\Phi^* \left(\frac{a - m_x}{2\sigma_x} \right) 2\Phi^* \left(\frac{b - m_y}{2\sigma_y} \right) = 4\Phi^* \left(\frac{a}{2\sigma} \right) \Phi^* \left(\frac{b}{2\sigma} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет оценить долю импульса ионного пучка, передаваемую на ОКМ, когда проекция ОКМ на плоскость, ортогональную направлению распространения ионного пучка, имеет форму прямоугольника.

Полученные зависимости позволяют проводить оценки как углов расходимости ионного пучка для обеспечения эффективной передачи импульса ОКМ, так и требуемых расстояний между ОКМ и СКА для обеспечения безопасности маневров. При прочих равных условиях необходимо разработать такую конструкцию ВЧИД, которая бы обеспечивала минимальный угол расходимости. Приняв за базовый размер ОКМ – 5 м, можно получить оценку для 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 вышесказанного, проведена разработка и оптимизация ИОС ВЧИД с целевой 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. Моделирование проводилось в валидированном программном комплексе IGUN. По результатам

моделирования построены графические зависимости полууглов расходимости ионных пучков от варьируемых параметров, определены аппроксимирующие формулы, с достаточно высокой точностью, описывающие полученные зависимости, в некоторых случаях определены границы необходимого изменения диаметров отверстий в электродах для того, чтобы генерируемый ионный пучок не попал напрямую на следующие электроды ИОС. Примеры зависимостей приведены на графиках (Рисунки 5-7). Для каждого случая, соответствующего минимальному углу расходимости ионного пучка, при оценке влияния отдельных конструктивных факторов построена геометрия ионного пучка.

Показано, что оптимальный угол скоса в профилированном отверстии/щели ЭЭ равен 58° вне зависимости от использования ИОС пережатого или нормального типа, а также от наличия фасок на передней и задней кромках перфораций. Показано, что пережатая ИОС приводит к росту угла расходимости ионного пучка, что существенно отличает разрабатываемый ВЧИД от классических двигательных систем с углом расходимости ионного пучка порядка 15° .

Для ИОС с щелевой и гексагональной круглой перфорациями построены модели полного факторного эксперимента размерности 2^8 . В результате постановки задачи получено по 256 различных вариантов геометрического состояния каждой из ИОС. Для каждого из состояний определены оптимальные значения первеанса, обеспечивающего минимальный угол расходимости ионного пучка, на базе которых определены коэффициенты регрессии, показывающие взаимное влияние различных геометрических параметров ИОС на полуугол расходимости ионного пучка на выходе из ИОС. Получены коэффициенты регрессии для гексагональной круглой и щелевой перфораций. Показано, что наибольшее влияние на угол расходимости ионного пучка оказывают толщины ЭЭ/УЭ и ЭЭ-УЭ межэлектродный зазор. Необходимость и целесообразность упрощения модели путем неучета факторов порядка выше второго для круглой гексагональной перфорации должна определяться в зависимости от желаемой точности расчетов, поскольку их неучет не приведет к ошибке свыше 10%, что для предварительной оценки параметров ИОС и ВЧИД в целом достаточно. Для щелевой перфорации коэффициент регрессии четвертого порядка $\beta_{1268}=0,162$ (взаимное влияние толщины ЭЭ, ЭЭ-УЭ межэлектродного зазора, ширины щелей в ЭЭ и ЗЭ) оказывается достаточно велик, чтобы не принимать его во внимание. Он по модулю превосходит подавляющее большинство коэффициентов регрессии второго

порядка. Если достаточная точность расчетов находится на уровне 5%, то можно не принимать во внимание коэффициенты регрессии пятого и более порядков.

