

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет: Д 212.125.12

Соискатель: Иванюхин Алексей Викторович

Тема диссертации: Методы проектирования траекторий КА с электроракетными двигателями на основе анализа области существования решений и исследования задачи о минимальной тяге

Специальность: 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации: На заседании 22 октября 2015 года диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 74 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. № 475), и принял решение присудить Иванюхину А.В. учёную степень кандидата технических наук.

Присутствовали: *председатель диссертационного совета* В.В.Малышев, *ученый секретарь диссертационного совета* В.В. Дарнопых, *члены диссертационного совета:* В.С.Брусков, В.А. Воронцов, В.Н. Евдокименков, А.И. Кибзун, М.С. Константинов, Л.Н. Лысенко, В.П. Махров, М.И. Осин, С.Н. Падалко, В.Н. Почукаев, Ю.Н. Разумный, В.В. Родченко, В.Е. Усачов, Г.Ф. Хахулин, М.М. Хрусталёв, А.В. Шаронов.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.12



В.В. Дарнопых

Заключение диссертационного совета Д 212.125.12 на базе

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Министерства образования и науки Российской Федерации (ФГБОУ ВПО МАИ)

по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «22» октября 2015 г. протокол № 9

О присуждении **Иванюхину Алексею Викторовичу** учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «*Методы проектирования траекторий КА с электроракетными двигателями на основе анализа области существования решений и исследования задачи о минимальной тяге*» по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» принята к защите 18 июня 2015 года, протокол №7 диссертационным советом Д 212.125.12 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации (ФГБОУ ВПО МАИ), 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, номер и дата приказа о создании диссертационного совета 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель **Иванюхин Алексей Викторович** 1988 года рождения, в 2011 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (государственный технический университет)», в 2015 году окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», работает инженером в Научно-исследовательском институте Прикладной механики и электродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации (НИИ ПМЭ МАИ).

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте Прикладной механики и электродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации (НИИ ПМЭ МАИ).

Научный руководитель – доктор технических наук **Константинов Михаил Сергеевич**, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Официальные оппоненты:

1) **Филатьев Александр Сергеевич** – гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, руководитель программы аэрокосмических исследований ГНЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»;

2) **Заплетин Максим Петрович** – гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общих проблем управления» Механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук (ИПМ им. М.В. Келдыша) г. Москва **в своём положительном заключении**, подписанном главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, профессором Сазоновым В.В., заведующим сектором прикладной небесной механики доктором физико-математических наук Тучиным А.Г. и утвержденном заместителем директора Института прикладной математики им. Келдыша РАН, доктором физико-математических наук, профессором Боровиным Г.К. указала, что Диссертация А.В. Иванюхина представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая содержит решение задачи, имеющей существенное значение для теории управления движением КА с ЭРДУ. Уровень полученных результатов позволяет заключить, что диссертант заслуживает присуждения ему степени кандидата тех-

нических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 9 научных работ общим объёмом 2.5 печатных листа, **4 статьи** в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций. Соискателем опубликовано 5 работ в материалах всероссийских и международных конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Иванюхин А.В. Определение минимально допустимых значений энергетических характеристик электроракетной двигательной установки для межпланетных перелетов. Известия РАН. Энергетика, 2015, № 2, 91-100.
2. Иванюхин А.В. Оптимизация траектории космического аппарата с идеально регулируемым двигателем в переменных Кустаанхеймо-Штифеля. Электронный журнал «Труды МАИ», 2014, № 75. Электронный ресурс: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49691>.
3. Иванюхин А.В., Петухов В.Г. Задача минимизации тяги и ее приложения. Космические исследования, 2015, т. 53, № 4, с. 320-331.
4. Иванюхин А.В., Петухов В.Г. Оптимизация межпланетных траекторий космических аппаратов с солнечной электроракетной двигательной установкой минимальной мощности. Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2015, № 2, с. 64-71.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ведущая организация). Отзыв положительный. Замечания по диссертации отсутствуют.

2. Филатьев Александр Сергеевич (официальный оппонент). Отзыв положительный. В качестве недостатков указано:

1. При обзоре примеров практического использования ЭРДУ автор ссылается только на недавние зарубежные проекты, забывая, например, таких основоположников практических ЭРДУ для космических полетов и методов оптимизации траекторий КА с малой тягой на основе принципа максимума как Г.Л. Гродзовский и его науч-

ная школа в ЦАГИ.

