



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Научно-производственное
объединение им. С.А. Лавочкина»
(АО «НПО Лавочкина»)

Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95;

e-mail: npol@laspace.ru; www.laspace.ru

ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

от 01.10.2018 № 514/21476

на № _____ от _____

Проректору по научной работе
Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета) МАИ
д.т.н., профессору
Ю.А. Равиковичу
125993, г. Москва, ГСП-3,
Волоколамское ш., д. 4

О направлении отзыва

Уважаемый Юрий Александрович!

На ваш исх. от 26.06.2018 №601-16-370 направляю Отзыв ведущей организации АО «НПО Лавочкина» на диссертационную работу Орлова Александра Александровича «Оптимизация сложных схем перелёта КА с электроракетными двигателями при граничных условиях смешанного типа», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» в диссертационный совет Д212.125.12.

Приложение: на 6 л. в 2 экз.

*С уважением
Михаил*

Генеральный директор

В.А. Колмыков

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № _____
"11" 10 2018

А.В. Симонов
8-495-575-54-19



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Научно-производственное
объединение им. С.А. Лавочкина»
[АО «НПО Лавочкина»]

Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95;

e-mail: npol@laspace.ru; www.laspace.ru

ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

от _____ № _____

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор,

кандидат технических наук, профессор



В.А. Колмыков

2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации АО «НПО Лавочкина»

на диссертационную работу

Орлова Александра Александровича

«Оптимизация сложных схем перелёта КА с электроракетными двигателями при граничных условиях смешанного типа», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Сложность космических проектов постепенно возрастает, что приводит к увеличению их стоимости. В свою очередь, высокая стоимость проектов накладывает отпечаток на возможности их реализации. Данное обстоятельство объясняет то, что во всем мире в разных направлениях проводятся исследования, направленные на повышение энергетической эффективности космических транспортных операций.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № _____
"11" 10 2018

Одним из таких направлений является повышение энергетической эффективности технических средств выведения. В частности это касается применения перспективных электродвигательных установок (ЭРДУ), обладающих на порядок большим удельным импульсом по сравнению с традиционными жидкостными ракетными двигателями. Использование ЭРДУ в ряде случаев позволяет существенно повысить массовую эффективность космической транспортной системы, увеличить массу полезной нагрузки или использовать менее мощную ракету-носитель.

Другим важнейшим направлением повышения энергетической эффективности космических транспортных операций при межпланетных перелётах является использование гравитационного маневров или даже последовательности гравитационных маневров. Введение в маршрут гравитационных маневров позволяет существенно уменьшить требуемую величину гиперболического избытка скорости при старте КА от Земли, что позволяет переходить к использованию менее мощных ракет-носителей и химических разгонных блоков.

Диссертационная работа Александра Александровича Орлова анализирует оба выше отмеченных способа повышения эффективности транспортных операций при межпланетных перелетах. Она посвящена разработке методов оптимизации межпланетных траекторий космических аппаратов. При проведении научных исследований в данном направлении автор использовал ЭРДУ в качестве маршевых двигательных установок и рассматривал, в том числе, траектории космических аппаратов, включающих один или несколько гравитационных манёвров у планет солнечной системы. Указанные обстоятельства определяют **актуальность** рассматриваемой диссертационной работы.

Автором работы для решения оптимизационных задач использовался принцип максимума Понтрягина, относящийся к непрямым методам оптимизации. Его использование позволяет свести оптимизационную проблему к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В общем случае решение краевой задачи принципа максимума является сложной и нерешенной проблемой. Как правило, при этом используются итерационные процедуры, сходимость которых практически всегда зависит от удачного выбора начального приближения. Развитый ранее метод продолжения по гравитационному параметру позволял использовать как начальное приближение пассивное движение космического аппарата по орбите планеты отправления. В том виде, в котором метод разрабатывался, он применим только для простых схем прямого межпланетного перелета: планета-планета. При этом решается двухточечная краевая задача. Автором диссертационной работы была проведена модификация метода продолжения по гравитационному параметру для возможности его использования при решении многоточечных краевых задач, в частности, при проведении оптимизации межпланетных траекторий с гравитационными манёврами. Данное обстоятельство, как обоснованно утверждает автор, существенно упрощает поиск решения многоточечных

краевых задач, поскольку используется однозначный набор неизвестных параметров краевой задачи.

