

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.12

Соискатель: Мин Тейн

**Тема диссертации:** «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы»

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

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

на заседании 26 июня 2018 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, установленным Положением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и принял решение присудить Мину Тейну ученую степень доктора технических наук.

**Присутствовали:** председатель диссертационного совета В.В. Малышев, заместитель председателя диссертационного совета М.Н. Красильщиков, ученый секретарь диссертационного совета А.В. Старков, члены диссертационного совета: В.Т. Бобронников, В.С. Брусов, В.А. Воронцов, В.Н. Евдокименков, А.В. Ефремов, С.Ю.Желтов, К.А. Занин, А.И. Кибзун, М.С. Константинов, С.Н. Падалко, В.Г. Петухов, В.Н. Почукаев,, Г.Г. Райкунов В.В. Родченко, К.И. Сыпало, Ю.В. Тюменцев, Г.Ф. Хахулин, А.В. Шаронов.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,

к.т.н., доцент

 А.В. Старков

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.12**

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

Министерства образования и науки Российской Федерации (ФГБОУ ВО МАИ)  
**по диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 26.06.2018 г., протокол № 12

о присуждении **Мину Тейну**, гражданину Республики Союза Мьянмы, ученой степени доктора технических наук. Диссертация «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» принята к защите «23» марта 2018, протокол № 7, диссертационным советом Д 212.125.12 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, приказ о создании совета № 105/нк. от 11.04.2012 г.

**Соискатель** Мин Тейн, 1977 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по направлению «Авиа- и ракетостроение». С 2006 по 2010 год обучался в аспирантуре кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», которую успешно закончил и в 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Оптимизация схем выведения космического аппарата на высокие рабочие орбиты». Защита кандидатской диссертации состоялась в диссертационном совете Д 212.125.12 при МАИ.

**В период подготовки диссертации** соискатель Мин Тейн обучался с 2013 года по 2017 год в докторантуре при кафедре 601 «Космические системы и ракетостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Диссертация выполнена** в ФГБОУ ВО МАИ на кафедре № 601 «Космические системы и ракетостроение».

**Научный консультант** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение» Аэрокосмического института ФГБОУ ВО МАИ **Константинов Михаил Сергеевич**.

**Официальные оппоненты:**

**1. Овчинников Михаил Юрьевич**

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором №4 «Ориентация и управление движением» отдела №5 «Механика космического полета и управление движением» Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук

**2. Назаров Анатолий Егорович**

Доктор технических наук, заместитель начальника отдела акционерного общества «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина»

**3. Старинова Ольга Леонардовна**

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Космическое машиностроение им. Д.И. Козлова» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**дали положительные отзывы о диссертации.**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Российский университет дружбы народов**», г. Москва, дало **положительное заключение**, которое было заслушано и одобрено на заседании департамента механики и мехатроники Института космических

технологий Инженерной академии Российского университета дружбы народов 22 мая 2018 года (протокол № 5/18), подписано первым заместителем – заместителем по научной работе директора Инженерной академии, профессором департамента механики и мехатроники, доктором технических наук Купреевым С.А., профессором департамента механики и мехатроники, кандидатом физико-математических наук Барановым А.А., доцентом департамента механики и мехатроники, кандидатом физико-математических наук Федяевым К. С. и утверждено первым проректором – проректором по научной работе Российского университета дружбы народов, профессором Кирабаевым Н.С.

В заключении указано, что диссертационная работа Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение крупной научной проблемы, имеющей большое значение для повышения эффективности транспортных космических систем, для обоснованного выбора программы развития космических транспортных систем при реализации космической программы. Выводы и рекомендации работы обоснованы. Работа отвечает требованиям ВАК и Положения о порядке присуждения ученой степени, предъявляемым к докторским диссертациям с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости полученных результатов, а ее автор, Мин Тейн, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 (динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов).

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, компетентностью в области науки по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Департамент механики и мехатроники Инженерной академии Российского университета дружбы народов проводит исследования в области управления космическими аппаратами, в том числе маневрирования КА на различных этапах управляемого движения КА. Сотрудниками и преподавателями Департамента опубликовано значительное число научных работ в изданиях ВАК Минобрнауки РФ по группе специальностей 05.07.00 «Авиационная и космическая техника», Web of Science, Scopus.

