

Проведенные **научные исследования и полученные результаты** являются **новыми**. К таковым результатам относятся.

1. Разработана и проанализирована математическая модель управляемого движения КА с ЭРДУ в околосолнечном пространстве с учётом возмущений от притяжения точечных масс, представляющих тела Солнечной системы, нецентральности гравитационных полей Луны и Земли, особенностей движения Луны, светового давления. Данный результат является развитием ранее полученных результатов.

2. Разработана методика и программно-математическое обеспечение для расчёта оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелетов КА с ЭРДУ между периодическими орбитами относительно точек либрации системы Земля–Луна. Новым в предложенной методике является подход, при котором исключаются существовавшие ранее затруднения в поиске начального приближенного решения.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается корректным использованием методов небесной механики, математики, классических вычислительных методов, апробированных методов теории оптимального управления и согласованностью полученных результатов с известными результатами по исследованию движения в рамках задачи трех тел.

На защиту вынесены следующие положения.

1. *Математическая модель пассивного возмущенного движения КА в околосолнечном пространстве и результаты анализа особенностей движения в рамках круговой ограниченной задачи трех тел на периодических орбитах, в том числе, орбитах Ляпунова, гало-орбитах, осевых орбитах.*

В диссертации дано небесномеханическое обоснование модели движения КА в околосолнечном пространстве.

2. *Математическая модель управляемого движения КА с ЭРДУ в околосолнечном пространстве с учётом действующих возмущений от гравитации небесных тел Солнечной системы, нецентральности*

гравитационных полей Луны и Земли, особенностей движения Луны (эксцентриситет орбиты, лунные либрация и «застой»), светового давления.

В диссертации выполнено построение математической модели в рамках задачи оптимального управления. При описании особенностей движения Луны используется нестандартная терминология — «лунный «застой»», что соответствует явлениям высокой и низкой Луны, периодически наступающим вследствие наклона орбиты Луны к плоскости эклиптики.

3. Методики формирования оптимального номинального управления КА с ЭРДУ при перелётах в системе Земля–Луна между периодическими орбитами по критериям минимальных времени перелёта и расхода рабочего тела.

В диссертации при разработке методик оптимального номинального управления КА с ЭРДУ выполнена модификация метода продолжения по параметру.

4. Программно-математическое обеспечение и результаты расчётов оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелётов между периодическими орбитами в системе Земля–Луна: 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 .

Полученные в диссертации результаты исследования перелетов с учетом возмущений показывают обоснованность использования в качестве начального приближения траектории, рассчитанной в идеальном случае.

Все результаты выносимых на защиту положений опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Результаты, полученные в диссертации имеют высокую **научную и практическую значимость**. Следующие результаты имеют теоретическую значимость.

1. Разработана математическая модель управляемого движения КА с ЭРДУ в окололунном пространстве, позволяющая проводить моделирование с заданной точностью, оценены диапазоны величин действующих на исследуемых орбитах возмущающих ускорений.

2. Представлено использование динамических структур ограниченной задачи трех тел для планирования траекторий перелета КА с ЭРДУ в системе Земля–Луна, что позволяет снять затруднения в поиске начального приближения.

Результаты, имеющие практическую значимость.

1. Разработано программно-математическое обеспечение, предназначенное для формирования оптимального номинального управления КА с ЭРДУ при перелетах между периодическими орбитами в системе Земля–Луна.

2. Получены результаты формирования оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелетов 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 .

По теме диссертационной работы опубликовано семь работ, в том числе три статьи опубликованы в изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК России, пять статей опубликованы в изданиях, входящих в международные базы цитирования SCOPUS и WOS. В текстах диссертации и автореферата ошибочно указано, что по теме диссертационной работы опубликовано восемь работ. Приведенный в автореферате список содержит семь работ. Однако, это не влияет на выполнение требований ВАК к кандидатским диссертациям. В рассматриваемой диссертационной работе

требования ВАК к публикации результатов диссертаций на соискание степени кандидата наук выполнены.

Диссертация Ду Чунжуя состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (77 наименований). Объем работы составляет 114 страниц, диссертация содержит 58 рисунков и 21 таблицу.

По диссертации можно высказать следующие замечания.

1. Данные в таблице 1.1, содержащей сведения о КА, работающих в окрестности линейных точек либрации, ограничены 2018 г. Желательно было бы продолжить таблицу до настоящего времени и отобразить в ней российский КА «Спектр–Рентген–Гамма», запущенный в 2019 г., а также орбитальную обсерваторию «Джеймс Уэбб», запущенную в 2021 г., функционирующие в окрестности точки L2 системы Солнце — Земля — КА, и др.

2. На странице 21 перечисляются космические аппараты, на которых использовались электрореактивные двигательные установки. Уточнение — запуск космического аппарата DESTINY+ запланирован Японией на 2024 финансовый год.

3. Страница 25, строки 2–3 снизу. Утверждение «L1 и L2 расположены ближе к меньшему телу, примерно на границе его сферы действия ...» является спорным в части расстояния до границы сферы действия. Точки либрации L1 и L2 расположены вблизи границы сферы Хилла. В системе Земля — Луна — КА для Луны радиусы сфер действия 65 000 км и Хилла 61 500 км действительно сравнимы с расстояниями от Луны до точек либрации L1 и L2 — 58 000 и 64 700 км (по данным о расстояниях на рис. 2.2), соответственно. Но в системе Солнце — Земля — КА для Земли радиусы сфер действия и Хилла равны примерно 930 000 и 1 500 000 км, соответственно, а расстояние от Земли до точек либрации L1 и L2 примерно равно 1 500 000 км.