Другим научным результатом настоящей диссертационной работы является создание оригинальной методики оптимизации траекторий с гравитационными манёврами, использующей полный набор условий оптимальности. Данная методика базируется на разработанной автором математической модели гравитационного манёвра, отличительной особенностью которой является то, что при её применении часть условий оптимальности в точке гравитационного манёвра выполняется автоматически. В свою очередь, эта особенность приводит к тому, что добавление гравитационного манёвра в схему перелёта сравнительно не сильно увеличивает порядок краевой задачи. Более того, сквозную оптимизацию траектории можно проводить уже на первом этапе расчёта, то есть применение данной методики не требует решения вспомогательных задач.

Значительной трудностью при проведении оптимизации траекторий с гравитационными манёврами является то, что вид условий оптимальности в точке гравитационного манёвра зависит от высоты пролётной гиперболы КА. Если высота пролётной гиперболы равна минимально допустимой, то используются одни условия оптимальности. Если высота пролётной гиперболы больше минимально допустимой, то вид условий оптимальности в точке гравитационного манёвра меняется. Таким образом, при проведении расчётов обычно последовательно решают серию краевых задач с фиксированными условиями оптимальности в точках гравитационного манёвра, рассматривая все возможные варианты, и выбирают наилучшее решение. Очевидно, что такой подход заметно увеличивает трудоёмкость проводимых вычислений, особенно для схем межпланетных перелётов с большим числом гравитационных манёвров.

Автором рецензируемой диссертационной работы был проведён подробный анализ условий оптимальности в точке гравитационного манёвра. Результатом такого анализа был вывод условий оптимальности в точке гравитационного манёвра для общего случая, когда высота пролётной гиперболы больше или равна заданной. При этом, часть ограничений краевой задачи получается в виде неравенств. Для решения полученной краевой задачи автором предлагается подход, основанный на вводе в граничные условия дополнительных ослабляющих переменных, которые сводят ограничения типа неравенства к ограничениям в виде равенств.

Автором рецензируемого исследования проведён подробный анализ итерационного процесса поиска решения краевой задачи с ограничениями смешанного типа. Было показано, что решение такой задачи всегда совпадает с лучшим решением из тех, которые получаются при последовательном переборе всех вариантов условий оптимальности в точке гравитационного манёвра. Более того, была показана способность процесса поиска решения, по предлагаемой автором методике, переходить с одной экстремали на более хорошую, при изменении некоторых начальных данных. Например – при оптимизации времени перелёта. Автор находил решение для выбранной схемы

перелёта с гравитационным манёвром при фиксированных датах старта и гравитационного манёвра. При этом, в точке гравитационного манёвра лучшим оказывался один набор условий оптимальности. Далее, на втором этапе расчёта при оптимизации дат старта и гравитационного манёвра, в точке гравитационного манёвра оптимальный случай менялся. Сам же процесс поиска решения шёл плавно без скачков, а, следовательно, сохранял высокую устойчивость, что было убедительно показано в подробном анализе.

Многочисленные численные примеры, представленные в диссертационной работе, показывают эффективность предлагаемых автором методик. Кроме того, в третьем разделе диссертации проведён подробный анализ при различных схемах перелёта Земля-Юпитер зависимости массы полезного груза от мощности солнечной электроракетной двигательной установки (СЭРДУ). Анализ был проведён в новой постановке, при которой величина тяги СЭРДУ являлась ступенчатой функцией гелиоцентрического расстояния КА.

Таким образом, **научная новизна** представленной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Проведена модификация метода продолжения по гравитационному параметру для возможности его применения при решении многоточечных краевых задач.
2. Разработана методика оптимизации траекторий с гравитационными манёврами, основанная на новой математической модели гравитационного манёвра, позволяющая проводить сквозную оптимизацию траектории на первом этапе расчёта с применением полного набора условий оптимальности.
3. На базе представленной новой методики оптимизации траекторий с гравитационными манёврами разработан подход к использованию при решении краевой задачи условий оптимальности в точке гравитационного манёвра в общем виде.
4. Проведён анализ различных схем перелёта Земля-Юпитер в новой постановке.