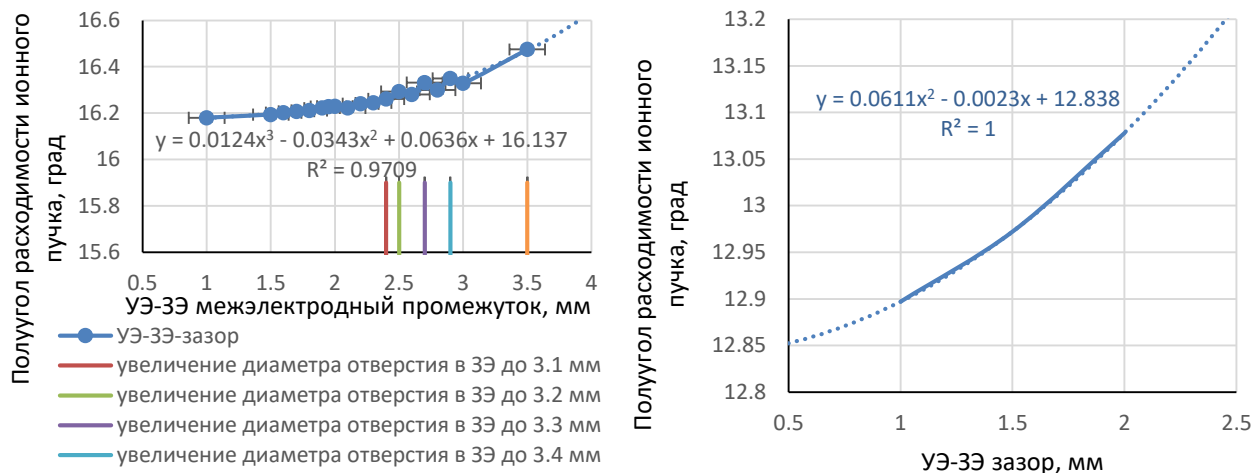


Рисунок 5 – Полуугол расходимости ионного пучка от УЭ-ЗЭ межэлектродного промежутка (круглая перфорация – слева, щелевая перфорация – справа)

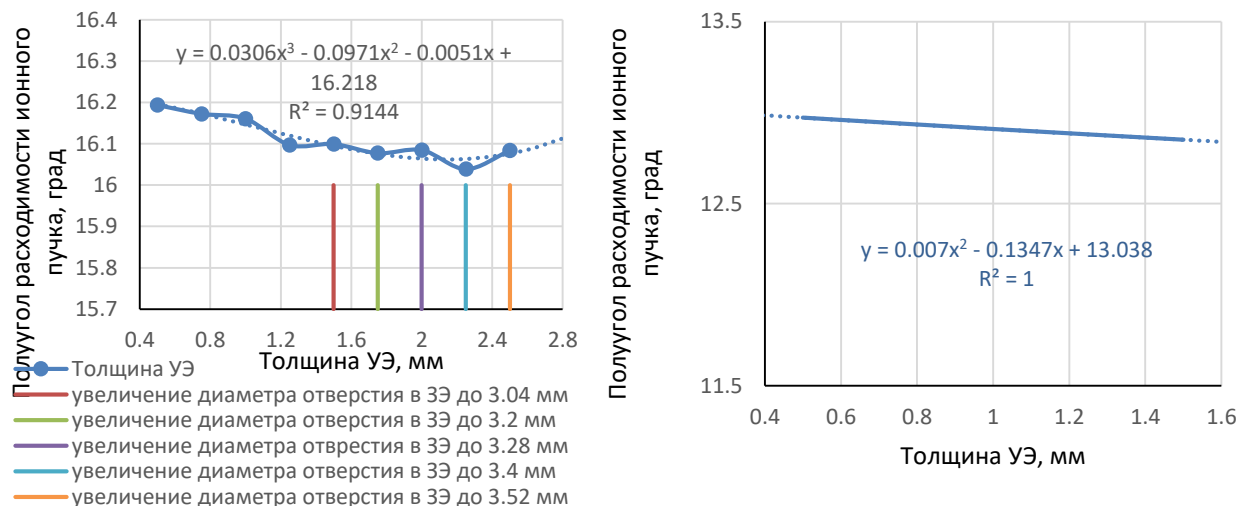


Рисунок 6 – Полуугол расходимости ионного пучка от толщины УЭ (круглая перфорация – слева, щелевая перфорация – справа)

