

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.379.03, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 3 марта 2023 года, № 1
о присуждении Ду Чунжуй, гражданину Китайской Народной Республики,
учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Оптимизация перелётов космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 в системе Земля-Луна», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов принята к защите 27 декабря 2022 г. (протокол заседания № 13) диссертационным советом 24.2.379.03, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34) приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 декабря 2018 г. № 365/нк с изменениями, внесёнными приказом от 07.07.2021 г. №670/нк.

Соискатель Ду Чунжуй, 10 марта 1993 года рождения, в 2019 г. с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по специальности «24.04.03. Баллистика и гидроаэродинамика». Присуждена квалификация магистр. С 2019 г. по настоящее время обучается в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре динамики полёта и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный

исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Старинова Ольга Леонардовна, заведующий кафедрой динамики полёта и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Официальные оппоненты: Константинов Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение»;

Шиманчук Дмитрий Викторович, кандидат физико-математических наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доцент кафедры «Механика управляемого движения» - **дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» г. Екатеринбург, **в своём положительном заключении**, подписанном заведующим кафедрой астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды, доктором физико-математических наук, доцентом Кузнецовым Эдуардом Дмитриевичем, руководителем объединённого научного семинара, доктором физико-математических наук Селезневым Антоном Фёдоровичем, утверждённом проректором по науке, доктором физико-математических наук, доцентом Германенко Александром Викторовичем, указала, что диссертационная работа Ду Чунжуй является научно-квалификационной работой и в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ду Чунжуй, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Соискатель имеет восемь опубликованных работ, в том числе по теме диссертации восемь работ; из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано семь работ (из них три статьи – в научных изданиях, рекомендованных ВАК; пять статей – в научных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science). Общий объём публикаций составляет 6,4 п.л., авторский вклад 4,4 п.л. (69%). Из публикаций лично соискателю принадлежат: математическая модель пассивного возмущённого движения

космического аппарата в окололунном пространстве и результаты анализа особенностей движения в рамках круговой ограниченной задачи трёх тел на периодических орбитах; математическая модель управляемого движения космического аппарата с электроракетной двигательной установкой в окололунном пространстве с учётом действующих возмущений; методики формирования оптимального номинального управления космического аппарата с электроракетной двигательной установкой при перелётах в системе Земля-Луна между периодическими орбитами по критериям минимальных времени перелёта или расхода рабочего тела; программно-математическое обеспечение и результаты расчётов оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелётов между периодическими орбитами в системе Земля-Луна. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Наиболее значимые работы:

1. Ду Ч., Старинова О. Л. Генерация искусственных гало-орбит в окололунном пространстве с использованием двигателей малой тягой //Космические исследования. – 2022. – Т. 60. – №. 2. – С. 151-166. (статья 2,19 / 1,97 п.л.)

2. Ду Ч., Старинова О. Л. Оптимальное управление при перелётах с малой тягой на вертикальные орбиты с орбит Ляпунова //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – №. 3. – С. 158-167. (статья 1,15 / 1,0 п.л.)

3. Du C., Starinova O L. Orbital perturbation analysis and generation of nominal near rectilinear halo orbits using low-thrust propulsion (= Анализ орбитальных возмущений и генерация номинальных почти-прямолинейных гало-орбит с использованием двигателей малой тяги) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2022. – Т. 236. – №. 14. – С. 2974-2990. (статья 1,5 / 1,35 п.л.)

4. Du C., Starinova O L. Generation of Artificial Halo Orbits in Near-Moon Space Using Low-Thrust Engines (= Генерация искусственных гало-орбит в окололунном пространстве с использованием двигателей малой тягой)//Cosmic Research. – 2022. – Т. 60. – №. 2. – С. 124-138. (статья 1,73 / 1,56 п.л.)

5. Du C., Starinova O. L., Liu Y. Transfer between the planar Lyapunov orbits around the Earth-Moon L2 point using low-thrust engine (= Перелёт между плоскими орбитами Ляпунова вокруг точки L2 Земля-Луна с помощью двигателя малой тяги)//Acta Astronautica. – 2022. – Т. 201. – С. 513-525. (статья 1,5 / 1,35 п.л.)