Разработанная методика оптимизации межпланетных траекторий КА с ЭРДУ, включающих гравитационные манёвры, имеет большую **практическую ценность** и может найти широкое использование при разработке миссий в дальнем космосе. Автором разработан эффективный алгоритм оптимизации межпланетных траекторий КА с ЭРДУ, включающих гравитационные манёвры. Его отличительной особенностью является достаточно высокая степень автоматизации вычислений, обусловленная применением идей метода продолжения по гравитационному параметру, модифицированного автором для решения многоточечных краевых задач. Другой отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является отсутствие необходимости решения вспомогательных задач и возможность проведения сквозной оптимизации траекторий по сложным схемам перелёта уже на первом этапе расчёта. Также предлагаемая методика выгодно отличается от остальных возможностью нахождения оптимальной траектории, включающей гравитационные манёвры, в рамках решения одной краевой задачи. Это достигается использованием

граничных условий в точке гравитационного манёвра, объединяющих два вида условий оптимальности при гравитационном манёвре для случаев, когда высота пролётной гиперболы больше или равна минимально допустимой.

Предложенные оригинальные идеи автора могут позволить эффективно решать краевые задачи принципа максимума, в частности сокращать временные затраты, необходимые для поиска оптимальных траекторий межпланетных перелётов с гравитационными маневрами космических аппаратов с ЭРДУ.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается корректностью и достаточной строгостью обоснований принятых допущений, теоретическим обоснованием применяемого методического и алгоритмического обеспечения, а также результатами имитационного моделирования. Автор использует корректные математические модели, описывающие движение КА с ЭРДУ. Эффективность предлагаемых автором методик наглядно показана в диссертации на многочисленных и достаточно сложных проектах межпланетных перелетов. В качестве примера можно отметить поиск оптимальных траекторий при перелетах к Юпитеру с одним и двумя гравитационными манёврами у Земли и к Меркурию с гравитационным манёвром у Венеры.

Результаты, полученные автором, хорошо коррелируются с численными результатами других исследователей, в частности исследованиях, проведенных в нашей организации.

Наряду с общей высокой оценкой работы целесообразно высказать некоторые **замечания**:

1. Используемая в работе модель движения КА с ЭРДУ на межпланетном участке не учитывает возмущений от гравитационного воздействия планет и солнечного давления. Было бы желательно показать, как будет деформироваться траектория межпланетного перелета и характеристики космического аппарата в рамках расширенной математической модели, включающей влияние многих небесных тел.
2. Во всех численных примерах, проанализированных в диссертационной работе, в качестве маршевой двигательной установки рассматриваются только зарубежные ионные двигатели, и нет примеров с использованием стационарных плазменных двигателей отечественного производства.

Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, и могут быть рассмотрены как рекомендации к дальнейшему развитию разработанной методики.

Содержание диссертационной работы А.А. Орлова полностью соответствует паспорту специальности 05.07.09 (динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов). В ней проводится анализ и оптимизация сложных схем межпланетного перелета, «программирование управляемого движения и его оптимизации». Работа написана грамотно, аккуратно оформлена и снабжена наглядными графическими иллюстрациями.

Содержание автореферата, представленного А.А. Орловым, соответствует содержанию его диссертационной работы и отражает личный научный вклад автора.

Апробация работы проведена на трёх конференциях и семинаре. Непосредственно относящиеся к представленным в работе результатам материалы **опубликованы** в 3 статьях из списка рецензируемых научных журналов ВАК.

Результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы к использованию** на предприятиях, занимающихся проектированием межпланетных миссий КА с ЭРДУ – НПО Лавочкина, РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, ЦНИИМаш, НИИ ПМЭ МАИ, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Методики, разработанные автором диссертации, могут быть использованы при анализе перспективных межпланетных проектов, таких как «Экспедиция-М», «Венера-Д», «Лаплас-П» и «Интергелиозонд». Проведенный автором численный анализ может быть использован для сравнительного анализа вариантов транспортных космических систем.

Отзыв обсужден и одобрен на секции №1 НТС, протокол № 10-18 от 6 сентября 2018 года.

Считаем, что по совокупности полученных результатов диссертационная работа «Оптимизация сложных схем перелёта КА с электроракетными двигателями при граничных условиях смешанного типа», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, соответствует критериям, изложенным в пунктах 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Орлов Александр Александрович заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по названной специальности.

Заместитель генерального директора –
генеральный конструктор,
кандидат технических наук


А.Е. Ширшаков

Заместитель начальника отдела,
доктор технических наук

А. Е. Назаров

Ведущий математик,
кандидат технических наук


А. В. Симонов