2. Для обеспечения сходимости процедуры решения краевых задач автор придает большое значение предложенной им процедуре «сглаживания» тяги при переключениях между минимальным и максимальным значениями (стр. 6, 31). Однако, трудно согласиться как с теоретическим обоснованием необходимости этой операции, так и с фактом зависимости практического улучшения сходимости за счет введения такого сглаживания. Дело в том, что для хорошей сходимости метода гомотопии желательно иметь гладкую (в идеале квазилинейную) зависимость функции невязок от варьируемых параметров. На гладкость функции невязок не могут повлиять разрывы первого рода управляющей функции в правых частях интегрируемых уравнений движения, которых напрасно пытается избежать автор, вводя искусственное сглаживание функции тяги. Более того, избыточные требования приводят автора к сомнительной идее «исправления» условия оптимальности тяги, а не физической модели. Тем самым, фактически нарушаются условия принципа максимума и получаемые решения уже нельзя строго назвать оптимальными. В избыточности процедуры сглаживания диссертант мог бы убедиться на примере собственных расчетов в главе 3, где он исследовал зависимость оптимальных решений от параметра сглаживания, устремляя его в пределе к нулю.

3. Запись массы КА в форме (1.17) содержит явно управление - тягу. Если бы автор попытался использовать это выражение при оптимизации, это сделало бы постановку задачи некорректной. Хорошо, что далее в диссертации формулы (1.17), (1.18) в действительности не используются.

4) При постановке ОМ-задачи (стр. 16 и стр. 17) в диссертации допущены опечатки: напечатано «...максимизировать функционал (1.21)...», в то время как по замыслу автора (см. пояснение к (1.21) на стр. 15) следовало написать «...минимизировать функционал (1.21)...».

5. В формуле (1.43) функции $\eta(x,t)$ и $w(x,t)$ задают изменение не тяги и скорости истечения, как написано на стр. 21, а их максимальных значений.

6. В общей записи оптимального управления в (1.46), (1.55) предусмотрена возможность существования особого управления, но в дальнейшем изложении эта возможность не исследуется.

3. Заплетин Максим Петрович (официальный оппонент). Отзыв положительный. В качестве недостатков указано:

1. В диссертации приведены теоремы существования, но нет их доказательства.
2. На странице 37 утверждения нечетко сформулированы (например, (2.4) и нет доказательств этих утверждений.
3. На странице 36 утверждение 4 по-видимому сделана опечатка. В таком виде оно лишено смысла

4. ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Отзыв положительный. Отзыв подписан ведущим научным сотрудником, к.т.н., Н.А. Эйсмонт и ученым секретарем, д.ф.-м.н. А.В. Захаровым. В качестве недостатков указано:

1. Работа значительно выиграла бы, если бы автор провел анализ различных типов экстремалей задачи перелета с минимальной тягой.

5. АО «Научно-исследовательский институт электромеханики». Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником лаборатории, к.т.н., В.И. Исаевым, ученым секретарём секции «Космическая техника» НТС Э.В. Гаджиевым и утвержден главным конструктором по космическим системам, к.т.н. Р.С. Салиховым. В качестве недостатков указано:

1. Перечисленные в качестве рассмотренных в диссертации примеров задачи перелёта межпланетного КА с ЭРДУ ограничиваются планетами земной группы и астероидами из главного пояса, не рассмотрены варианты миссий к дальним планетам солнечной системы, также являющиеся на сегодняшний день актуальными;
2. При анализе межпланетных перелётов не рассмотрены околопланетные участки траектории, приводятся лишь гелиоцентрические участки;
3. В приведённом в автореферате примере перелёта к Марсу КА описан только с помощью удельных характеристик, без подробного описания КА и целей такой миссии, что может привести к изменению отношения начальной и конечной масс.

6. ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». Отзыв положительный. Отзыв подписан заместителем начальника отдела КБ «Салют», А.Г. Курныковым, начальником сектора, к.т.н. В.Д. Денисовым, ученым секретарём НТС КБ «Салют», д.т.н. Р.В. Бизяевым и утверждён генеральным конструктором КБ «Салют», к.т.н., председа-

телем НТС М.Б. Соколовым. В качестве недостатков указано:

1. Используемые модели масс систем КА формула (9) и изменения мощности солнечных батарей формула (43) являются достаточно грубыми приближениями и не отражают многих нюансов состава КА и работы энергосистемы на базе солнечных батарей;
2. Приведённый численный пример из главы 3 - перелёт Земля-Марс выполнен для абстрактного КА и все результаты приведены в виде удельных характеристик, сама же миссия и КА подробно не описаны.