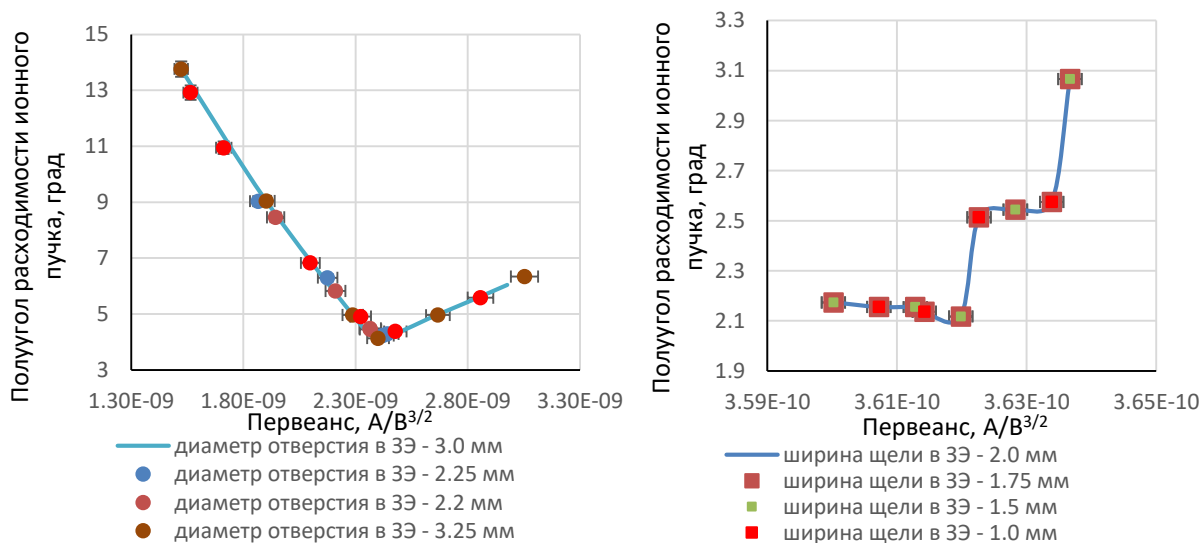


Рисунок 7 – Полуугол расходимости ионного пучка от первеанса при вариации диаметра отверстий/ширины щели в ЗЭ (круглая перфорация – слева, щелевая перфорация – справа)

В виду необходимости обеспечения стабильности форм электродов ИОС в условиях воздействия неравномерного теплового нагружения, а также по результатам проведенного моделирования с учетом необходимости обеспечения минимального угла расходимости ионного пучка и с учетом оценки технологических возможностей изготовления электродов рекомендованы следующие геометрические параметры в ИОС: толщины ЭЭ/УЭ: 1,0–1,5 мм, диаметры отверстий/ширина щелей в ЭЭ/УЭ: 2,0–2,5 мм; ЭЭ-УЭ/УЭ-ЗЭ межэлектродные зазоры: 1,5–2,0 мм; толщина ЗЭ: 1,5–2,5 мм. Представлена оценка влияния потенциалов электродов на выходные параметры ИОС с профилированными отверстиями и щелями. Выделены области параметров, при которых ожидается получение минимальных углов расходимости ионного пучка (менее 6°), области параметров, находящихся за пределами рекомендуемых значений по пробойной разности потенциалов между ЭЭ и УЭ, области параметров, находящихся за пределами максимально допустимых значений по пробойной разности потенциалов между ЭЭ и УЭ, области, которые находятся вне рекомендуемого диапазона параметров по пробойному напряжению, но они потенциально могут быть использованы (в случае необходимости) для обеспечения минимального угла расходимости ионного пучка и потребных величин токов ионного пучка.

