

## ОТЗЫВ

**Официального оппонента на диссертацию Рожкова Мирослава Андреевича на тему «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**

### **I. Актуальность темы диссертации**

В диссертации рассматриваются вопросы динамики гелиоцентрического движения космического аппарата (КА) с солнечным парусом (СП), который совершает многоразовое гелиоцентрическое движение между планетами Солнечной системы. СП рассматривается как тонкая многослойная конструкция, оптические характеристики которой изменяются со временем в связи с деградацией лицевой отражающей поверхности. Рассматривается влияние деградации на проектирование оптимальных по быстродействию гелиоцентрических траекторий, имеющих циклический характер перемещения между планетами.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что технология СП находится в активной фазе своего развития: частота запусков КА с СП увеличивается, разработаны и тестируются новые системы развёртывания и управления крупногабаритными плёночными конструкциями, производятся новые материалы плёнки, которые улучшают массовые и оптические показатели парусов. В совокупности с развитием проектов в области развёртывания космических инфраструктур для освоения дальнего космоса, возникает интерес к многоразовым межпланетным транспортным системам. Для таких задач космический движитель, создающий экологически чистое ускорение КА только за счёт электромагнитного излучения Солнца и без расхода рабочего тела, имеет ряд преимуществ перед традиционными способами орбитального движения. Однако, электромагнитное излучение Солнца изменяет характеристики отражающей плёнки СП, что приводит к изменению динамики полёта КА. Вопросы оптимизации траекторий КА с СП при таких изменениях мало изучены.

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

### **II. Новизна проведённых исследований и полученных результатов**

Существует большое количество проектно-баллистических работ на тему оптимальных траекторий КА с СП, однако в большинстве случаев они используют математическую модель идеального отражения электромагнитного излучения и не затрагивают вопросы изменения оптических характеристик отражающей поверхности СП. Работы, рассматривающие неидеальное отражение, решают задачи оптимизации для некоторых частных случаев с применением прямых методов оптимизации и, как правило, исключают вопросы деградации, многослойности плёнки и зависимости оптических характеристик от различных областей спектра солнечного излучения. Эти вопросы рассматриваются в отдельных исследованиях, которые либо вообще не решают задачу проектирования оптимальных траекторий, либо в целом не рассматривают задачу механики космического

полёта.

В диссертационной работе получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

1. 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. Оптимальное по быстродействию номинальное управление движением центра масс КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности на базе принципа максимума Понтрягина.

3. Методика решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности.

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

Достоверность полученных и излагаемых в работе результатов, выводов и заключений обусловлена корректностью используемых методов классической механики, вычислительной математики, теории оптимального управления и подтверждается 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.

Апробация результатов исследования осуществлялась на научных и научно-практических конференциях всероссийского и международного уровней. Основные научные результаты диссертационного исследования отражены в публикациях соискателя.

### **IV. Значимость результатов, полученных в диссертации для науки и практики**

Значимость полученных автором результатов для науки вообще и прикладной научной дисциплины «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», заключается в разработке комплекса математических моделей гелиоцентрического управляемого движения центра масс КА с СП, которая включает в себя: определение управляющего ускорения с учётом оптических особенностей отражения солнечных лучей от неидеально зеркальной поверхности (рассеивание, поглощение, пропускание, собственное излучение материала) на базе расчёта оптических характеристик многослойного тонкого СП и с учётом деградации оптических характеристик его отражающей поверхности.

С точки зрения практического применения, значимыми результатами являются разработанные методика и программно-математическое обеспечение для решения задач проектирования оптимальных по быстродействию многоразовых циклических гелиоцентрических перелётов КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации отражающей поверхности. Использование этих результатов позволит проводить баллистическое проектирование транспортных миссий КА с СП. Кроме того, получены программы оптимального номинального управления для многоразовых перелётов Земля-

Меркурий-Земля и Земля-Марс-Земля для КА с неидеально отражающим СП с учётом деградации его отражающей поверхности

#### **V. 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 полностью соответствует содержанию диссертации.

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

Структура работы в целом замечаний не вызывает. В ней в логической последовательности раскрыты все основные вопросы темы. Рукопись диссертации включает введение, три главы основного материала, заключение, список литературы из 109 наименований. Общий объем диссертации составляет 98 страниц текста, включая 9 таблиц и 63 рисунка. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют паспорту специальности 2.5.16. - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а основные результаты, полученные соискателем, находят отражение в 11 печатных работах, из которых: 2 публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; 3 публикации в международных журналах, включённых в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается непротиворечивой методологической платформой и взаимосвязанностью выводов. Структура диссертации соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования, раскрывает его основные проблемы и выводы. Каждая из частей диссертации составляет органическое единство с другими частями. Диссертация содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые автором для публичной защиты, что свидетельствует о весомом личном вкладе автора в науку. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями и результатами экспериментов.

