

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.12

**Соискатель:** Николичев Илья Андреевич

**Тема диссертации:** «Оптимизация многовиткового межорбитального перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой с учетом действия возмущений»

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

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

на заседании 27 декабря 2017 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 Николичеву Илье Андреевичу ученую степень кандидата 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, К.А. Занин, А.И. Кибзун, М.С. Константинов, В.П. Махров, С.Н. Падалко, В.Г. Петухов, В.Н., Почукаев, В.В. Родченко, Г.Г. Себряков, К.И. Сыпало, Ю.В. Тюменцев, Г.Ф. Хахулин, М.М. Хрусталеv, 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 кандидата технических наук**  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 27.12.2017 г., протокол №33

О присуждении **Николичеву Илье Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук. Диссертация «Оптимизация многовиткового межорбитального перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой с учетом действия возмущений» по специальности 05.07.09– «Динамика, баллистика, управление движением» принята к защите «24» октября 2017, протокол № 23, 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** Николичев Илья Андреевич 1989 года рождения, в 2013 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО МАИ) по специальности «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» с присуждением квалификации «инженер».

**В период подготовки диссертации** соискатель обучался в очной аспирантуре кафедры № 601 «Космические системы и ракетостроение» факультета «Аэрокосмический» ФГБОУ ВО МАИ, которую закончил в 2016 году.

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

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение» факультета «Аэрокосмический» ФГБОУ ВО МАИ **Константинов Михаил Сергеевич**.

**Официальные оппоненты:**

- 1. Овчинников Михаил Юрьевич** – гражданин Российской Федерации, 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 РАН
- 2. Симонов Александр Владимирович** – гражданин Российской Федерации, кандидат технических наук, ведущий математик отдела баллистики АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»

**Дали положительные отзывы о диссертации.**

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск Красноярского края (**ведущая организация**), дало **положительное заключение** (заключение было заслушано и одобрено на заседании секции НТС №1 Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» 17ноября 2017 года), заключение подписано ведущим инженером-конструктором, доктором технических наук, профессором В.Е. Чеботаревым, начальником сектора разработки баллистического и навигационного обеспечения КА Ю.Л. Булыниным, ученым секретарем НТС секции №1 А.Н. Кульковым, утвержден Председателем секции №1 НТС предприятия, заместителем генерального конструктора по разработке космических систем, общему проектированию и управлению космическими аппаратами Ю.Г. Выгонским.

В заключении указано, что полученные соискателем новые научные результаты имеют существенное значение для науки и практики организации навигационно-баллистического обеспечения управления полетом геостационарного спутника. Основные выводы и рекомендации достаточно

обоснованы. Диссертация Николичева И.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой анализируется проблема проектирования траекторий многовиткового межорбитального перелета КА с ЭРДУ. Работа соответствует требованиям Положения ВАК (в текущей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 («Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

**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.

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» - одно из лидирующих российских предприятий по созданию космических аппаратов связи, телевидения, ретрансляции, навигации, геодезии. Предприятие выступает головным исполнителем по ключевым проектам в рамках приоритетных государственных программ в области космической деятельности.

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.

Симонов Александр Владимирович. Область научных интересов – баллистико-навигационное обеспечение КА, проектирование траекторий КА. Является одним из ведущих специалистов отдела баллистики Акционерного

общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО "НПО Лавочкина").

**Основные результаты диссертационной работы** изложены в 3-х научных работах, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Всего по теме диссертации соискатель имеет 6 опубликованных работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Николичев И.А. Определение минимально-допустимых значений электрической мощности и тяги электроракетной двигательной установки при межорбитальных перелетах // Известия РАН. Энергетика, 2016, №2, с.129-145 (№586 в перечне ВАК МБД)
2. Николичев И.А. Оптимизация многовитковых межорбитальных перелетов с двигателями малой тяги // Вестник московского авиационного института, 2013, Т.20, №5, с.66-76 (№214 в перечне ВАК от 13.12.2017)
3. Николичев И.А. Применение аппарата дуальных чисел при решении задач оптимизации межорбитального перелета // Вестник московского авиационного института, 2016, Т.23, №1, с.151-162. (№214 в перечне ВАК от 13.12.2017)

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

1. **Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (ведущая организация). Отзыв положительный.**

К диссертационной работе могут быть сделаны следующие замечания:

1. В приведенных в диссертационной работе примерах использования предлагаемой методики оптимизации многовиткового перелета не учитывались аэродинамические возмущения и воздействие светового давления на КА, которые также могут оказать влияние на оптимальную траекторию перелета. Хотя понятно, что разработанная методика может учитывать такого рода возмущения.