В главе рассмотрены ксенон и криптон (как возможная замена ксенону ввиду его высокой стоимости), как основные рабочие тела ВЧИД. Показано, что нецелесообразно учитывать все известные термы рабочих тел ввиду малой точности и недостаточности исходных данных для таких расчетов, а также принимая во внимание большое число допущений при построении известных математических моделей. Предложено свести рассмотрение параметров термов к усредненным величинам, объединив все энергетические уровни термов высших порядков. Разработана модель работы ГРК с построением баланса мощности в ней с учетом вариации массового потока атомов рабочего тела. Проведенные расчеты показали хорошее соответствие получаемых результатов, данным опубликованным в литературе и полученным ранее результатам на других лабораторных образцах ВЧИД: концентрация ионов – $2,79 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$; температура электронов: от 3,7 эВ в центре ГРК до 7,8 эВ в пристеночной области.

В **третьей главе** представлены результаты испытаний экспериментального образца ВЧИД с щелевой и гексагональной круглой перфорациями (Рисунок 8). Для каждого из испытываемых образцов построены модели полного факторного эксперимента размерности 2^3 с варьированием толщины УЭ и ЭЭ-УЭ/УЭ-ЗЭ межэлектродных зазоров, которые могут

быть без существенных доработок изменены при сборке конструкции. С учетом сложности изготовления профилированных отверстий/щелей в ЭЭ конструктивное исполнение ЭЭ не варьировалось. Получены коэффициенты и уравнения регрессии, обеспечивающие оптимальные с точки зрения обеспечения минимальных углов расходимости геометрические параметры ИОС.



Рисунок 8 – Внешний вид ВЧИД (слева – ИОС с щелевой перфорацией, справа – ИОС с гексагональной круглой перфорацией (кожух снят))

Проведены исследовательские испытания экспериментального образца ВЧИД на криптоне и ксеноне. 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 (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных

Параметр	Эксперимент		Моделирование	
ИОС с гексагональной круглой апертурой; ксенон				
Потенциал ЭЭ, В	2500	3000	2500	3000
Потенциал УЭ, (минус), В	300	300	300	300
Ионный ток, А	0,204	0,285	0,244	0,325
Первеанс, $\times 10^{-6}$, А/В ^{3/2}	1,36	1,49	1,27	1,69
ИОС с гексагональной круглой апертурой; криптон				
Потенциал ЭЭ, В	2000	2600	2000	2600
Потенциал УЭ, (минус), В	100	170	100	170
Ионный ток, А	0,193	0,282	0,176	0,274
Первеанс, $\times 10^{-6}$, А/В ^{3/2}	1,96	1,91	1,8	1,85
щелевая ИОС; ксенон				
Потенциал ЭЭ, В	2500	3000	2500	3000
Потенциал УЭ, (минус), В	200	300	200	300
Ионный ток, А	0,199	0,28	0,171	0,229
Первеанс, $\times 10^{-6}$, А/В ^{3/2}	1,34	1,46	1,2	1,19
щелевая ИОС; криптон				
Потенциал ЭЭ, В	2500	3000	2500	3000
Потенциал УЭ, (минус), В	240	300	200	300
Ионный ток, А	0,25	0,33	0,214	0,287
Первеанс, $\times 10^{-6}$, А/В ^{3/2}	1,72	1,72	1,5	1,49

При проведении экспериментальных исследований коэффициент использования рабочего тела не превысил 0,51, что существенно отличает ВЧИД с высоко коллимированным ионным пучком от традиционных ВЧИД. Минимальная цена иона: 839 Вт/А; энергетический КПД: 0,78; КПД по расходимости ионного пучка: 0,999; тяговый КПД: до 0,4. Показано, что при сохранении геометрического подобия щелевых электродов, изготовленных из УУКМ «ИПРЕССКОН®», у электродов с круглой гексагональной перфорацией прозрачность ниже, чем у электродов с щелевой перфорацией (0,211 против 0,448) приблизительно в два раза, что не повлекло к пропорциональному уменьшению величины извлекаемого ионного тока для режимов, соответствующих минимальному углу расходимости ионного пучка, за счет более высокой плотности ионного тока в круглой гексагональной перфорации. Экспериментальный образец ВЧИД показал удовлетворительные результаты по выходным техническим характеристикам, обеспечив минимальные углы расходимости в диапазоне 3,5–4,2°.

