

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Орлова А.А. на тему «Оптимизация сложных схем перелёта КА с электроракетными двигателями при граничных условиях смешанного типа», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 - «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

В настоящее время реализовано много проектов исследования небесных тел Солнечной системы с помощью космических аппаратов (КА). Реализация таких проектов началась с 60-х годов XX века с полетов к Марсу и Венере. Космические транспортные средства при этом базировались на традиционных химических двигателях, а траектории перелетов проектировались в формате траекторий прямых перелетов в окрестность планеты назначения. Главной методической концепцией проектирования оказалась плодотворная идея точечных сфер действия планет, т. е. грависфер так называемой нулевой протяженности. За счет этого обеспечивалась достаточно высокая точность расчета и по характеристической скорости и по массовым характеристикам. В результате всестороннего развития этих методов и их модификаций астродинамика межпланетных и межорбитальных перелетов с применением гравманевров вышла на широкий простор проектирования сложнейших комбинированных схем перелетов с цепочкой гравманевров у промежуточных тел. При этом последовательные облеты нескольких тел, в том числе возвратные или резонансные гравманевры около Земли или планет, а также замкнутые схемы с возвращением КА на Землю позволили получить высокую точность траекторий наиболее быстрого достижения планет назначения с минимальными энергетическими затратами. Обращаясь кратко к истории вопроса о динамической значимости концепции гравитационной сферы действия планеты относительно Солнца следует напомнить, что она была введена в начале XIX века Лапласом, который дал ее динамическое небесномеханическое определение и вывел формулу для расчета ее радиуса. В XX веке, на заре космической эры, в процессе разработок теорий движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) появились понятия и других гравитационных сфер - в зависимости от точности и выбранных основ разрабатываемой теории движения ИСЗ. Что же касается понятия точечной сферы действия, то оно возникло в 20-х годах XX века в работах выдающегося советского ученого и инженера Фридриха Артуровича Цандера (1887-1933).

Цандер - автор многоплановых теоретических трудов и практических изобретений в области ракетно-космической техники. При его жизни была издана только незначительная часть его работ: одна из двух его одноименных статей "Перелеты на другие планеты", 1924 г., статья "Реактивное движение", 1932 г. и небольшая монография "Проблемы полета при помощи реактивных аппаратов", 1932 г. К счастью для космической науки сохранились некоторые его рукописи, конспекты и записки, хотя пропала рукопись его 500-страничной книги, подготовленной им к печати. Материалы Цандера начали публиковаться начиная с 1947 года, и к 1980 году вышло пять разных изданий, полностью или частично содержащих его работы. Наиболее важной в смысле динамики космического полета оказалось шестое издание трудов Цандера в 1988 году, выполненное под редакцией академика Василия Павловича Мишина, под названием: Ф. А. Цандер. "Проблемы межпланетных полетов". М. Наука. 1988. 232 с.

Многогранное научно-техническое творчество Цандера было им самим кратко сформулировано в его "Автобиографии" в 1927 г. Перечисляя свои оригинальные идеи межпланетных перелетов он писал: "Мне принадлежит, насколько мне известно, первенство по следующим предложениям:... ". Восьмое из девяти указанных им предложений касается гравманевров: "... по применению облета планет с целью увеличения скорости полета - получение даровой энергии во время полета на другие планеты. .... и по ускорению межпланетного корабля в моменты, в которые скорость полета большая (для той же цели)". Напомним, что Цандеру принадлежит также идея оригинального электрореактивного двигателя, а также несомненное (хотя и часто оспариваемое) первенство по касательному перелету между круговыми компланарными гелиоцентрическими орбитами - знаменитый эллипс Гомана-Цандера. Что касается принципа точечного гравманевра, то по поводу приоритета этой идеи Ф. А. Цандера следует напомнить, что в указанном выше издании 1988 года весьма ценными оказались научные комментарии к его текстам, написанные некоторыми членами редколлегии, в том числе дочерью

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. №  
" 17 " 09 2018

ученого Астрой Фридриховной Цандер, а также рядом сотрудников МАИ и других учреждений. Они проверили приблизительные расчеты и выкладки Цандера 20-х годов, прокомментировав его результаты уже в терминологической транскрипции современной астродинамики. Они переквалифицировали несколько устаревшие инженерные термины начала XX века в адекватное терминологическое пространство современного научно-технического языка. Здесь-то и выявились знаменитые цандеровские приоритеты в концепции точечного гравманевра, гравитационной сферы нулевой протяженности, характеристической скорости, гиперболического избытка скорости и других динамических понятий теории межпланетного перелета.