2. В результатах работы отсутствует: определение минимально-допустимых значений электрической мощности и тяги электроракетной двигательной установки при межорбитальных перелетах.
3. Нет оценки эффективности предложенного автором метода оптимизации траектории многовиткового перелета КА с ЭРДУ в показателях: относительного снижения суммарного импульса, длительности полета, погрешности и длительности расчетов.

**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.

К работе имеются следующие замечания.

1. Универсальность методики выполняется только при выполнении ряда предположений, которые, правда, могут быть значительно ослаблены (фактически, сведены на нет) в случае рассмотрения только эллиптического движения.
2. В работе рассматривались только простые массовые модели космического аппарата.
3. В разделе 3.1 при построении продолжения полученного опорного решения ОТ-задачи по угловой дальности не описано каким образом получено точное глобально-оптимальное значение целевого функционала задачи.
4. При рассмотрении задачи в постановке на минимум тяги в разделе 3.2 не учитывалось влияние притяжения Солнца и Луны, а учитывался лишь геопотенциал.
5. При сравнении эффективности использования различных методов численного дифференцирования в третьей главе диссертационной работы не приведены соответствующие результаты, отвечающие

конкретным рассмотренным задачам оптимизации межорбитального перелета.

6. Во всех полученных в третьей главе примерах межорбитального перелета КА с ЭРДУ с начальной круговой или высокоэллиптической орбиты (ВЭО) на ГСО всегда полагалось, что линия апсид начальной орбиты лежит в плоскости экватора; последнее, без сомнения, уменьшает общность рассмотрения задачи.

**3. Симонов Александр Владимирович**(официальный оппонент), кандидат технических наук. **Отзыв положительный**, заверен заместителем генерального конструктора по общему проектированию АО «НПО Лавочкина» И.В. Москатиным.

В качестве недостатков диссертационной работы следует отметить следующие:

1. Принятая в рамках работы модель возмущений не содержит влияния аэродинамических сил и сил светового давления, что имеет большое влияние для КА с большими площадями солнечных батарей.
2. При расчетах не учитываются теневые интервалы, на которых из-за недостатка мощности, получаемой от солнечных батарей, невозможно проводить активные участки на ЭРДУ.
3. В главе 4 рассмотрена только задача встречи КА-буксировщика с объектом – космическим мусором, находящимся в окрестности ГСО, но совсем не изучен вопрос его увода на орбиту вне защищаемой области по ГОСТ Р 52925-2008 с наклоном более  $15^\circ$  и высотой выше или ниже ГСО на 200 км.

**4. ПАО «РКК «Энергия»** **Отзыв положительный**, подписан руководителем НТЦ ПАО «РКК «Энергия», доктором технических наук Ю.П. Улыбышевым, начальником отдела ПАО «РКК «Энергия», кандидатом технических наук Р.Ф. Муртазиным, 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.

К работе имеются следующие замечания.

1. Имеются грамматические ошибки, которые затрудняют восприятие материала.
2. Из автореферата неясно, каким образом получались базовые начальные приближения для решения краевых задач.
3. Большое внимание уделено методу точного определения производных от гамильтониана, но не обосновано применение принятого метода численного интегрирования. Для «чувствительных» краевых задач его точность не менее важна.

**5. ФГУП ЦНИИмаш. Отзыв положительный,** подписан заместителем генерального директора по управлению полетами – начальником ЦУПа, доктором технических наук М.М. Матюшиным, главным специалистом, кандидатом технических наук О.К. Жигастовой. Отмечено, что к содержащимся в автореферате материалам можно предъявить следующие замечания:

1. Не представлен анализ публикаций по исследуемой тематике
2. В модели возмущения не указано влияние аэродинамических сил и сил светового давления, которые могут оказывать существенное влияние на оптимальную траекторию перелета. Влияние возмущений на значения целевых функционалов следовало бы проверить с учетом этих сил.
3. Не рассмотрен способ определения глобального экстремума целевого функционала при наличии множества локальных экстремумов.

**6. ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Отзыв положительный,** подписан ведущим научным сотрудником отдела 20 ФГУП «Центр Келдыша» кандидатом технических наук А.А. Синицыным, заверен Ученым



секретарем ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», кандидатом военных наук Ю.Л. Смирновым.