Овчинников Михаил Юрьевич – автор более 100 научных трудов. Область научных интересов – динамика космического полета, прикладная небесная механика и баллистика, групповые полеты, системы ориентации для малых спутников, динамика твердых тел в среде с сопротивлением, лабораторное исследование и полунатурное моделирование динамики малогабаритных подвижных объектов, микро - и наноспутники (теория и практика). Является признанным научным специалистом в вопросах прикладной небесной механики и баллистики.

Назаров Анатолий Егорович – известный ученый в области баллистико-навигационных исследований орбит и межпланетных траекторий космических аппаратов. За последние пять лет лично и в соавторстве опубликовал 12 научных работ в изданиях перечня ВАК.

Старинова Ольга Леонардовна – автор более 50 научных трудов. Эксперт по итерационным методам оптимизации баллистических схем межорбитальных и межпланетных миссий КА с малой тягой. Область научных интересов – баллистика, динамика и механика космического полета, оптимизация траектории КА с электроракетными двигательными установками.

**Основные результаты диссертационной работы** изложены в 45 работах, из которых одна является монографией [1], 10 [2–11] опубликованы в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России и 7 [12–18] – в иностранных рецензируемых изданиях. Перечисленные ниже научные работы по теме диссертации являются наиболее значимыми.

## Монография

1. Константинов М.С., Петухов В.Г., **Мин Тейн**. Оптимизация траекторий гелиоцентрических перелетов. М.: Издательство МАИ, 2015. 259 с

### В изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

2. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Метод оптимизации траектории перелета выведения КА с электроракетной двигательной установкой на ГСО // Вестник МАИ. 2009. Т.16. № 5. С.282–290. (№ 289 в перечне ВАК до 30.11.2015 г.)

3. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Анализ сложных схем полета к Сатурну с использованием гравитационных маневров и импульсов скорости в глубоком космосе. Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 52. (№ 2186 в перечне ВАК до 30.11.2015 г.)

4. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Оптимизация траектории выведения космического аппарата на рабочую гелиоцентрическую орбиту. Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 67. (№ 2186 в перечне ВАК до 30.11.2015 г.)

5. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Анализ одной схемы полета космического аппарата для исследования Солнца. Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 71. (№ 2186 в перечне ВАК до 30.11.2015 г.)

6. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Оптимизация прямых полётов к Юпитеру с ядерной электроракетной двигательной установкой. Вестник МАИ. 2013. Т.20. № 5. С.32–41. (№ 289 в перечне ВАК до 30.11.2015 г.)

7. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Квазиоптимальные траектории полёта к Юпитеру с последовательностью гравитационных маневров у Земли. Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2015. № 4. С 70–76. (№ 368 в перечне ВАК от 16.03.2018 г.)

8. Константинов М.С., Петухов В.Г., **Мин Тейн**. Анализ влияния мощности солнечной энергетической установки на характеристики проекта «Интергелио-Зонд» при использовании электроракетных двигателей.

Известия Академии Наук. «Энергетика». 2016. № 2. С 102–117. (№ 562 в перечне МБД от 16.03.2018 г.)

9. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Оптимизация траектории выведения космического аппарата на систему гелиоцентрических орбит. Космические исследования. 2017. Том 55. № 3. С.226–235. (№ 608 в перечне МБД от 16.03.2018 г.)

10. Константинов М.С., Орлов А.А., **Мин Тейн**. Анализ влияния мощности солнечной энергетической установки на характеристики перелета космического аппарата с солнечной электроракетной двигательной установкой к Юпитеру. Известия Академии Наук. «Энергетика». 2017. № 3. С 97–113. (№ 608 в перечне МБД от 16.03.2018 г.)

11. Константинов М.С., **Мин Тейн**. Оптимизация траектории выведения КА на геостационарную орбиту для транспортной системы с удельным импульсом двигателя 600-900 с. Электронный журнал «Труды МАИ». 2017. № 4. (№ 2017 в перечне ВАК от 22.05.2018 г.)

#### **В рецензируемых иностранных изданиях:**

12. Konstantinov M.S., Petukhov V.G., **Min Thein**. The one mission for Sun exploration. IAC paper, IAC-12-A3, 5, 5. 63th IAC, Naples, Italy, 2012.