7. РКК "Энергия" им. С.П. Королёва. Отзыв положительный. Отзыв подписан заместителем руководителя НТЦ, д.т.н. Ю.П. Улыбышевым, начальником сектора О.Н. Седельниковым и учёным секретарём диссертационного совета РКК «Энергия» О.Н. Хатунцевой. В качестве недостатков указано:

1. В автореферате приведён пример перелёта к Марсу и рассмотрен только вариант «нулевой стыковки», при которой в конечный момент времени положение и скорость КА и Марса равны, и не рассмотрены другие варианты краевых условий, такие как пролёт планеты и т.д.;
2. Осталось не вполне прояснённым влияние многоэкстремального характера решений рассматриваемых задач на уровень минимальной тяги и мощности ЭРДУ, хотя подобный характер решений является отличительной чертой рассматриваемых задач оптимального управления.

8. ФГУП «НПО им. Лавочкина». Отзыв положительный. Отзыв подписан заместителем начальника Центра баллистико-навигационного обеспечения КС, д.т.н. А.Е. Назаровым, заместителем начальника отдела баллистико-навигационного обеспечения межпланетных КА и средств выведения, к.т.н. А.В. Симоновым и утверждён помощником генерального директора по науке, д.т.н., профессором В.В. Ефановым. В качестве недостатков указано:

1. При переходе к задаче с заданной величиной тяги ЭРДУ используется сглаженная модель релейного управления, что вносит дополнительные погрешности в полученные таким образом решения;
2. В приведённом примере межпланетного перелёта Земля-Марс никак не рассматриваются околопланетные участки траектории;

3. В качестве модели движения КА используется ограниченная задача двух тел, не учитывающая притяжения планет солнечной системы.

9. ФГУП ЦНИИмаш. Отзыв положительный. Отзыв подписан начальником баллистического центра д.т.н., с.н.с. И.И. Олейниковым, заместителем начальника баллистического центра д.т.н., с.н.с. А.Т. Тунгушпаевым, начальником лаборатории, к.т.н., с.н.с. Ю.К. Колюкой и утверждён заместителем генерального директора С.В. Серединым. В качестве недостатков указано:

1. В описании методической части предлагается анализировать границу области существования решения в пространстве тяга (начальное реактивное ускорение) - скорость истечения, а в приведённом примере перелёта Земля-Мартс на графике изолиний скорость истечения фиксируется одним значением и её влияние на характеристики траектории и вид изолиний не приведены в автореферате.

2. При описании численных результатов в рассмотренном в автореферате примере не приведены используемые конкретные условия оптимальности, а делается ссылка на условия, записанные ранее в общем виде.

10. СГАУ (НИУ). Отзыв положительный. Отзыв подписан профессором кафедры космического машиностроения СГАУ, д.т.н. О.Л. Стариновой. В качестве недостатков указано:

1. В автореферате нет объяснения, что собой представляют функции $\eta(\mathbf{x}, t)$, $w(\mathbf{x}, t)$, которые появляются в системе (19) и используются далее.

2. Продолжение по дате старта и времени перелета, предлагаемое для построения изолиний (страницы 12, 13) приводит к изменению угловой дальности перелета, что, при определенных условиях, может привести к переходу с изначально глобально-оптимальной экстремали к локально оптимальной траектории с худшими характеристиками, чем на оптимальной траектории с оптимальным числом целых витков вокруг притягивающего центра.

3. В работе не рассмотрены планетоцентрические участки движения межпланетных КА с ЭРДУ (например, скрутка КА с подлетной траектории на целевую околопланетную орбиту), которые могут существенно увеличить длительность перелета и требуемые затраты рабочего тела ЭРДУ.

11. ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Отзыв положительный. Отзыв подписан

в.н.с., к.т.н., А.А. Сеницын, с.н.с., к.т.н. Е.Ю. Кувшинова, инженер 2-ой категории Е.И. Музыченко. В качестве недостатков указано:

1. Не приведен вид силовой функции гравитационного поля, используемого в расчетах.
2. В формуле (33) производной массы полезной нагрузки по скорости истечения (страница 12) присутствует опечатка.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами по теме диссертационной работы Иванюхина Алексея Викторовича, а ведущая организация проводит исследования в области оптимизации траекторий космических аппаратов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложена методика построения области существования решения задачи межпланетного перелёта КА с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) ограниченной тяги в пространстве параметров этой установки;