В качестве замечаний отмечено:

1. Отсутствие сравнения производительности разработанных программ, использующих автоматическое дифференцирование в расчете правых частей дифференциальных уравнений для сопряженных переменных по сравнению с программами, использующими аналитические выражения.
2. В описании результатов задачи определения минимальной потребной тяги (стр.18-20) указывается наличие бифуркации решения, однако не указано с чем это связано, (например, продемонстрированная ранее в задаче минимизации массы топлива неединственность решения была связана с угловой дальностью перелета). Также, в автореферате не изложено как учитывается наличие неединственности решений при получении результатов, представленных на рис. 3-5 (в частности: относятся ли найденные решения к одному семейству; имеется ли переход между решениями с разной угловой дальностью при параметризации по наклонению и продолжительности перелета и не связана ли немонотонность зависимостей на рис. 4 и 5 именно с таким «перескоком» между семействами решений).

**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:

- 1 В работе не учитывалось влияние аэродинамических сил и сил светового давления.

- 2 Для рассмотренных в качестве основного примера межорбитальных перелетов с начальной высокоэллиптической орбиты на ГСО без объяснения всюду полагалось, что линия апсид начальной орбиты принадлежит плоскости земного экватора, что несколько снижает общность полученных результатов, отвечающих этому типу перелета.
- 3 Предлагаемая новая методика не решает, хотя бы частично, проблемы затрачивания большого количества вычислительных ресурсов (машинного времени) при решении оптимизационной задачи межорбитального перелета с учетом возмущений.

**8. ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Отзыв положительный,** подписан ведущим научным сотрудником ИКИ РАН, кандидатом технических наук Н.А. Эйсмонтом, заверен Ученым секретарем ИКИ РАН, доктором физико-математических наук А.В. Захаровым. Отмечены следующие недостатки, содержащиеся в автореферате работы:

1. В работе учитывалось влияние только потенциальных сил (гравитационной природы) и ни одной непотенциальной (диссипативной) силы (аэродинамической или светового давления), хотя известно, что в окрестности ГСО последняя может оказывать заметное влияние на движение КА, кроме того, в других задачах межорбитальных перелетов силы такого рода могут вносить качественные особенности в движения КА, и их исследование представляется целесообразным.
2. В автореферате на рис. 3 приведены изолинии минимального потребного значения тяги для межорбитального перелета на ГСО, построенных на плоскости длительность перелета – наклонение начальной орбиты, и в тексте упоминается область локального минимума, однако, очевидно, что для данной задачи не может

существовать локальных минимумов, кроме того, изолиния, соответствующая минимальному значению тяги, не замкнута, и значит не ограничивает никакой области минимума.

3. Судя по автореферату, в качестве конкретного примера перелета рассматривается только перелет на ГСО, что, конечно, не исчерпывает актуальные постановки околоземных межорбитальных перелетов.

**9. АО «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина».**

**Отзыв положительный**, подписан заместителем начальника отдела 517 АО «НПО Лавочкина», доктором технических наук А.Е. Назаровым, инженером 2-ой категории отдела 517 АО «НПО Лавочкина», кандидатом технических наук В.Г. Подем, заверен заместителем генерального директора по персоналу АО «НПО Лавочкина» М.В. Данильченко, утвержден заместителем генерального директора АО «НПО Лавочкина» – генеральным конструктором А.Е. Ширшаковым. Отмечено, что, судя по автореферату, работа не лишена некоторых недостатков. Состав возмущающих факторов следовало бы расширить (в первую очередь – световое давление), учитывая значительное время перелетов на малой тяге ЭРДУ. Это обстоятельство может скорректировать общие выводы, сделанные автором.

**10. Механико-математический факультет ФГБОУ ВО «Московский**

**государственный университет имени М.В. Ломоносова».** **Отзыв положительный**, подписан доцентом кафедры Общих проблем управления механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидатом физико-математических наук М.П. Заплетиним, отзыв заверен печатью факультета. Отмеченные недостатки: среди принятой модели действующих на КА с ЭРДУ возмущающих факторов отсутствуют диссипативные силы; в автореферате работы не приведены результаты сравнения эффективности применения различных методов численного

дифференцирования при решении рассматриваемых задач траекторной оптимизации.

**В дискуссии приняли участие:**

Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, шифр специальности в совете
Красильщиков Михаил Наумович	д.т.н., 05.13.01
Петухов Вячеслав Георгиевич	д.т.н., 05.07.09
Бобронников Владимир Тимофеевич	д.т.н., 05.13.01
Тюменцев Юрий Владимирович	д.т.н., 05.13.01
Воронцов Виктор Александрович	д.т.н., 05.07.09

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

1. Основным результатом проведенного исследования можно считать разработанную диссертантом методику оптимизации траектории межорбитального перелета КА с электроракетной двигательной установкой с учетом возмущений. Методика опирается на подход принципа максимума, при котором математическая модель, описывающая оптимальное движение КА, включает систему дифференциальных уравнения, правые части которых находятся дифференцированием гамильтониана. В условиях учета возмущений гамильтониан оказывается сложной функцией аргументов, по которым он должен быть продифференцирован. Провести такое дифференцирование аналитически крайне затруднительно (во многих случаях невозможно). Подход, предложенный автором, позволяет успешно справиться с этой проблемой.