13. Konstantinov M.S., Petukhov V.G., **Min Thein**. Optimization of spacecraft insertion into the system of heliocentric orbits for Sun exploration. IAC paper, IAC-14-C1.9.4. 65th IAC, Toronto, Canada, 2014.

14. Konstantinov M.S., Petukhov V.G., **Min Thein**. Analysis of the flight paths to Jupiter using the sequence of gravitational maneuvers. IAC paper, IAC-15-A3.IP.4. Jerusalem, Israel, 2015.

15. Konstantinov M.S., **Min Thein**. Method of interplanetary trajectory optimization for the spacecraft with low thrust and swing-bys. Acta Astronautica. №.136 (2017) p. 297-311.

16. Konstantinov M.S., **Min Thein**. Optimization of the trajectory of the spacecraft insertion into the system of heliocentric orbits. Cosmic research. Vol.55. issue 3, 2017. p. 214-223.

17. Konstantinov M.S., **Min Thein**. Preliminary optimization of the complicated interplanetary flight path of the spacecraft with electric propulsion. *Procedia Engineering*. Vol.185, 2017, p. 246-253.

18. Konstantinov M.S., **Min Thein**. Low thrust trajectory optimization using covariance matrix adaptation evolution strategy. *The Advances in the Astronautical Sciences Series*. vol.161 (2018).

**На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:**

1. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Российский университет дружбы народов**» (ведущая организация). **Отзыв положительный.**

Наряду с общей высокой оценкой работы целесообразно высказать некоторые замечания и предложения:

1) Разработанный диссертантом подход к оптимизации траекторий космических аппаратов не следует переоценивать с точки зрения нахождения глобального экстремума при решении транспортных космических задач. Используемые в подходе эвристические приемы могут не привести к нахождению глобального экстремума. Исследование «всего поля» возможных вариантов схем перелета, возможных областей значений параметров схемы перелета требует использования популяций очень большой размерности. При этом могут возникнуть вычислительные трудности, связанные с быстродействием современной вычислительной техники. Использование же популяций относительно небольшой размерности может не привести к нахождению глобального экстремума.

2) В диссертационной работе приведены решения очень большого числа задач оптимизации межорбитальных и межпланетных перелетов. Все эти решения призваны показать эффективность предлагаемого в диссертации подхода к оптимизации транспортных операций в космосе. На наш взгляд, эффективность подхода достаточно наглядно обоснована примерами, приведенными в первой главе. Именно в ней приводятся результаты сравнения предлагаемого подхода с другими подходами и методами. Что



касается рассмотренных задач траекторной оптимизации, приведенных в других главах диссертации (кроме, может быть, анализа перелетов к Юпитеру), то при этом показана возможность использования предлагаемого подхода для проектно-баллистического анализа многих транспортных маневров, но не приводятся результаты сравнения эффективности (и в частности, трудоемкости) решений с традиционными подходами.

3) При анализе и оптимизации межпланетных траекторий с гравитационным маневром следует рассматривать возможную оптимальность гравитационного маневра, когда он выполняется не на минимальной высоте пролета планеты (как это делает автор). Это особенно характерно для межпланетных траекторий с последовательностью гравитационных маневров.

**2. Овчинников Михаил Юрьевич** (официальный оппонент), доктор физико-математических наук. **Отзыв положительный**, заверен учёным секретарем ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, кандидатом физико-математических наук, профессором А.И. Масловым.

По работе имеются следующие замечания.

1) «Красной нитью» по всей диссертации проходит слоган «повышение эффективности». Интерпретировать полученные автором результаты можно по-разному, например, с точки зрения инженерно-технологических, пользовательских критериев эффективности (доставляемая масса, затраты характеристической скорости, время полета) и с точки зрения вычислительно-алгоритмических критериев (сложность и «грубость» алгоритмов, их быстрдействие, сложность программной реализации); целесообразно дать определение или комментарий, что понимается под этим термином.

2) Во всех полученных автором в качестве примеров решениях задач траекторной оптимизации при рассмотрении межорбитальных и межпланетных перелетов используется простейшая модель движения центра масс КА в центральном поле сил, то есть не учитывается влияние

возмущений; уместным было бы привести оценки вклада пренебрегаемых возмущений на конечный результат.