разработан метод нахождения оптимальной траектории такого КА с заданными параметрами электроракетной двигательной установки;

разработано программное обеспечение на языке программирования C/C++, обладающее высокой степенью автоматизации процесса построения области существования решения и вычисления решений с заданными параметрами;

продемонстрирована работоспособность предложенной методики на примере анализа нескольких задач оптимизации межпланетных траекторий КА с ЭРДУ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены основные трудности при оптимизации траекторий КА с ЭРДУ и возможные причины отсутствия решения с заданными параметрами, методика построения области существования решения на плоскости проектных параметров КА с ЭРДУ;

раскрыты способы определения вырождения искомого решения, связанные с нехваткой тяги или перерасходом массы топлива;

изучены рассматриваемые модельные задачи, являющиеся частью предложенной методики построения области существования решения на плоскости проектных параметров КА с ЭРДУ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены:

– методика и алгоритмы построения области существования решений и поиска оптимальных траекторий КА с ЭРДУ в рамках нескольких НИР, проводимых в НИИ ПМЭ МАИ. В частности, СЧ НИР «Энергетика – НИИПМЭ» «Сравнительный анализ эффективности транспортных операций в космосе на основе использования энергодвигательных комплексов с солнечными и ядерными энергоустановками» и СЧ НИР «Магистраль» (Облик-АКА) «Разработка методов оптимизации траекторий и проектно-баллистического анализа КА с ЭРДУ к планетам земной группы и астероидам» по договорам № 5-14-32/14 от 01.07.2014 и № 851-2147/14/264 от 24.07.2014 между ЦНИИмаш и НИИ ПМЭ МАИ. В этих НИР анализировалась возможность использования ЭРДУ различных типов для межпланетных КА;

– алгоритмы и программно-математическое обеспечение, используемые в отделе проектно-баллистического анализа НИИ ПМЭ МАИ;

определены требования к перспективным ЭРДУ и межпланетным КА использующим такие двигательные установки, основанные на проведенных расчётах областей существования траекторных задач, рассмотренных автором;

предложен ряд модельных задач, позволяющих автоматизировать процесс решения рассматриваемой оптимизационной задачи;

создано программно-математическое обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы оптимизации траекторий.

Другие научные достижения, свидетельствующие о научной новизне и значимости полученных результатов, заключаются в том, что предложенный подход к оптимизации траекторий КА с электроракетной двигательной установкой позволяет избежать трудностей анализа вариантов КА с недостаточно высоким уровнем тяги (или мощности), вариантов, при которых возможен перерасход топлива для реализации траектории межпланетного перелета. Это выгодно отличает подход автора диссертации от использовавшихся ранее подходов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

методика построена на известных математических моделях движения КА, функционирования электроракетных двигательных установках, на многократно апробированных необходимых условиях оптимальности и широко используемых методах решения краевых задач;

методическая база работы - теория оптимального управления и метод продолжения по параметру;

установлено, что полученные автором результаты укладываются в рамки существующих представлений об оптимизации траекторий КА с малой тягой, в том числе, представленных в независимых источниках по данной тематике;

использованы современные численные методы для решения краевых задач, линейных уравнений, интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений и т.д., в том числе с применением технологий параллельного программирования.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

разработан и исследован метод построения области существования траектории межпланетного перелета КА с электроракетной двигательной установкой в пространстве параметров КА и его двигательной установки;

разработан метод вычисления оптимальной траектории КА с заданными параметрами с использованием границы области существования траектории перелета;

разработано программно-математическое обеспечение, на котором были проведены исследования, подтвердившие эффективность предложенных алгоритмов и получены результаты проектно-баллистического анализа для нескольких проектов межпланетных КА с электроракетными двигательными установками.

Диссертация охватывает основные вопросы рассматриваемой научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой методологической платформы, концептуальности и взаимосвязи выводов.

На заседании 22 октября 2015 года диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства от 30 января 2002 г. №

74 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. № 475), и принял решение присудить Иванюхину Алексею Викторовичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени: 18, против присуждения учёной степени: 0, недействительных бюллетеней: 0.

Председатель

диссертационного совета Д 212.125.12

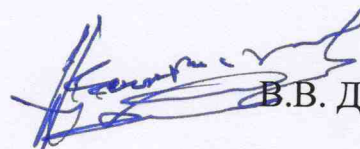
Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.125.12

«22» октября 2015 года



В.В. Малышев



В.В. Дарнопых