Для разработанного экспериментального образца ВЧИД проведено моделирование в программе IOS-3D с целью оценки эрозии его конструктивных элементов и ресурса. Показано, что эрозия поверхности УЭ ИОС с круглыми гексагонально расположенными отверстиями не превышает 0,01373 мкм/ч, что с запасом в 50% обеспечивает ресурс разработанного экспериментального образца ВЧИД с точки зрения эрозии электродов ИОС порядка 50000 часов. Для щелевой перфорации показатели хуже: оценочные значения эрозии могут достигнуть 0,15 мкм/ч. Однако даже такие, относительно высокие значения эрозии, обеспечивают с 25% запасом ресурс экспериментального образца ВЧИД на уровне 50000 часов. Эрозия отверстия УЭ незначительна, что позволяет использовать разработанный и испытанный экспериментальный образец ВЧИД в качестве средства бесконтактного воздействия на ОКМ. Наиболее нагруженными с точки зрения эрозии являются отверстия и поверхность УЭ.

В четвертой главе представлены результаты проектно-баллистического анализа виртуальной связки СКА-ОКМ и результаты моделирования транспортировки ОКМ на примере КА Горизонт 18 (перигей: 35896,3 км; апогей: 36185,1 км, наклонение: 13,7°, большая полуось: 42411 км; период обращения: 1448,6 минут, эксцентриситет: 0,00345) с использованием обновленной модификации программы Dispose, разработанной в НИИ ПМЭ МАИ для проведения оценок и построения системы управления в части алгоритмов для системы бесконтактной транспортировки ОКМ из защищаемой области ГСО.

Определены коэффициенты равновесия для различных значений тяг ВЧИД в диапазоне 23–80 мН с шагом 5 мН и компенсирующих ЭРД в диапазоне 46,8–78 мН с шагом 10% от номинального значения, равного 78 мН (для оценки изменений углов поворота компенсирующих двигателей), и масс СКА в диапазоне 1200–1500 кг с шагом 50 кг (для учета снижения массы СКА при расходе топлива в процессе выполнения миссии). Для оценки доли тяги ВЧИД, передаваемой на ОКМ, рассчитаны среднеквадратичные отклонения кругового распределения плотности тока ионного пучка в зависимости от тяги ВЧИД и удаления от среза ВЧИД. При использовании управления боковым движением по величине боковых отклонений и их производных увод ОКМ из защищаемой области ГСО на орбиту захоронения (+300 км к высоте ГСО) без управления относительной дальностью может быть реализован за время порядка 8 суток (Рисунок 9). Начальная дальность между СКА и ОКМ - 40 м.

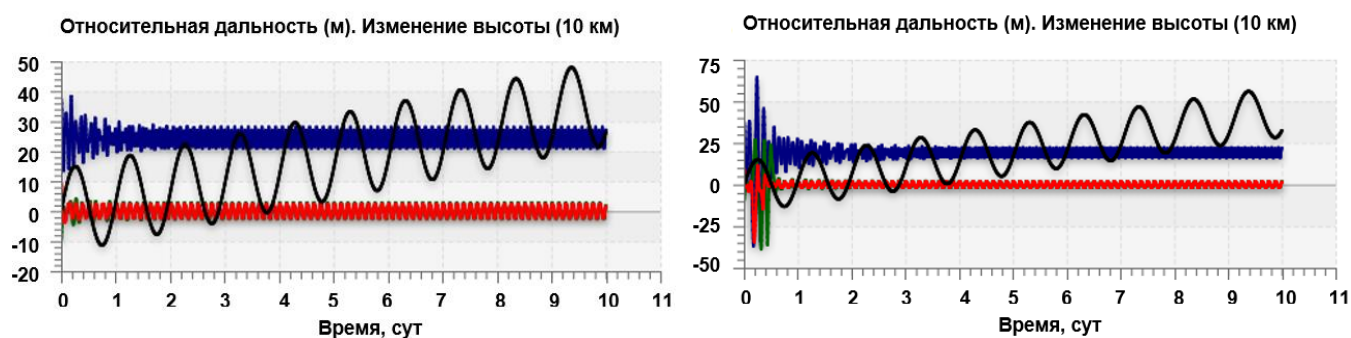


Рисунок 9 – Увод ОКМ на орбиту захоронения при использовании управления боковым движением по величине боковых отклонений и их производных (синий – проекция относительной дальности на ось X (м), зеленый – проекция относительной дальности на ось Y (м), красный – проекция относительной дальности на ось Z (м), черный – изменение высоты орбиты (10 км); масса СКА – 1500 кг (слева); масса СКА – 1200 кг (справа)).
Начальная относительная дальность – 40 м

Представлены результаты проектно-баллистического анализа виртуальной связки СКА-ОКМ. 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

1. Разработаны методы предварительного проектного анализа виртуальной связки «СКА-ОКМ», которые позволяют оценить возможность и целесообразность увода из защищаемой области ГСО ОКМ массой в пределе до 5000 кг и предварительно сформировать цепочку из нескольких ОКМ, подлежащих уводу в рамках единичной миссии СКА с начальной массой 1500 кг. Выработаны рекомендации к построению ЭРДУ СКА с использованием компенсирующих ЭРД и ВЧИД с углом расходимости ионного пучка на срезе, равным $3,7-4,2^\circ$. Сформирован облик ЭРДУ СКА.
2. Получены регрессионные зависимости для углов расходимости ионных пучков, генерируемых ИОС с целевой и гексагональной круглой профилированными перфорациями электродов, которые позволяют без проведения полномасштабного моделирования оценить выходные параметры ВЧИД, а также оптимизировать конструкцию ИОС ВЧИД с целью удовлетворения ею требований, предъявляемых ко ВЧИД как к элементу системы бесконтактной транспортировки ОКМ. Разработана методика усреднения энергий возбуждения и ионизации энергетических уровней термов рабочих тел, позволяющая существенно упростить проведение оценки баланса частиц и мощности в ГРК ВЧИД с учетом вариации массового потока атомов рабочего тела. Предложена методика оценки воздействия ионного пучка на ОКМ, которая позволяет определить требуемые параметры системы бесконтактного воздействия на ОКМ, параметры работы системы управления СКА и углы отклонения компенсирующих ЭРД.
3. На основе результатов предварительного моделирования изготовлена конструкция экспериментального образца ВЧИД, проведены ее исследовательские испытания на различных рабочих телах с использованием в составе конструкции ИОС электродов с целевой и круглой гексагональной перфорациями электродов из высокоплотного УУКМ. Подтверждены результаты проведенного моделирования, интегральные характеристики ВЧИД. Расчетным путем показана возможность достижения высоких значений ресурса (до 50000 часов с запасом 25–50%) разработанного экспериментального образца ВЧИД.
4. Проведенный проектно-баллистический анализ позволяет утверждать, что в рамках единичной миссии СКА из защищаемой области ГСО могут быть уведены семь ОКМ (с начальным наклоном орбит свыше 13°), что говорит об достаточной эффективности разработанной системы бесконтактной транспортировки ОКМ и высокой

перспективности ее использования в целях обеспечения безопасности осуществления космических полетов в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечней ВАК

1. Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Свотина В.В. Управление космическими аппаратами на высокоэллиптической орбите с использованием электроракетных двигателей, расположенных по схеме «Звезда» // Известия академии наук. Энергетика, 2015, т. 1, с. 149.
2. Надирадзе А.Б., Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Свотина В.В. Моделирование силового и эрозионного воздействия ионного пучка на крупный объект космического мусора техногенной природы // Известия академии наук. Энергетика, 2016, т.2, с.146–157
3. Логинов С.С., Усовик И.В., Яковлев М.В., Обухов В.А., Попов Г.А., Свотина В.В., Вилков Ю.В., Кирилов В.А., Попов В.В. Бесконтактный увод объектов космического мусора из защищаемой области геостационарной орбиты // Космонавтика и ракетостроение, 2017, т.5(98), с.28–36
4. Надирадзе А.Б., Обухов В.А., Рахматуллин Р.Р., Свотина В.В. Эффекты эрозионного и загрязняющего воздействия при уводе объектов космического мусора ионным пучком // Известия Российской академии Наук. Энергетика, 2018, т.3, с.131–139
5. Ахметжанов Р.В., Балашов В.В., Богачев Е.А., Елаков А.Б., Каширин Д.А., Свотина В.В., Спивак О.О., Черкасова М.В. Ускоряющий электрод ионного двигателя из углерод–углеродного композиционного материала // Известия Российской академии Наук. Энергетика, 2018, т.3, с.22–32
6. Надирадзе А.Б., Рахматуллин Р.Р., Обухов В.А., Свотина В.В. Механическое воздействие ионного пучка на крупный объект космического мусора техногенной природы // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2019, т.3, с.110-121
7. Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Каширин Д.А., Обухов В.А., Попов Г.А., Свотина В.В., Черкасова М.В. Расчетно-экспериментальное исследование эрозии ускоряющего электрода двухэлектродной ионно-оптической системы высокочастотного источника ионов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2019, т.12, с.44–49
8. Ахметжанов Р.В., Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Обухов В.А., Попов Г.А., Свотина В.В., Черкасова М.В. Методика прогнозирования ресурса ускоряющего электрода ионно-оптической системы газоразрядного источника ионов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2019, т.11, с.50–58

Патенты

9. Патент на изобретение 2752857С2 Газоэлектрическая развязка газоразрядного узла ионного источника и способ изготовления ее основных деталей / Могулкин А.И., Балашов В.В., Нигматзянов В.В., Пейсахович О.Д., Рябый В.А., Свотина В.В., Ситников С.А.

10. Патент на изобретение 2784740 Космический аппарат для очистки околоземного космического пространства от космического мусора / Могулкин А.И., Мельников А.В., Обухов В.А., Пейсахович О.Д., Покрышкин А.И., Свотина В.В.

Публикации в рецензируемых научных изданиях

11. Balashov V., Cherkasova M., Kruglov K., Kudriavtsev A., Masherov P., Mogulkin A., Obukhov V., Riaby V., Svitina V. Radio Frequency Source of a Weakly Expanding Wedge-Shaped Xenon Ion Beam for Contactless Removal of Large-Sized Space Debris Objects // Review of Scientific Instruments, 2017, V.88, Is.8, 083304

12. Obukhov V., Pokryshkin A., Popov G., Svitina V. Stability of a Moving Control of a Service SC and a Space Debris Object at Impact on It by an Ion Beam // Advances in the Astronautical Sciences, 2017, V.161, p.655–665

13. Nikolichev I., Obukhov V., Pokryshkin A., Svitina V. Problem of Trajectory Optimization of the Inter-Orbital Mission for a Special Service Space Craft with Electric Propulsion System for Removing Space Debris Objects // Asia Life Sciences, 2019, V.2, p.955–975

14. Obukhov V., Mogulkin A., Peysakhovich O., Kozhevnikov V., Nigmatzyanov V., Svitina V. Modeling and Experimental Study of an Ion Source with a Weakly Diverging Ion Beam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, V.862, Is.6

15. Akhmetzhanov R., Bogatyı A., Kashirin D., Obukhov V., Popov G., Khartov S., Svitina V. Low-Power Ion Thrusters. State of Development at Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, MAI // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, V.927, Is.1