В 2017 году отечественная научная общественность отметила 130-летие со дня рождения нашего выдающегося пионера космонавтики и ракетодинамики Фридриха Артуровича Цандера (1887-1933). В этом аспекте представленная к защите диссертация А. А. Орлова, посвященная межпланетным перелетам по сложной схеме цепочки последовательных точечных гравманевров при полете к Юпитеру, может считаться уместной и своевременной данью уважения к памяти этого советского.

За истекшее столетие после цандеровских моделей межпланетных перелетов эта тематика после 20-х годов XX века сначала оказалась начисто забытой, но с 50-60-х годов стала бурно развиваться и публиковаться в советских и американских журналах и монографиях. К настоящему времени при описании задач точечных гравманевров теория перелетов перешла от давно уже ушедших в историю науки цандеровских треугольников скоростей при одиночном облете промежуточной планеты к новым точнейшим методам численного интегрирования движения КА при выполнении схемы комбинированной цепочки облетов и к сложной гамильтоновой аналитике импульсно-базисной астродинамики. Именно этим инструментом умело и грамотно пользуется автор представленной диссертации. Не вызывает сомнения, что при этом диссертант выполнил огромный объем теоретической и вычислительной работы.

Судя по автореферату, построение работы логично. В ней освещены следующие ключевые вопросы:

- разработка новой методики оптимизации межпланетных траекторий с ГМ при использовании ЭРДУ, позволяющей получать оптимальные решения, не требующей решения вспомогательных задач и обладающей высокой скоростью сходимости;
- разработка подхода, позволяющего решать краевые задачи с ограничениями смешанного типа в виде равенств и неравенств на основе использования дополнительных ослабляющих переменных с целью уменьшения трудоёмкости вычислений;
- апробация разработанных методик, в частности, проведения проектно-баллистического анализа полета к Юпитеру для различных схем перелёта, как прямого, так и с использованием нескольких ГМ.

Полученные в работе результаты исследования отличаются несомненной **новизной**. В частности:

- разработан метод продолжения траектории пассивного движения КА в оптимальную траекторию для двигателя ограниченной тяги (ОТ);
- метод продолжения по гравитационному параметру развит для случая многоточечных краевых задач;
- разработана новая методика оптимизации межпланетных траекторий КА с ЭРДУ, использующих гравитационные манёвры;
- развитие разработанной методики для решения краевых задач с ограничениями смешанного типа на основе использования дополнительных ослабляющих переменных;
- предоставление численных результатов анализа перелёта Земля-Юпитер, как для случая прямого перелёта, так и с одним и двумя гравитационными манёврами при использовании новой постановки оптимизационной задачи.

Несомненна и **практическая значимость** результата в смысле построения устойчивого алгоритма оптимизации межпланетных траекторий, в том числе с ГМ, разработки программного

обеспечения, реализующего данный алгоритм, и получения решений для ряда схем межпланетных перелётов.

Обоснованность и достоверность полученных решений подтверждаются использованием адекватных математических моделей, использованием корректной постановки задачи и сравнений полученных результатов с результатами других авторов.

Вместе с тем, насколько краткий текст автореферата позволяет судить о проделанной работе, можно сделать следующее замечание. Нам представляется, что работа выиграла бы, если бы был представлен подытоживающий анализ полученных результатов полёта к Юпитеру. Его следовало бы представить в виде сводной таблицы в три колонки: название полетной характеристики (с указанием размерности), ее обозначение, применяемое диссертантом, и численное значение.

Автореферат и перечень публикаций автора позволяют заключить, что диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным самостоятельно и на высоком научном уровне. Полученные результаты можно квалифицировать как решение новой современной научной задачи. Они достоверны, выводы из них и заключения обоснованы и представляют научный и практический интерес.

**Вывод.** Сделанное выше замечание ничуть не снижает научной значимости работы и носит характер совета на будущее. Некоторые незначительные редакционные шероховатости в тексте автореферата не мешают положительному впечатлению от представленной диссертационной работы. Диссертационная работа Орлова А.А. полностью соответствует критериям «Положения о порядке присуждения научных степеней» п. 9-14 ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертант А. А. Орлов заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 "Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов".

Лауреат Премии РАН им. Ф.А.Цандера,  
доцент кафедры небесной механики математико-механического факультета  
Санкт-Петербургского государственного университета,  
кандидат физ.-мат. наук (01.03.01 – Астрометрия и небесная механика)

04.09.2018

Поляхова Елена Николаевна

Я, Поляхова Елена Николаевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Орлова Александра Александровича, и их дальнейшую обработку.

Служебный адрес:

198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, кафедра небесной механики, к. 3121.

e-mail: [pol@astro.spbu.ru](mailto:pol@astro.spbu.ru), сайт организации <https://spbu.ru>, <http://www.math.spbu.ru/rus>

Служебный телефон (812) 428-41-63.

Подпись Е. Н. Поляховой заверяю,