4. При обсуждении математической модели движения космического аппарата в разделе 2.2 автор правильно указывает, что эксцентриситет орбиты Луны колеблется в пределах от 0.0255 до 0.0775, но эти колебания имеют период несколько тысяч лет. Для рассматриваемой задачи эти изменения

эксцентриситета не существенны и можно использовать значение эксцентриситета орбиты Луны в современную эпоху — 0.0549.

5. Гравитационное поле Луны представляется в виде ряда по сферическим функциям. Учитывается ли такая особенность гравитационного поля Луны, как масконы?

6. В разделе 4.5 при анализе влияния возмущений от гравитации Солнца на параметры перелета на рис. 4.33 было бы полезно привести также и разности величин θ , полученных без учета и с учетом притяжения Солнца.

В тексте диссертации присутствует ряд стилизованных неточностей.

1. В диссертации используются нестандартные термины. Например, «функция Лежандра» вместо «полином Лежандра», «смежные функции Лежандра» вместо «присоединенные функции Лежандра», «гравитационная постоянная» вместо «гравитационный параметр», «эффективная площадь поперечного сечения, связанная с геометрией КА» вместо «площади миделева сечения».

2. Страница 11. Требуется выполнить согласование: «21 таблиц».

3. Страница 14. Предложение «Обзор миссий по исследованию точки либрации ...» является неудачным, поскольку космические аппараты решали различные научные и практические задачи, а окрестности точек либрации были лишь их местом работы. Далее в заголовке таблицы 1.1 правильно указывается, что это — аппараты, функционировавшие в окрестностях точек либрации.

4. Таблица 1.1. В столбце «миссия» словосочетание «образец возврата» следует заменить на «возврат образцов».

5. Страница 22, абзац перед подразделом «Выводы по первой главе». Во втором и третьем предложениях следовало бы использовать будущее время, поскольку здесь речь идет о подходах к исследованию, которое будет выполняться в следующих главах диссертации.

6. Страница 29, строки 4–5 сверху: требуется согласование «... для гало-орбит, перпендикулярную плоскости ...».

7. Страница 32 и далее. Для обозначения максимальных и минимальных значений автор использует «макс» и «мин», хотя обычно используют математические функции \max и \min .

8. Рисунок 2.5. В подписях осей абсцисс единицей измерения периода должен быть не «день», а «сутки».

9. В списке литературы заголовки отдельных статей даны в режиме «Все прописные» вместо «Как в предложении».

10. Список литературы, источник [39]: указаны не все выходные данные, кроме того, в 2020 г. вышло второе издание монографии: Старинова О. Л. «Расчет межпланетных перелетов космических аппаратов с малой тягой».

Отметим несколько опечаток.

1. Страница 15, строка 3 снизу: «ннм» заменить на «ним».
2. Страница 25, строка 6 снизу: «три точки коллинеарных точки» заменить на «три коллинеарных точки».
3. Страница 25, строка 4 снизу: «сторонс» заменить на «стороны».
4. Страница 29, строка перед формулой (0.9): «является» заменить на «является».
5. Страница 33, строка 7 снизу: «определять» заменить на «определять».
6. Страница 33, строка 2 снизу: «координатс» заменить на «координаты».
7. Страница 33, строка 1 снизу: «явля.т.ся» заменить на «являются».
8. Страница 52, строка 6 сверху: «критерия» заменить на «критерия».
9. Страница 57, строка 1 сверху: «да» заменить на «до».
10. Страница 71, строка 5 сверху: «опримального» заменить на «оптимального».
11. Страница 75, строка 1 сверху: «использавания» заменить на «использования».

12. Страница 94, строка 1 сверху: «перемещаются» заменить на «перемещается».

13. Страница 96, строка 1 сверху: «ТП5 и ТП6» заменить на «ТП15 и ТП16».

14. Страница 101, строка 5 сверху: «справедливо» заменить на «справедлив».

15. Страница 103, строка 5 снизу: «постоение» заменить на «построение».

Автореферат соответствует диссертационной работе.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационную работу Ду Чунжуня можно квалифицировать как новый вклад в развитие методики формирования оптимального номинального управления для межорбитальных перелетов космического аппарата с электроракетной двигательной установкой в системе Земля–Луна.

В целом диссертация Ду Чунжуня выполнена на высоком научном уровне, написана ясным языком и производит хорошее впечатление. Результаты работы могут быть использованы при баллистическом проектировании траекторий перелетов между периодическими орбитами в системе Земля–Луна.

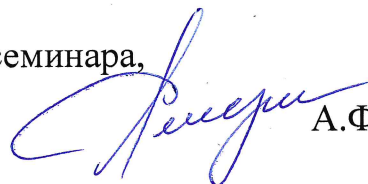
Результаты диссертации могут быть использованы во всех организациях, занимающихся исследованием межорбитальных перелетов космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой в системе Земля–Луна: в ИКИ РАН, ИПМ РАН, МАИ, МГУ, НПО им. С.А. Лавочкина, СНИУ, СПбГУ, УрФУ, ЦНИИМАШ и других организациях. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

На наш взгляд, диссертация Ду Чунжуня «Оптимизация перелётов космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 в системе Земля–Луна» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а автор работы заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Отзыв рассмотрен и одобрен на объединенном научном семинаре кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды и Коуровской астрономической обсерватории Института естественных наук и математики УрФУ (протокол № 2 от 07 февраля 2023 г.).

Руководитель объединенного научного семинара,
доктор физико-математических наук



А.Ф. Селезнев

Рецензент:

Заведующий кафедрой астрономии, геодезии,
экологии и мониторинга окружающей среды
Института естественных наук и математики
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор физико-математических наук, доцент



Э.Д. Кузнецов