3) Несмотря на обилие полученных автором численных результатов и проведенное им широкое сравнение, демонстрирующее высокую эффективность метода СМА-ES по сравнению с прочими численными методами оптимизации и, как следствие этого, наглядно демонстрирующее эффективность предложенной им методики решения задач траекторной оптимизации на практике, считаю, что сама методика все же требует более подробного и строгого теоретического обоснования.

4) При рассмотрении сложных схем межпланетного перелета КА, содержащих гравитационные маневры у ряда промежуточных планет, автором всегда рассматривается только один случай возможных параметров маневра, отвечающий предельному значению угла поворота асимптоты гиперболы пролетной орбиты.

5) Необходимо провести оценку степени универсальности разработанных методик и обосновать глобальность полученных экстремумов.

**3. Назаров Анатолий Егорович** (официальный оппонент), доктор технических наук. **Отзыв положительный**, заверен заместителем генерального директора по персоналу АО «НПО Лавочкина» М.В. Данильченко.

В качестве недостатков диссертационной работы следует отметить следующее.

1) Рассматриваемые задачи оптимизации перелетных траекторий исследуются в рамках математической модели, учитывающей только центральное (ньютоновское) гравитационное поле. Не проведена оценка влияния возможных возмущающих воздействия на движение центра масс КА на результаты решения оптимизационной задачи.

2) При описании прямого перелета КА с ЯЭРДУ к Юпитеру и прямого выведения КА на гелиоцентрическую рабочую орбиту, не приведена

информация о приемах, с помощью которых автор получил такое большое количество экстремалей. Осталось неясным, существуют ли какие-то другие экстремали.

3) Не проведен анализ степени влияния ошибок отработки программ управления ориентацией вектора тяги на точность требуемых параметров конечной орбиты.

4) В первой главе диссертации при описании проведения сравнительного анализа и таблиц, подтверждающих эффективность предлагаемого метода, имеют место излишние повторения.

**4. Старинова Ольга Леонардовна** (официальный оппонент), доктор технических наук. **Отзыв положительный**, заверен начальником отдела сопровождения деятельности ученых советов Самарского университета, Васильевым И.П.

Необходимо отметить следующие недочеты:

1) Хотя в работе утверждается, что разработанные методы и алгоритмы поиска оптимального программного управления и соответствующих им траекторий движения являются регулярными и устойчивыми, строгое доказательство сходимости и устойчивости методов и алгоритмов отсутствует. В частности, не определены области сходимости и устойчивости. Имеется только множество примеров решения отдельных задач и сравнение разработанных методов с известными, которое подтверждает эффективность и регулярность разработанных автором методов в частных случаях.

2) Разработанный диссертантом методический подход показал свою эффективность в решении сложных многоэтапных, многовитковых манёвров, рассматриваемых в рамках ограниченной задачи двух тел, однако представляется возможным использование данных методов и алгоритмов для перелётов с геоцентрических на селеноцентрические орбиты, а также в точки либрации системы Земля-Луна и на гало орбиты в окрестностях этих точек. В

диссертации проверка работоспособности алгоритмов для оптимизации геоцентрических перелётов в рамках ограниченной задачи трех тел не проведена, что не позволяет оценить полноту и общность полученных решений в этом случае.

- 5. АО «НПО им. С.А. Лавочкина» Отзыв положительный**, подписан главным научным сотрудником, доктором технических наук, профессором В.В. Ефановым, ведущим математиком, кандидатом технических наук, А.В. Симоновым, математиком 2-й категории, кандидатом технических наук, В.Г. Полям, заверен заместителем генерального директора по научной работе АО «НПО Лавочкина» С.Н. Шевченко.

Судя по автореферату, работа не лишена некоторых недостатков. В состав возмущающих факторов, учитываемых в математической модели движения КА, на околоземных и межпланетных участках полета вследствие их значительной длительности и значительных площадей панелей солнечных батарей следовало бы добавить влияние гравитационных возмущений от соответствующих небесных тел Солнечной системы и светового давления. Также на околоземных участках не учтены заходы КА в тень Земли, на которых ЭРДУ не работает из-за отсутствия электропитания. Эти обстоятельства могут скорректировать результаты, полученные автором.

- 6. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), научно-учебного комплекса «специальное машиностроение» Отзыв положительный**, подписан чл.-корр. РАН, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры СМ-3 В.В. Бетановым, заверен руководителем НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктором технических наук, профессором В.Т. Калугиным.

