

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

**Родникова Александра Владимировича**

на диссертацию Рожкова Мирослава Андреевича на тему

«Оптимизация многоцветных 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

### Актуальность темы диссертации

Работа Рожкова М. А. посвящена исследованию динамики полёта космического аппарата (КА) с солнечным парусом (СП) в задаче многоцветных гелиоцентрических перелётов с учётом ухудшения (деградации) с течением времени оптических характеристик отражающей поверхности. Из многочисленных теоретических работ и результатов нескольких уже реализованных космических миссий нетрудно сделать вывод о том, что СП, как движитель, не требующий затрат топлива, может существенно упростить, в частности, перемещение грузов между планетами Солнечной системы. Поиск оптимальных, прежде всего по быстродействию, алгоритмов управления положением СП, реализующих такие перелеты, является весьма актуальной проблемой современной космонавтики, так как такие алгоритмы могут стать основой организации регулярного сообщения между планетами с минимально возможными затратами. Следует заметить, что существующие в настоящее время теоретические разработки, описывающие динамику центра масс КА с СП, практически не учитывают тот факт, что воздействие солнечной радиации на КА с СП не только создает дополнительное ускорение, но и оказывает негативное воздействие на материал СП, ухудшая со временем его оптические характеристики. Учитывая, что продолжительность межпланетных перелетов измеряется годами, а эффективный КА с СП должен быть рассчитан как минимум на несколько таких перелетов, можно сделать однозначный вывод о безусловной актуальности темы диссертационной работы.

Таким образом, тема диссертационной работы «Оптимизация многоцветных гелиоцентрических перелётов космического аппарата с солнечным парусом с учётом деградации отражающей поверхности» является **актуальной**.

Входящий № 206-7904  
Дата 20 ОКТ 2023  
Самарский университет

Результаты работы могут быть использованы при проектировании оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом негативного изменения оптических свойств отражающей поверхности. Также сформулированы выводы и практические рекомендации по использованию разработанных методик и программно-математического обеспечения для выбора оптимальной номинальной программы управления движением центра масс КА с СП.

### **Структура диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении оценивается степень разработанности изучаемой в диссертационной работе проблемы, указываются цели исследования, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается общая структура многоразовой транспортной системы, использующей КА с СП, а также особенности гелиоцентрических траекторий для многократных перелетов между планетами Солнечной системы. Обсуждаются преимущества и недостатки таких траекторий, а также проблемы, связанные с баллистическим проектированием. Приведены примеры проектов, связанных с транспортировкой грузов между планетами с помощью СП. Произведен анализ основных результатов исследований движения СП по гелиоцентрическим траекториям и формирования замкнутых траекторий. Представлены математические модели функционирования СП, объяснены и в целом обоснованы используемые допущения.

Во второй главе представлена математическая модель гелиоцентрического движения КА с СП, учитывающая деградацию его отражающей поверхности при выполнении многоразовых межпланетных перелетов. Рассмотрены уравнения движения в полярной системе координат, граничные условия, а также поставлена и решена оптимизационная задача о нахождении оптимальной по быстродействию номинальной программы управления для выполнения многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с использованием принципа максимума Понтрягина. Представлен алгоритм решения краевой задачи, обсуждаются особенности выбора начальных значений сопряженных переменных и используемые нормировки. Проиллюстрирована классификация оптимальных номинальных программ управления на примере движения КА с СП по замкнутой траектории



Земля-Марс-Земля. Также представлено краткое описание программно-математического обеспечения, разработанного для автоматизации расчетов, моделирования движения и поиска начальных сопряженных перемещений в рамках разработанной методики решения задач проектирования оптимальных многофазовых перелетов КА с СП.