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов.

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Самарский научный центр РАН» (СамНЦ РАН), г. Самара, подписан заместителем директора по научной работе СамНЦ РАН, к.т.н. Соколовым Владимиром Октябревичем. Замечания: В автореферате хорошо раскрыта значимость точек либрации и периодических орбит вокруг них, однако не до конца понятна практическая значимость самих перелётов между ними. На рисунках 7 и 8 плохо читаются некоторые графики, которые накладываются друг на друга. При этом не даётся легенда к графику траекторий движения. На рисунках 10, 11 и в таблице 1 даны нумерации траекториям и орбитам (ТП15, ГА8-L2 и т.д.), которые не понятны при чтении автореферата.

2. Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара), подписан заместителем генерального конструктора по научной работе, к.т.н. Борисовым Максимом Владимировичем. Замечания: Автореферат трудно читать из-за большого числа введённых сокращений, например, «ОЛ», «ГА», «ВП», «ТП». Не все обозначения в формулах автореферата расшифрованы, некоторые рисунки плохо читаются.

3. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), отзыв подписан руководителем ИНОЦ «Космическая экология», д.т.н., профессором кафедры «Авиа- и ракетостроение», Трушляковым Валерием Ивановичем, и утверждён учёным секретарём учёного совета ОмГТУ, Немцовой Анной Фёдоровной. Замечания: В автореферате дублируется фраза «Представлены основные теоретические положения задачи (проблемы) трёх тел» в кратком описании к первой и второй главе диссертационного исследования. Постановка задач осуществлялась как в первой, так и в третьей главе диссертационного исследования. По объёму главы получились неравномерными. Описательная часть главы 2 могла быть добавлена в первую главу. Разделы главы 2, описывающие уравнения движения КА в ограниченной задаче трёх тел, а также матмодель движения КА с учётом возмущающих факторов могли быть включены в главу 1.

4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, подписан старшим научным сотрудником лаборатории №38 «Управление по неполным данным», к.ф.-м.н. Самохиным Александром Сергеевичем. Замечания: Подпись к рисункам 7, 8 - «Оптимальные траектории». Из автореферата неясно, в каком смысле оптимальные, лучшие из найденных или же в работе проверялись для них условия высших порядков, или ещё каким-то образом показывалась оптимальность

найденных экстремалей. Из автореферата непонятно, с какой точностью решались краевые задачи, не ясно влияние на траектории вычислительных погрешностей. В начале автореферата говорится про плохую вычислительную сходимость у других авторов в задачах с похожей постановкой, непонятно, удалось ли Ду Чунжуй преодолеть в полной мере данную трудность на основе разработанной методики. Автореферат содержит опечатки, например, на странице 15 с ошибкой написано слово «осуществлять».

5. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Амурский государственный университет», подписан директором научно-образовательного центра им. К.Э. Циолковского, к.ф.-м.н., доцентом Фоминым Дмитрием Владимировичем. Замечание: В автореферате отсутствует информация о том, к каким величинам относятся фазовые параметры динамической системы для получения уравнений в безразмерном виде. Отсутствует расшифровка сокращений на рисунке 4 (ЛГП, СД, ЗГП). Не дано словесное описание векторам $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ и $\mathbf{h}(\mathbf{v})$. Подрисовочный текст и описание рисунка б в тексте не до конца раскрывает суть полученных результатов.

6. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», подписан директором НИИ проблем надёжности механических систем, профессором кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета, д.т.н. Кузнецовым Павлом Константиновичем. Замечания: в автореферате не полностью раскрыт анализ диапазона возмущений и особенностей движения КА на разных типах периодических орбит. Из автореферата не ясно, какова область применения методики для различных типов ЭРДУ (диапазон значений тяги, удельного импульса, массы КА и т.д.)