При несомненной актуальности, научной новизне и практической значимости данной работы ей присущи некоторые недостатки, которые, не снижают ее общей положительной оценки:

1) в автореферате диссертации не отражена инициализация начальных параметров метода СМАЕС и влияние этих параметров на регулярность и трудоемкость решения различных задач оптимизации.

2) в автореферате диссертации не ясно отражены результаты шестой главы диссертационной работы.

3) в автореферате диссертации на рисунке 25 неправильный подрисуночный подпись (Траектория Земля – Земля – Юпитер – Сатурн). В самом деле показана траектория Земля – Венера – Венера – Земля – Юпитер – Сатурн.

**7. ФГУП МОКБ «Марс». Отзыв положительный**, подписан начальником направления №1 ФГУП МОКБ «Марс», кандидатом технических наук, доцентом М.А. Шатским, утвержден заместителем директора ФГУП МОКБ «Марс» по научной работе, заместителем генерального конструктора, доктором технических наук В.Н. Соколовым. Отмечены следующие недостатки:

Необходимо отметить и ряд недостатков, содержащихся в автореферате рассматриваемой работы:

1) при межпланетных перелётах с гравитационными манёврами в точке гравитационного манёвра разработанная методика не учитывает случай, когда угол поворота гиперболического избытка скорости меньше максимального, что сужает область поиска решения в пространстве выбираемых переменных.

2) в автореферате присутствует ряд грамматических ошибок.

**8. Акционерное общество «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ» имени академика М.Ф. Решетнёва. Отзыв положительный**, подписан ведущим инженером – конструктором, доктором технических наук, профессором В.Е. Чеботаревым, ведущим инженером сектора разработки баллистического и навигационного обеспечения КА, Ю.Л. Булыниным, ученым секретарем НТС секции № 1, А.Н. Кульковым, утвержден председателем секции № 1 НТС предприятия, Заместитель

генерального конструктора по разработке космических систем, общему проектированию управлению космическими аппаратами, кандидатом технических наук, А.В. Кузовниковым.

В качестве недостатков автореферата можно отметить следующее:

1) в описании подхода сведения краевой задачи принципа максимума Понтрягина к некоторой вспомогательной функции, составленной как сумма квадратов невязок плюс минимизируемый функционал, умноженный на масштабирующий множитель (стр. 22 автореферата), наличие последнего никак не комментируется, а его значение к концу поиска решения обнуляется, что в свою очередь сводит на нет возможность сменить локальный экстремум на последних итерациях. Такой подход не вполне обоснован.

2) в описании первой итерации метода СМАЕС автором предлагается генерировать начальное приближение случайным образом, а после этого используя информацию о полученных решениях начать движение к глобальному оптимуму (что проиллюстрировано на рисунке 2). Однако, такой подход может оказаться не продуктивным, т.к. связан с методом генерации случайных величин.

3) в тексте автореферата на стр. 18-20 имеется некоторая непоследовательность изложения. Так на стр. 18 ставится задача оптимального перелёта КА с идеально-регулируемым двигателем ограниченной мощности, при этом никак не объясняются появившиеся краевые условия (19). А после этого на стр. 19-20 достаточно полно и подробно описаны необходимые условия оптимальности для задачи с двигателем ограниченной тяги. Отмеченные недостатки не снижают общего представления о диссертации на актуальную тему и не изменяют положительную оценку диссертационной работы.

**9. ПАО РКК «Энергия» Отзыв положительный,** подписан руководителем НТЦ ПАО «РКК «Энергия», доктором технических наук Ю.П. Улыбышевым, заместителем начальника отдела ПАО РКК «Энергия»,

кандидатом технических наук С.А. Заборским и заверен Ученым секретарем ПАО РКК «Энергия», кандидатом физико-математических наук О.Н. Хатунцевой.

Судя по автореферату, работа не лишена недостатков.

- 1) Работа значительно выиграла бы, если бы автор провел анализ и классификацию различных экстремалей, полученных в рассматриваемых задачах.
- 2) из текста автореферата не вполне понятен выбор автора именно в пользу SMAES метода среди прочих стохастических подходов, как и не ясна причина обратиться именно к этой группе методов, пренебрегая более строгими с точки зрения математического обоснования диагональными методами и методами интервального анализа.
- 3) В выражениях (1) и (9) различные функции имеют одинаковое обозначение.
- 4) Излишнее внимание уделено описанию работы Хансена а Остермайера.

