

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР «САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ СНЦ РАН)**

ул. Рабочая, 24, г. Саратов, 410028

Тел./факс (845-2) 23-45-10, 27-14-36. E-mail: sncransar@san.ru, www.snцран.рф

02.10.23 № 165
На № 104-4461 от 29.08.2023

«УТВЕРЖДАЮ»
Зам. Директора ФИЦ СНЦ РАН
В.К. Брель
« 2 » 10 2023 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рожкова Мирослава Андреевича

«Оптимизация многоразовых гелиоцентрических перелётов космического аппарата с солнечным парусом с учётом деградации отражающей поверхности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16.

Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Диссертационная работа Рожкова М. А. посвящена поиску номинальных программ управления углом установки солнечного паруса (СП), обеспечивающих оптимальные по быстродействию многоразовые гелиоцентрические перелёты космического аппарата (КА), которые учитывают деградацию оптических параметров отражающей поверхности плёнки паруса.

Задача управления движением центра масс КА с СП традиционно решается для случая идеального отражения, когда оптически параметры СП не изменяются во время полёта. Однако, постоянное воздействие электромагнитного излучения на отражающую поверхность тонкого многослойного паруса, которое необходимо для создания управляющей тяги, приводит к изменению свойств материала, т.е. его деградации. Преимуществом СП перед другим движителями является возможность его постоянного применения для длительных миссий без затрат рабочего времени. При длительном

управляемом полёте деградация существенно влияет на характер оптимального управления.

В качестве критерия оптимальность принимается минимум времени перелётов, что, как правило, достигается увеличением создаваемой двигателем тяги. В случае СП, увеличение тяги приводит к ускорению процессов деградации отражающей поверхности, что создаёт противоречия в выборе номинальной программы управления при длительных миссиях. Задача поиска оптимальной номинальной программы управления, которая бы учитывала данное противоречие, решается впервые.

Диссертационная работа Рожкова М. А. посвящена сравнительно новой задаче – оптимизация многоцветных перелётов КА с СП, которая учитывает изменение оптических параметров плёнки паруса в следствии деградации отражающей поверхности. Таким образом, проблема, цель и задачи диссертационной работы являются актуальными.

Диссертация Рожкова М. А. состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 109 наименований. Общий объём диссертации составляет 98 страниц. Работа содержит 63 рисунка и 9 таблиц.

Во введении сформулирована цель исследования, обоснована её актуальность. Поставлены задачи исследования и обозначены положения, по которым автор претендует на научную новизну. Приведены сведения об апробации основных результатов работы на восьми научных конференциях и сведения о публикациях, из которых две в изданиях, входящих в перечень ВАК и три в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

В первой главе рассмотрены существующие проекты многоцветных межпланетных транспортных грузовых систем, отмечена актуальность использования СП для выполнения многоцветных гелиоцентрических перелётов. Представлена подробная схема межпланетной транспортной системы на базе КА с СП. Приведён обзор современных и перспективных КА с СП, а также оценка возможностей использования СП в качестве основного двигателя для грузового КА. В качестве прототипа рассмотрен проект Sunjammer, проектный облик которого лежит в основе для создания грузового КА с СП, способного перевозить до 1905 кг полезной нагрузки в виде доставляемого груза с управляющим характеристическим ускорением $0,25 \text{ м/с}^2$. Начальная масса такого КА составляет 2353 кг. Проанализированы особенности многоцветных гелиоцентрических

перелётов и принципы построения замкнутых межпланетных траекторий. Описаны основные математические модели функционирования СП: создаваемое ускорение парусом при идеальном и неидеально отражении электромагнитного излучения, оптические параметры многослойной тонкой плёнки, деградация отражающей поверхности. Использование метода матриц переноса из общей оптики для определения начальных значений оптических параметров СП при решении задач небесной механики КА осуществляется впервые.

Вторая глава посвящена постановке и решению задачи оптимизации многоразовых перелётов КА с СП с учётом деградации отражающей поверхности. Представлены используемые уравнения движения КА с СП в полярной системе координат. Сделан акцент на особенности сохранения автономности системы при учёте деградации, которая достигается путём внедрения дополнительного фазового параметра – накопленной дозы солнечной радиации. Автором осуществлена строгая математическая постановка задачи оптимального управления движением центра масс КА с СП для случая идеального и деградирующего СП. Продемонстрированы разработанные методика и программно-математическое обеспечение для решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности. Методика заключается в формировании базы данных решений для идеального СП, последовательного усложнения математических моделей и движения по параметрам начального углового положения планет, времени перелёта и начального значения полученной дозы радиации. Методика включает в себя рекомендации по выбору нормировки для решения краевых задач.