2. При проведении анализа решений задач оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ с учетом действия возмущений, полученных с помощью разработанной автором методики, выявлен ряд важных свойств, характерных для перелетов с высокоэллиптической орбиты на ГСО, среди которых необходимо отметить малую степень влияния возмущений на величину целевого функционала задачи, но при этом возможно существенное изменение структуры полученного в результате решения оптимального управления.

**Новизна полученных результатов** заключается:

- В создании универсальной методики оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ с учетом действия возмущений, построенной на использовании математического аппарата дуальных чисел и элементов теории функции дуального переменного, и вытекающей из канонического формализма принципа максимума.
- В проведении количественного и качественного анализа полученных с помощью этой методики решений возмущенных задач оптимизации рассматриваемого типа межорбитального перелета.
- В работе рассмотрена новая постановка задачи оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ при исследовании проблемы оптимального маневрирования аппарата в окрестности ГСО при буксировке на орбиты захоронения более нефункционирующих КА (объектов космического мусора).
- Реализация предлагаемой в работе общей методики решения возмущенных задач оптимизации межорбитального перелета потребовала от автора написания специального программного обеспечения на языке FORTRAN, с помощью которого производились необходимые вычисления над пространством дуальных чисел, посредством переопределения ряда основных элементарных функций и перегрузки базовых процедур.

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

1. Решения, полученные автором, в рамках диссертационной работы сравнивались с известными решениями аналогичных задач, полученными другими авторами.
2. Предложенная автором методика и алгоритмы решения задач оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ при наличии сложной модели движения использовались при решении задач проектной баллистики в рамках ряда НИР (см. материалы о внедрении результатов диссертации).

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** подтверждается тем, что:

1. Среди результатов диссертационной работы имеющих наибольшее значение для практики проектирования траекторий межорбитальных перелетов следует отметить выводы, из проведенного автором сравнительного анализа характеристик оптимальной траектории, полученной с учетом и без учета действующих возмущений при выведении КА на геостационарную орбиту. Это сравнение показало, что оценка требуемой энергетики (требуемого запаса характеристической скорости, запаса топлива) может быть получена без учета возмущений. Таким образом, в работе сделан очень важный практический вывод, который можно использовать при проведении проектно-баллистического исследования при проектировании траектории выведения на высокие рабочие орбиты с использованием электроракетных двигательных установок.
2. Разработанная методика и общий подход к оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ с учетом производного типа и

вида возмущений могут быть широко использованы при проектировании траекторий транспортных космических систем.

3. Разработанные алгоритмы и созданный пакет программ, реализующих предложенную в работе методику, могут быть широко использованы при проектировании межорбитальных перелетов КА с двигателями малой тяги.

**Результаты диссертационной работы были использованы** при проведении работ ПО СЧ НИР «Магистраль», СЧ НИР «Устойчивость-ПМЭ», а также ОКР «Экспресс 80-103-НИИ ПМЭ МАИ» (см. материалы внедрения). Кроме того, результаты были использованы в учебном процессе кафедры № 601 «Космические системы и ракетостроение» МАИ.

Все результаты использования диссертационной работы подтверждаются соответствующими актами о внедрении, которые имеются в деле.

**Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию** при решении задач баллистического проектирования траекторий многовиткового межорбитального перелета КА с ЭРДУ.

**Диссертационная работа решает актуальную научно-техническую задачу** теоретико-методического обеспечения для решения актуальных задач проектной баллистики применительно к реализации комбинированной схемы выведения КА с ЭРДУ на высокие рабочие орбиты.

Изложенные в диссертационной работе **результаты являются новыми научно обоснованными техническими решениями**, имеющими существенное значение для развития проектной баллистики в нашей стране в части реализации траектории довыведения КА с ЭРДУ на высокие рабочие орбиты.

**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 27 декабря 2017 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 кандидата наук, и принял решение присудить Николичеву Илье Андреевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 7 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 – 22, против – 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

Д 212.125.12, д.т.н., профессор

  
Мальшев В.В.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.12, к.т.н.

  
Старков А.В.

И.о. начальника отдела УДС МАИ

Т.А. Аникина