**10.ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Отзыв положительный,** подписан ведущим научным сотрудником ИКИ РАН, кандидатом технических наук Н.А. Эйсмонт, заверен Ученым секретарем ИКИ РАН, доктором физико-математических наук А.В. Захаровым. Считаю целесообразным отметить и ряд недостатков, содержащихся в автореферате рассматриваемой работы:

- 1) сходимость предлагаемого автором алгоритма SMA-ES зависит от задаваемого количества популяций. Чем больше популяций задано, тем лучше сходимость алгоритма. Таким образом, чтобы обеспечить хорошую сходимость нужно задавать достаточное большое количество популяций, что снижает скорость расчёта по сравнению с, например, локальными методами оптимизации.
- 2) при анализе межпланетного перелёта от Земли к Юпитеру, автор не учитывает влияние на движение КА гравитационного поля планеты

назначения, хотя, как известно, Юпитер обладает достаточно протяжённым и сильным гравитационным полем.

**11. ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Отзыв положительный,** подписан ведущим научным сотрудником отдела 20 ФГУП «Центр Келдыша» кандидатом технических наук А.А. Сеницыным, Инженером 1-й категории отдела 20 ФГУП «Центр Келдыша», Е.И. Музыченко, заверен Ученым секретарем ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», кандидатом военных наук Ю.Л. Смирновым.

По материалам автореферата можно отметить следующие недостатки диссертационной работы:

- 1) В автореферате при описании работы эволюционного алгоритма с адаптацией ковариационной матрицы не указаны используемые критерии останова итерационного процесса.
- 2) В задачах перелета космического аппарата в поле действия Земли с малой тягой не учитывались теневые участки и влияние нецентральной гравитационного поля Земли.
- 3) В задаче с перелетами космического аппарата с малой тягой с гравитационными маневрами радиус перицентра пролетной траектории фиксировался.

**12.АО "КБ "Арсенал" имени М.В. Фрунзе". Отзыв положительный,** подписан советником генерального директора, доктором технических наук, Атамасовым В.Д., начальником отдела организации и сопровождения научной деятельности, кандидатом военных наук, Борщичевым А.Л., Инженером 1-й категории сектора космических систем, Поповым А.Л. утверждён первым заместителем генерального директора Шевкуновым А.И.

В качестве недостатков автореферата следует отметить:

- 1) Рассматриваемый алгоритм эволюционной стратегии во многих задачах может иметь тенденцию сходиться к локальному, а не глобальному оптимуму, что не гарантирует получения решения задачи оптимального управления.



2) Достаточно существенной представляется проблема начального выбора параметров, определяющих реализацию механизмов выбора направления и длины шага в рамках предлагаемого алгоритма эволюционной стратегии.

**13.АО «ГРЦ Макеева» Отзыв положительный**, подписан заместителем генерального конструктора по проектированию изделий и комплексов, Молчановым С.Ф., Начальником отдела баллистики, Голуновым М.С., начальником группы отдела, Низовцевым В.М., заверен главным ученым секретарём, Калашниковым С. Т.

В качестве недостатков необходимо отметить следующие:

1) Из материалов автореферата видно, что формирование оптимальных траекторий проводится без участия в процессе оптимизации начальной орбиты с учетом старта с поверхности Земли.

2) В автореферате присутствуют ряд описок:

- на странице 22 в 8 абзаце сверху указан необычный удельный импульс ЭРДУ, да еще с размерностью м/с;

- на странице 43 в иностранных публикациях с 42 по 45 имя автора Мин Тейн написано на русском языке.

**14.МГТУ им. Н.Э. Баумана Отзыв положительный**, подписан доктором физико-математических наук, профессором кафедры ФНЗ «Теоретическая механика», Липшиным В.В. Заверен первым проректором – проректором по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, Доктором технических наук, профессором Зиминим В.Н.

По автореферату можно сделать следующие замечания.

1) Во второй главе автор стремился получить зависимость характеристической скорости  $V_h$  от величины начального реактивного ускорения при различных реальных значениях удельного импульса (600-900 с). У двигательных установок малой тяги современных российских и зарубежных КА значения удельного импульса доходят до существенно

больших значений. Поэтому необходимо пояснить, почему был рассмотрен именно этот диапазон удельных импульсов.

