

141070

г. Королев

Московской области,

ул. Ленина, 4-а

Телеграфный "ГРАНИТ"

Телефон: (495) 513-86-55

Факс: (495) 513-88-70, 513-86-20, 513-80-20

E-mail: post@rsce.ru

http://www.energia.ru



02.05.2017 № 202-8/96

На № _____

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Широбокова Максима Геннадьевича «Баллистико-навигационные аспекты миссий малых космических аппаратов к луне и точкам либрации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

В последнее десятилетие значительно усилился интерес к исследованиям и проектированию космических миссий за пределами околоземных орбит, в первую очередь для окололунного пространства. Техничко-экономические трудности в реализации регулярных пилотируемых полётов к Луне и создания окололунных космических станций в ближайшие десятилетия приводят к необходимости отработки элементов и/или систем для таких миссий с использованием малых космических аппаратов (КА), оснащённых высокоэффективными электрореактивными двигателями. В методическом плане астродинамические задачи в окололунном пространстве (включая перелёты и долговременные полёты в окрестности точек либрации), как правило, существенно сложнее задач околоземной

астродинамики. С этих точек зрения тема диссертации является **актуальной.**

Диссертационная работа Широбокова М.Г. включает введение и четыре главы.

Во введении представлена классификация малых КА и кратко описаны реализованные миссии малых КА и справедливо отмечено, что появление новых в технологическом плане КА «сопровождается развитием разнообразных математических инструментов».

Первая глава является по сути обзорной и содержит краткое изложение основных теоретических результатов в рамках круговой ограниченной задачи трёх тел, используемых численных методов и особенности перехода к точной эфемеридной модели. Представлен список реализованных миссий к точкам либрации с указанием их особенностей. В целом эта глава помогает правильно уяснить место содержательной части диссертации среди других работ.

Вторая глава посвящена разработке экономичных перелётов КА с малой тягой от околоземных орбит к окологрунтовым коллинеарным точкам либрации на основе резонансных сближений. **Существенным достижением, обладающим новизной,** здесь является построение цепочек резонансов - после первого обеспечивается близость к новому резонансу. Найдено большое количество резонансных цепочек, которые могут использоваться при проектировании соответствующих космических миссий. Далее автор анализирует окологрунтовые орбиты, которые получаются при сходе вдоль неустойчивого многообразия гало-орбиты. В случае отсутствия управления, такие траектории либо сталкиваются с Луной, либо вылетают из окрестности Луны через точки либрации $L1$ и $L2$. Автор рассмотрел вопрос о стабилизации окологрунтовых траекторий для малых аппаратов, снабженных типичными двигателями малой тяги. В результате оказалось, что как мини-,

так и наноаппараты (кубсаты) способны выйти на окололунные орбиты в широком диапазоне по наклонению и высоте орбиты, необходимо лишь заранее обеспечить соответствующую высоту стартовой гало-орбиты. Особо отмечается возможность достижения околополярных орбит. Безусловно, данный тип окололунных орбит имеет важное прикладное значение в настоящее время.

В третьей главе рассматриваются перелеты с либрационных точек L_1 и L_2 . **Новым** в этой части является построение множества окололунных орбит, которые доступны при сходе с окололунных гало-орбит в окрестности точек L_1 и L_2 . Очень существенным здесь является систематическое рассмотрение не ограниченного набора траекторий, а в целом доступных множеств для двух типов малых КА.

В заключительной четвёртой главе рассматривается весьма важная для проектирования космических миссий задача выбора дальнейшего плана полёта КА в случае нештатных ситуаций на неустойчивых либрационных орбитах, связанных с задержкой или не проведением запланированных манёвров коррекций. Автором не просто анализируется «цена» возврата на номинальную орбиту, но и **предложен новый подход** по парированию этой ситуации путём перехода на другую орбиту и изложены соответствующие рекомендации. Исследования показали, что этот вариант приводит к существенной экономии топлива, что может выражаться в продлении времени жизни аппарата на несколько месяцев или лет, в зависимости от продолжительности отсутствия орбитального управления и начальных условий в момент сбоя коррекции. Результаты были получены для практически важных классов задач: в системах Солнце-Земля и Земля-Луна, для обеих точек либрации L_1 и L_2 , а также как для гало-, так и для квазигало-орбит. Метод анализа можно с успехом перенести и на другие орбиты вокруг точек либрации, например орбиты Лиссажу.

В заключении перечислены основные результаты работы. Приложение содержит таблицы коэффициентов разложения в ряды Линдштедта-Пуанкаре гало-орбит вокруг точек либрации L1 и L2. Метод построения орбит на основании этих рядов изложен в первой главе. Отмечу, что подобные таблицы уже встречались и в других источниках, но были получены лишь для либрационных орбит системы Солнце-Земля, но не Земля-Луна.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты диссертации докладывались на отечественных и зарубежных научных конференциях. Они опубликованы в авторитетных иностранных изданиях, что является весьма редким для кандидатских диссертаций.

Из числа недостатков диссертации можно отметить следующее:

- В качестве ориентира для сравнительного анализа ежегодных затрат на поддержание окололунных гало-орбит используется оценка $\sim 10(\text{м/с})/\text{год}$,-- (стр. 34,127). Однако в зависимости от размеров гало-орбиты, периодичности, типа коррекции и т.п. эти затраты могут достигать нескольких десятков (м/с)/год (см. например обзор: Folta D., Yaughn F., «A Survey of Earth-Moon Libration Orbits: Stationkeeping strategies and Intra-Orbit Transfers» , AIAA Papet 2004-4741, 20pp.);

- Используемые для анализов и расчётов начальные околоземные орбиты (низкая круговая высотой 300 км и геопереходная с высотой перигея 250км.) для последующих перелётов к Луне с практической точки зрения не являются предпочтительными, поскольку имеют длительные времена прохождения через радиационные пояса Земли. Более предпочтительными являются относительно радиационно-безопасные с высотами более 700-800км.

Однако перечисленные недостатки не снижают общего положительного представления о диссертации как цельной научной работы. Несмотря на отмеченные недостатки, можно констатировать, что

диссертационная работа выполнена на очень высоком научно-техническом уровне. Научные положения, выводы и результаты, сформированные в диссертации, получены и **обоснованы** с использованием апробированных математических подходов, верифицированы большим объемом расчетов.

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решены важные проектно-баллистические задачи, имеющие существенное значение для практической реализации эффективных окололунных миссий для малых КА.

Считаю, что работа «Баллистико-навигационные аспекты миссий малых космических аппаратов к Луне и точкам либрации» удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор – Ширококов Максим Геннадьевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Руководитель научно-технического центра

Ракетно-космической корпорации «Энергия»,

доктор технических наук

Ю.П. Улыбышев

Подпись официального оппонента Улыбышева Ю.П. заверяю

Ученый секретарь Совета,

кандидат физико-математических наук



О.Н. Хатунцева