Во всех отзывах отмечено, что указанные недостатки не снижают научную и практическую значимость работы и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Во всех отзывах отмечено, что диссертация соответствует требованиям ВАК Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и сделано заключение о возможности присуждения Ду Чунжуй учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Выбор Константинова Михаила Сергеевича в качестве официального оппонента по диссертации связан с тем, что он является крупным специалистом в области ракетно-космических систем, динамики и

управления движением космических аппаратов, в том числе, космических аппаратов с электроракетными двигателями.

Выбор Шиманчука Дмитрия Викторовича в качестве официального оппонента по диссертации связан с тем, что он является опытным специалистом в области методов оптимизации в задачах небесной механики, особенно в исследованиях задачи трёх тел.

Выбор ведущей организации связан с широко известными достижениями её специалистов в областях теории движения космических аппаратов, управления движением космических аппаратов и небесной механики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и проанализирована математическая модель движения КА с ЭРДУ в окололунном пространстве с учётом возмущений от гравитации планет Солнечной системы и Луны, нецентральности гравитационных полей Луны и Земли, особенностей движения Луны, светового давления;

разработаны методика и программно-математическое обеспечение для расчёта оптимальных траекторий перелётов космических аппаратов (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 системы Земля-Луна;

введено и использовано понятие инвариантных многообразий в задаче трёх тел системы Земля-Луна для проектирования оптимальных траекторий межорбитальных перелётов КА с ЭРДУ;

получены результаты, описывающие влияние возмущающих ускорений действующих в системе Земля-Луна на траектории движения космических аппаратов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработана математическая модель движения КА с ЭРДУ в окололунном пространстве, позволяющая проводить моделирование с погрешностью до 0,0005%, оценены диапазоны величин действующих на исследуемых орбитах возмущающих ускорений;

разработана методика решения ограниченной задачи трёх тел с использованием динамических структур для планирования траекторий перелёта КА с ЭРДУ в системе Земля-Луна, позволяющая снять затруднения в поиске начального приближения;

результативно использован принцип максимума Понтрягина для формирования оптимального номинального управления КА с ЭРДУ при перелётах между периодическими орбитами в системе Земля-Луна.

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

разработано программно-математическое обеспечение, предназначенное для формирования оптимального номинального управления КА с ЭРДУ при перелётах между периодическими орбитами в системе Земля-Луна;

получены результаты формирования оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелётов между периодическими орбитами в системе Земля-Луна, пригодные для баллистического проектирования реальных миссий: между орбитами Ляпунова относительно L_2 , между гало-орбитами относительно L_2 , от орбиты Ляпунова к вертикальной орбите относительно L_2 , между орбитами Ляпунова относительно точек либрации L_2 и L_1 , между гало-орбитами относительно точек либрации L_2 и L_1 ;

сформулированы выводы и практические рекомендации по использованию разработанных алгоритмов управления движением КА с ЭРДУ в системе Земля-Луна.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

что теория построена на известных классических методах исследования движения КА в рамках задачи трёх тел;

полученные результаты не противоречат и согласуются с известными результатами по исследованию динамики полёта КА в системе Земля-Луна.

Личный вклад соискателя состоит в:

разработке методов и алгоритмов формирования программного управления, в аналитических преобразованиях при построении математических моделей движения КА с ЭРДУ, в написании исходного кода программ моделирования управляемого движения КА с ЭРДУ, в проведении численных расчётов, в анализе результатов моделирования, в обработке и интерпретации результатов численных экспериментов, в апробации результатов исследования, в подготовке основных публикаций по выполненной работе. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором либо лично, либо при его определяющем личном участии.

В ходе защиты диссертации было высказано критическое замечание о необходимости уделять большее внимание техническим особенностям КА, в частности в диссертации не рассмотрено движение КА относительно центра масс.

Ду Чунжуй согласился с замечанием, в дальнейшей работе конструкция КА будет учтена.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, работа содержит решение актуальной задачи определения оптимальных траекторий движения КА с электроракетной двигательной установкой в окололунном пространстве, имеющей существенное значение для космических исследований.

На заседании 3 марта 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Ду Чунжуй учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета 24.2.379.03



Шахматов Евгений Владимирович

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.03

Крамлих Андрей Васильевич

03.03.2023