2) В этой же главе автор в основном ограничил себя временем выведения на целевую геостационарную орбиту, равным 25-35 суткам. Представляется, что при перелёте между некомпланарными орбитами (а именно такие перелёты заявлены во второй главе) дополнительное время на пассивном участке может позволить скорректировать долготу восходящего узла за счёт её прецессии, а при решении задачи встречи - расширить область оптимальной фазовой разницы по аргументу широты. Рассмотрение более длительного диапазона продолжительности выведения заметно повысило бы ценность приведённой на странице 24 эмпирической формулы, описывающей зависимость характеристической скорости  $V_h$  от величины начального реактивного ускорения.

3) Многие рисунки можно "прочитать" только при сильном увеличении электронной версии автореферата, при этом заметно ухудшается качество изображения.

**15.АО РКС «Российские космические системы». Отзыв положительный,** подписан главным научным сотрудником экспертно-аналитического центра АО РКС, доктором технических наук, профессором, Свиридовым К.Н. Заверен ученым секретарем АО РКС кандидатом технических наук, Федотовым С.А.

1) Можно отметить недостаток, содержащийся в автореферате. В работе утверждается, что разработанные методы и алгоритмы для задач оптимизации траекторий КА с ЭРДУ являются регулярными. Обычно регулярность эвристических методов зависит от параметров управления алгоритмом (например, размерностью популяции особей). Но в работе не приведено обсуждение параметров управления алгоритма SMAES для обеспечения регулярности при решении конкретных формулируемых задач.

**16. МГУ им. М.В. Ломоносова, Мехнико-математический факультет.**

**Отзыв положительный**, подписан доцентом кафедры общих проблем, кандидатом физико-математических наук Заплатиным М.П. можно отметить и ряд недостатков, содержащихся в автореферате рассматриваемой работы:

- 1) судя по автореферату, в качестве конкретного примера межорбитального перелёта рассматривается только перелёт на ГСО, что, не исчерпывает актуальные постановки околоземных межорбитальных перелётов.
- 2) судя по автореферату, не ясно как получены использованные условия трансверсальности при гравитационных маневрах.

**17. ФГУП «ЦАГИ».** **Отзыв положительный**, подписан руководителем программ реализации научных проектов развития аэрокосмических исследований ФГУП «Центральный аэродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского», доктором технических наук, Филатьевым А.С. К автореферату имеются следующие замечания:

- 1) отсутствует обоснование количества задаваемых наборов векторов варьируемых параметров для формирования функции распределения.
- 2) Не описано, из каких соображений задается значение критериальной функции, по достижении которого считается, что решение получено.
- 3) Критериальная функция (20) представлена в виде суммы квадратов невязок условий краевой задачи с единичными весовыми коэффициентами, несмотря на то, что эти условия имеют разный физический смысл и их чувствительности к вариациям параметров могут отличаться на многие порядки. Не ясно, исследовал ли автор зависимость сходимости численной процедуры решения от выбора вектора весовых коэффициентов.

**В дискуссии приняли участие:**

Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, шифр специальности в совете
Красильщиков Михаил Наумович	д.т.н, 05.13.01
Бобронников Владимир Тимофеевич	д.т.н, 05.13.01
Брусов Владимир Сергеевич	д.т.н, 05.07.09
Евдокименков Вениамин Николаевич	д.т.н, 05.13.01
Петухов Вячеслав Георгиевич	д.т.н, 05.07.09
Райкунов Геннадий Геннадьевич	д.т.н, 05.07.09

Диссертационный совет отмечает, что **наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем**, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработан методика оптимизации траектории КА с ЭРДУ на базе совместного использования условий оптимальности принципа максимума и численного метода оптимизации, базирующегося на эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.
2. Разработан метод оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ между некомпланарными орбитами. Метод обеспечивает хорошую сходимость не только в широко используемой постановке задачи на быстроедействие, но и в задаче оптимального перелета по критерию затраченной на перелет массы топлива при фиксированном времени перелета. Метод основан на совместном использовании необходимых условий оптимальности принципа максимума и эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.
3. Разработан метод оптимизации сложных схем межпланетного перелета КА с ЭРДУ. В методе используется полный набор условий оптимальности принципа максимума. Метод предполагает решение вспомогательной задачи, которая формулируется как задача безусловной оптимизации межпланетного перелета

с использованием активных гравитационных маневров и импульсов скорости на траекториях гелиоцентрического перелета. Полученные из решения вспомогательной задачи характеристики (маршрут и его характерные даты) используются на последующих двух этапах разработанного метода как начальное приближение. На последнем (третьем) этапе решается задача сквозной оптимизации всего рассматриваемого маршрута.