В третьей главе выполнено моделирование одного цикла перелета к Меркурию с возвращением для верификации математической модели и сопоставления с известными результатами. Произведен выбор проектных параметров КА с СП, используемого в качестве прототипа для моделирования. Осуществлена верификация математической модели расчета оптических характеристик многоосевой пленки СП, включая расчет оптических параметров СП и факторов, определяющих деградацию его отражающей поверхности. Проведено моделирование четырех циклов многофазовых гелиоцентрических перелетов между Землей и Меркурием, а также Земли и Марсом. Для каждого моделирования проведен сравнительный анализ влияния оптических параметров и их деградации на динамику движения КА с СП. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для проектирования космических транспортных систем, использующих СП. В заключение кратко формулируются основные результаты диссертационной работы.

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

1) Математическая модель управления движения центра масс КА с СП, которая включает в себя: определение управляющего ускорения с учетом оптических особенностей отражения от идеально зеркала (рассевание, поглощение, пропускание, собственное излучение материала) на базе расчета оптических характеристик многоосевой тонкой пары и с учетом деградации оптических характеристик отражающей поверхности пары под действием электромагнитного излучения Солнца. Математическая модель отличается уникальным методом определения начальных значений оптических характеристик и комплексным подходом в исследовании динамики полета КА с СП.

2) Оптимальное по быстродействию номинальное управление движением центра масс КА с идеально отражающим СП с учетом деградации отражающей поверхности на базе принципа максимума Понтрягина. Особенности полученных результатов заключается в использовании численных методов для решения выводящих уравнений.

3) Методика решения задач проектирования оптимальных по быстродействию

многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности. При использовании математической модели неидеально отражающего СП с деградирующими оптическими параметрами краевая задача плохо сходится, из-за чего задачу оптимизации в данной постановке решают прямыми методами или с использованием модели идеального отражения. Автор впервые предложил явный алгоритм действий для решения этой задачи на базе принципа максимума Понтрягина, последовательного усложнения математических моделей и продолжения по параметру начального углового положения планет, времени и деградации.

### **Значимость результатов исследований для науки и практики**

В ходе выполнения диссертации Рожков М. А. получил следующие научные результаты:

1) Автор разработал комплексную математическую модель, в которой применяется уникальный подход определения начальных значений оптических параметров многослойной тонкой плёнки СП. Важный аспект этой разработки – учёт различной интенсивности спектров электромагнитного излучения Солнца и зависимости оптических параметров материала от спектра излучения. Эти результаты могут найти применение и в других многослойных тонкоплёночных конструкциях.

2) Автор разработал методику решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности. Методика позволяет исключить эвристический подход к поиску начального приближения параметров (сопряжённых переменных) и обеспечивает сходимость за счёт строго определённого алгоритма действий. Это позволяет автоматизировать методику в виде программного обеспечения, которое было зарегистрировано автором в виде свидетельства о государственной регистрации.

3) Автор показал, что СП способен эффективно работать и обеспечивать оптимальные по быстродействию траектории КА в задача многоразовых межпланетных перелётов с целью доставки груза на примере четырёх повторяющихся циклов перелётов Земля-Мартс-Земля, а также аналогичного движения Земля-Меркурий-Земля.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации**

Разработанный программный комплекс, на который имеется два свидетельства о государственной регистрации, может использоваться для баллистического проектирования



межпланетных миссий и других гелиоцентрических траекторий КА с СП. Полученные автором результаты могут применяться для дальнейшего проектирования реальных транспортных межпланетных систем. Из анализа полученной оптимальной номинальной программы управления углом установки паруса могут быть спроектированы соответствующие системы управления ориентации и стабилизации КА с СП.

### **Степень обоснованности и достоверности каждого из полученных положений, выводов и заключений**

Достоверность полученных и излагаемых в диссертации результатов, выводов и заключений обусловлена корректностью используемых известных методов механики космического полёта, теории оптимального управления, методов численного моделирования. Достоверность также подтверждается адекватной верификацией разработанной модели в третьей главе диссертационной работы, совпадением полученных результатов для частных случаев с известными результатами работ других авторов и опубликованными результатами экспериментов. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путём их содержательного анализа, так и методами математического моделирования.