16. Svitina V., Cherkasova M., Mogulkin A., Melnikov A., Peysakhovich O. Ion Source-Mathematical Simulation Results Versus Experimental Data // Aerospace, 2021, V.8, Is.10

17. Obukhov V., Kirillov V., Petukhov V., Popov G., Svitina V., Testoyedov N., Usovik I. Problematic Issues of Spacecraft Development for Contactless Removal of Space Debris by Ion Beam // Acta Astronautica, 2021, V.181, p.569–578

18. Svitina V., Mogulkin A., Kupreeva A. Ion Source-Thermal and Thermomechanical Simulation // Aerospace, 2021, V.8, Is.7

19. Obukhov V., Pokryshkin A., Svitina V. Thruster Rotation Angle Control During Contactless Removal of Space Debris Objects // Smart Innovation, Systems and Technologies, 2021, V.217, p.127–139

20. Cherkasova M., Svotina V. Simulation of the Ion Source for Impact on Large Space Debris Objects // AIP Conference Proceedings, 2021, V.2318, 020011
21. Obukhov V., Kirillov V., Petukhov V., Pokryshkin A., Popov G., Svotina V., Testoyedov N., Usovik I. Control of a Service Satellite During Its Mission on Space Debris Removal from Orbits with High Inclination by Implementation of an Ion Beam Method // Acta Astronautica, 2022, V.194, p.390–400
22. Svotina V., Cherkasova M. Space Debris Removal – Review of Technologies and Techniques. Flexible or Virtual Connection Between Space Debris and Service Spacecraft // Acta Astronautica, 2023, V.204, p.840–853
23. Melnikov A., Bogachev E., Elakov A., Mogulkin A., Obukhov V., Perminova Yu, Peysakhovich O., Pokrishkin A., Cherkasova M., Svotina V. Computational and Experimental Study of an Ion Injector of a Weakly Divergent Ion Beam for Implementing a Method for Removing Space Debris Objects by an Ion Beam // Acta Astronautica, 2023, V.204, p.815–825
24. Obukhov V., Svotina V. Study of the Characteristics of the System: Ion Source – Ion Decelerator // Review of Scientific Instruments, 2023, V.94, Is.2, 023307
25. Akhmetzhanov R., Balashov V., Bogachev Y., Yelakov A., Kashirin D., Spivak O., Cherkasova M., Svotina V. An Ion Thruster Accelerating Electrode Made of Carbon-Carbon Composite Material // Thermal Engineering, 2018, V.65, Is.13, p.986–993
26. Akhmetzhanov R., Bogaty A., Cherkasova M., Kashirin D., Obukhov V. Popov G., Svotina V., Dukhopelnikov D., Ivakhnenko S., Vorobev E. Estimation of the Ion Thruster Lifetime on a Shortened Time Base // Proceedings of the IAC // Unlocking Imagination, Fostering Innovation and Strengthening Security, 2017, V.13, p.8807–8812
27. Konstantinov M., Svotina V. Analysis for Feasibility of Spitzer's Schemes Complication for Spacecraft Final Insertion into Geostationary Orbit by Electric Propulsion // Procedia Engineering, 2017, V.185, p.304–311
28. Akhmetzhanov R., Bogaty A., Vorob'ev E., Dukhopelnikov D., Kashirin D., Obukhov V., Popov G., Cherkasova M., Svotina V. Two-Electrode Ion-Extraction System of a Radio-Frequency Ion Source: Numerical and Experimental Studies of Erosion of the Accelerating Electrode // Journal of Surface Investigation, 2019, V.13, Is.6, p.1061–1066
29. Akhmetzhanov R., Vorob'ev E., Dukhopelnikov D., Ivakhnenko S., Obukhov V., Popov G., Cherkasova M., Svotina V. Procedure of Predicting the Lifetime of the Accelerating Electrode of an Ion-Extraction System of a Gas-Discharge Ion Source // Journal of Surface Investigation, 2019, V.13, Is.6, p.1217–1224