4. Разработана методика оптимизации сложных схем межпланетного перелета КА с традиционными химическими двигательными установками с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета. Методика базируется на эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

**Новизна полученных результатов** заключается в следующем:

Метод оптимизации траекторий КА, использующий анализ полного набора условий оптимальности принципа максимума и метод эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы, при проектировании траекторий КА ранее не использовался. Автор диссертации впервые предложил такой подход и показал его эффективность.

Автор проанализировал проблему многоэкстремальности в механике космического перелета. В ряде задач межорбитального и межпланетного перелета он получил и проанализировал большое семейство экстремалей, некоторые из которых не были ранее известны.

Автор в нескольких рассмотренных им задачах траекторной оптимизации получил новые необходимые условия оптимальности, что можно рассматривать как новый теоретический результат в механике космического полета.

При анализе сложных схем межпланетного перелета КА с ЭРДУ, включающего цепочку гравитационных маневров, автор предложил новый метод оптимизации таких схем. Идея автора состоит в использовании нескольких этапов анализа. Прежде чем проводить сквозную оптимизацию сложных схем межпланетного перелета автор предложил проведение предварительных

исследований, которые позволяют получить хорошее начальное приближение и в итоге обеспечивают сходимость итерационной процедуры при сквозной оптимизации сложной схемы межпланетного перелета.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с результатами, опубликованными другими авторами.

Диссертация целостно охватывает основные вопросы рассматриваемой научно-технической задачи. Изложение полученных результатов логически связано. В работе использованы фундаментальные научно-технические подходы и современные методы моделирования и обработки информации.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** заключается в следующем:

- Разработанный автором метод, как и предложенный им общий подход к оптимизации траекторий КА при межпланетных и межорбитальных перелетах КА с ЭРДУ, могут быть широко использованы при проектно-баллистическом анализе, при решении различных задач баллистического проектирования транспортных космических систем.
- Разработанные алгоритмы, реализующие предложенный в работе метод, могут быть использованы при проектировании межпланетных и межорбитальных перелетов КА с двигателями малой тяги.
- Автор провел исследование большого числа транспортных космических задач. Анализ полученных автором решений позволяет использовать свойства оптимальных характеристик траекторий перелета при проектировании перспективных транспортных космических систем. Полученные результаты могут быть применены при проектно-баллистическом анализе перспективных космических проектов и разработке эффективных программных продуктов для оптимизации траекторий космических аппаратов.

**Результаты диссертационной работы были использованы** учебном процессе кафедры № 601 «Космические системы и ракетостроение» МАИ.

Все результаты использования диссертационной работы подтверждаются соответствующим актом о внедрении, которые имеются в деле.

**Результаты диссертационной работы** могут быть внедрены на предприятиях ракетно-космической промышленности: НПО им. С.А. Лавочкина, РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, АО ИСС им. М.Ф. Решетнёва, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

**Диссертационная работа решает актуальную научно-техническую задачу.** Представленные в диссертационной работе результаты можно рассматривать как решение крупной научной проблемы, имеющей большое значение для повышения эффективности транспортных космических систем и для обоснованного выбора программы развития космических транспортных систем при реализации космической программы.

Изложенные в диссертационной работе **результаты являются новыми научно обоснованными техническими решениями**, имеющими существенное значение для развития проектной баллистики, особенно при дальнейшем внедрении перспективных электроракетных двигателей.

**В диссертационной работе все заимствованные материалы представлены со ссылкой на автора или источник.** Тем самым работа удовлетворяет п.14 Положения о присуждении ученых степеней.

**В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения** об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты, представленные в диссертации.

На заседании 26 июня 2018 г. диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, и принял решение присудить Мину Тейну ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против – 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

Д 212.125.12, д.т.н., профессор

  
Малышев В.В.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.12, к.т.н.

  
Старков А.В.