Результаты исследований Рожкова М. А. достаточно полно опубликованы в пяти статьях, в том числе в двух статьях в журналах, входящих в список ВАК и трёх статьях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты работы апробированы на восьми международных и всероссийских конференциях.

### **Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности**

Область исследования диссертации соответствует паспорту специальности «2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» по пунктам: 1 «Разработка и совершенствование математических моделей, используемых для описания движения и управления летательным аппаратом на различных режимах полёта»; 5 в части «Создание методов анализа и проектирования траекторий одиночных летательных аппаратов...»; 7 в части «Оптимальное планирование проведения динамических операций для решения целевых задач ЛА...»

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, верно отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

### **Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации**

Рецензируемое диссертационное исследование имеет междисциплинарный подход, где

широко освещаются вопросы не только небесной механики, но также оптики, физики электромагнитного излучения и материаловедения. Автор попытался математически описать сложные физические процессы взаимодействия СП с электромагнитным излучением Солнца в достаточно простом, но достоверном виде, чтобы применять их в задачах небесной механики и теории оптимального управления.

При этом имеются некоторые замечания:

1) В работе предполагается, что неучтенные при разработке законов управления и последующем моделировании возмущения могут приводить не более чем к 5% отклонению ускорения, создаваемого СП, от прогнозируемого. Однако, технологические трудности, связанные с разворачиванием и позиционированием СП могут дать и больший эффект.

2) В работе не приводится строгого обоснования того факта, что неучтенные возмущения, имеющие небесно-механическую природу, не могут привести к необходимости достаточно продолжительного дополнительного маневрирования вблизи целевой планеты для встречи с «каботажным» КА, так как фактически изучается вопрос о попадании в окрестность такой планеты, без детализации маневров в этой окрестности.

3) Конечно, современные технологии таковы, что рассматриваемый в диссертационной работе гипотетический межпланетный КА с СП в принципе может быть построен и выведен на гелиоцентрическую орбиту, но дополнительное моделирование для КА с СП с характеристическим ускорением, соответствующим уже реализованным космическим миссиям, могло бы дополнить работу.

4) Работе не хватает сравнительного анализа преимуществ использования принципа максимума Понтрягина по сравнению с другими методами оптимизации.

5) В диссертационной работе в ряде мест уделяется слишком большое внимание описанию результатов других авторов, в то время как вполне было бы достаточно ссылки на соответствующий источник.

6) В работе, в целом изложенной хорошим научным языком, присутствуют отдельные неточности стиля изложения (стр. 22, 31 и т.д.), а также опечатки (стр.3, 21, 35 и т.д.)

Большинство из сделанных замечаний следует рассматривать, как пожелание диссертанту в будущем обобщить и конкретизировать полученные в работе результаты.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не вызывают сомнений в высокой квалификации диссертанта.



## Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему и выполненную автором самостоятельно на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные технические разработки, обеспечивающие оптимизацию многоразовых гелиоцентрических перелетов КА с СП, учитывающие важный для технологии СП фактор деградации отражающей поверхности. Тематика солнечных парусов не так широко освещается в российской научной литературе по сравнению с зарубежной, что говорит о высокой квалификации диссертанта, соответствующей международному уровню.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, верно отражает основные положения и выводы работы, показан вклад соискателя в разработку избранной темы, степень новизны и значимости результатов исследований, а также обоснована структура диссертации.

По актуальности, новизне, объему, научной и практической ценности проведенных исследований диссертация отвечает требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК, а её автор, Рожков Мирослав Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент  
профессор кафедры «Мехатроника и теоретическая механика»  
Института №8 «Информационные технологии и прикладная математика»  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Родников Александр Владимирович



17.10.2023

Адрес места работы:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,  
Московский авиационный институт, кафедра № 802 «Мехатроника и теоретическая механика»

Тел.: +7 (499)-158-44-66 ; e-mail: [rodnikovav@mai.ru](mailto:rodnikovav@mai.ru)

Подпись сотрудника МАИ удостоверяю:

Директор дирекции института № 8 МАИ



С.С.Крылов