В **третьей главе** представлены результаты расчёта проектных параметров КА с СП и численного моделирования многоразовых гелиоцентрических перелётов. Осуществлена верификация математической модели управляемого движения КА с СП путём моделирования одного цикла перелёта Земля-Меркурий-Земля и сравнения полученных результатов с известными опубликованными работами. Верификация модели определения оптических параметров многослойной плёнки проводилась с помощью расчёта частных случаев, для которых имеются экспериментально подтверждённые данные. Рассчитаны проектные параметры КА с трёхслойным СП, имеющим алюминиевую отражающую поверхность, нанесённую на плёнку толщиной 6 мкм из поливинилового спирта, и заднюю хромированную поверхность для более эффективного излучения тепла. Проведено численное моделирование четырёх циклов многоразовых гелиоцентрических перелётов Земля-Меркурий-Земля и Земля-Марс-Земля для идеального и деградирующего СП.

Представлен сравнительный анализ результатов и продемонстрирована эффективность разработанной методики, даны соответствующие рекомендации по использованию программно-математического обеспечения.

В заключении кратко перечислены основные результаты работы.

Новизна работы, а также полученных в диссертации Рожкова М. А. результатов заключается в:

1. Разработана математическая модель управляемого движения центра масс КА с СП, которая включает в себя: определение управляющего ускорения с учётом оптических особенностей отражения от неидеально зеркальной поверхности (рассеивание, поглощение, пропускание, собственное излучение материала) на базе расчёта оптических характеристик многослойного тонкого паруса и с учётом деградации оптических характеристик отражающей поверхности паруса под действием электромагнитного излучения Солнца.
2. Получено оптимальное по быстродействию номинальное управление движением центра масс КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности на базе принципа максимума Понтрягина.
3. Разработана методика решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности.

Теоретическая значимость работы заключается в определении оптимального по быстродействию номинального управления движением центра масс КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности на базе принципа максимума Понтрягина. Разработана методика решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности.

Практическая значимость работы заключается в разработке программно-математическое обеспечение для решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности, использование которого позволит проводить баллистическое проектирование транспортных миссий КА с СП. Получены программы оптимального номинального управления для многоразовых перелётов Земля-Меркурий-Земля и Земля-Марс-Земля для КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением известных методов небесной механики, оптики, теории оптимального управления и подтверждается совпадением полученных результатов для частных случаев с известными результатами работ других авторов и опубликованными результатами экспериментов.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертационной работе отсутствует оценка погрешности применяемых численных методов интегрирования и минимизации. Также принято допущение о соответствии граничных условий орбитальным параметрам планет, а не соответствующим им сфер Хилла. Таким образом ошибка в результатах может достигать 1 млн. км и более.
2. Автором не представлено математическое описание используемых численных методов, в частности модифицированного метода Ньютона, на который он ссылается для решения краевых задач.
3. Автором не затронуты важные вопросы об устойчивости и чувствительности как динамической системы в целом, так и получаемой оптимальной номинальной программы управления движением центра масс КА с СП.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки теоретической и практической значимости представленной диссертации. Они носят частный характер и могут рассматриваться как рекомендации на дальнейшее развитие работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, представленных в диссертационной работе

Полученные в диссертационной работе Рожкова М. А. результаты и выводы могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях космической отрасли для баллистического проектирования КА с СП и многоцветных межпланетных транспортных систем. Разработанная математическая модель может быть применена к другим крупногабаритным тонкоплёночным конструкциям для оценки влияния возмущений со стороны давления электромагнитного излучения Солнца.

Оценка работы в целом

Диссертация написана ясным научным языком, содержание её глав логически взаимосвязано и в полном объёме раскрывает постановку, методы и алгоритмы решения поставленных задач. Основные результаты исследований опубликованы в 11 работах, в том числе две статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и

высшего образования Российской Федерации, три статьи в изданиях, индексируемых международным базами Scopus Web of Science. На разработанное программное обеспечение получены два свидетельства о государственной регистрации.



Заключение

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой. Работа выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а её автор – Рожков Мирослав Андреевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Отзыв обсуждён и одобрен после его рассмотрения на заседании лаборатории «Анализ и синтез динамических систем в прецизионной механике», протокол № 9 от «28» сентября 2023 г.

Заведующая лабораторией
«Анализ и синтез динамических систем
в прецизионной механике»
д.ф.-м.н., г.н.с.

к.ф.-м.н., доцент, с.н.с.

Барулина Марина Александровна

Панкратова Елена Владимировна

Подписи Барулиной М. А., Панкратовой Е. В. Заверяю.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»

Адрес: 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

Тел.: (845-2) 27-14-36, (845-2) 23-45-10

E-mail: sncransar@san.ru; sncransar@yandex.ru

Сайт: <http://СНЦРАН.рф/>