Диссертация и автореферат написаны на высоком научном и методическом уровне. Стиль изложения построен логично, грамотен и понятен.

Вместе с тем по работе имеется ряд замечаний:

1. В модель неидеального отражения и деградации соискатель включает оптический параметр коэффициента излучения, однако отсутствует его определение в рамках многослойной конструкции паруса. Кроме того, этот параметр существенно изменяется от температуры паруса, что не учитывается в разработанной математической модели.

2. Алгоритмы работы разработанного программного комплекса на рис. 2.9-2.11 не способны в полной мере отобразить функционал разработки. Раздел 2.5 следовало бы расширить описанием входных и выходных данных, а также изображениями интерфейса самой программы.

3. Верификация модели проводится на сравнении полученных результатов решения

плоской задачи с результатами известного решения пространственной. Автор утверждает, что это различие приводит к ошибке не более 5%, которое и было получено в процессе верификации. Данное утверждение стоило бы закрепить собственными расчётами пространственного движения.

4. На рис. 3.21 и 3.22 движение имеет многовитковый характер с немонотонным изменением гелиоцентрического расстояния. В таком виде, как показано в диссертации, сложно отследить момент переключения знака производной по радиусу.

5. Одним из аспектов новизны является применение принципа максимума Понтрягина для случая неидеального отражения с учётом деградации оптических параметров СП. Однако, отсутствует численное сравнение полученных соискателем результатов с результатами, получаемых с использованием прямых методов оптимизации.

6. На с. 25 вводится угол установки паруса без всяких указаний на область его изменения - от минус 90 до плюс 90, т. е. в теновом полупространстве. Соответственно, общая декартова формула преобразования поворота осей (2.2) не соответствует приведенному над ней рисунку в смысле направлений радиальных и трансверсальных проекций тяговых усилий, идущих по нормали к парусу и в его плоскости. Поверните рисунок на 90 градусов для проверки проекций.

7. В формулах (1.4)-(1.6) на с. 24 стоило бы объяснить физическо-термический и оптико-геометрический смысл каждой из трех величин  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  из (1.6).

8. На с. 31 на рисунке 2.1 непонятные обозначения - там изображены орты, радиальный и трансверсальный, для системы осей криволинейной полярной системы координат, а буквы при них соответствуют компонентам скорости, причем геометрическая сумма этих скоростей не пойдет по воображаемой касательной к траектории.

9. На рис. 1.9, с. 26, на диаграмме спектра Солнца не размечены области длин волн, излучение с которых влияет по-разному на деградацию паруса: жесткое гамма-излучение, жесткий рентген, ультрафиолет, видимая фотонная область, инфракрасные волны, радиоволны. Не расшифровано понятие S-и R- поляризации. Непонятно, по какому вектору идет эллиптическая поляризация света различных слоев парусной пленки.

## **VII. Заключение**

Приведенные замечания не снижают положительного впечатления о работе, как о законченном научном исследовании сложной научно-технической задачи, имеющей практическое применение в освоении космоса. Проведённые научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные технические разработки, обеспечивающие оптимизацию многоцветных гелиоцентрических траекторий КА с СП, которая учитывает неидеальное отражение электромагнитного излучения Солнца и деградацию отражающей поверхности СП.

Хотелось бы отметить творческую роль и энтузиазм поддержки диссертанта его научным руководителем профессором Ольгой Леонардовной Стариновой, являющейся ведущим специалистом в России по динамике КА с малой тягой солнечных парусов. Её научные советы и умелое методическое руководство во многом способствовали профессиональному росту диссертанта, выполнившего свою диссертационную работу на высоком научном уровне и в планируемые сроки.

Работа написана простым доходчивым языком и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны чёткие выводы. Считаю, что диссертационное исследование выполнено на нестандартную для механики космического полёта тему парусных перелетов

и опирается на большое количество литературы отечественных и зарубежных авторов. Это показывает высокую квалификацию соискателя в механике космического полёта и его широкую осведомлённость об источниках на тему анализируемой проблемы.

В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертационного исследования, показан вклад соискателя в разработку избранной темы, степень новизны и значимости результатов исследований, а также обоснована структура диссертации.

По актуальности, новизне, объёму, научной и практической ценности проведённых исследований диссертация отвечает требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Рожков Мирослав Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Доцент кафедры небесной механики СПбГУ,  
к.ф.-м.н., доцент, лауреат Премии  
им. Ф. А. Цандера

Поляхова Елена Николаевна

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»,  
198504, Санкт-Петербург, Петергоф,  
Университетский просп., 28,  
тел. +7 (812) 363-90-13,  
e-mail: pol@astro.spbu.ru

Личную подпись  
*Е.Н. Поляхова*  
заверяю

О. начальника отдела кадров №2  
И. Константинова



Текст документа размещен  
в открытом доступе  
на сайте СПбГУ по адресу  
<http://spbu.ru/science/expert.html>

Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей