

Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, г. Москва, 111250
тел.: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.spacecorp.ru, contact@spacecorp.ru
ОКПО11477389 ОГРН1097746649681 ИНН7722698789 КПП774850001

05.10.2018 № 64/13-85

На № 601-16-349 от 29 июня 2018 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Орлова А.А. на тему «Оптимизация сложных схем перелета 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 рамках диссертационной работы ее автором Орловым А.А. рассматриваются сложные схемы межпланетных перелетов космического аппарата (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ), включающие в себя гравитационные маневры. Основной целью данной работы является дальнейшее совершенствование общих теоретико-методологических подходов, необходимых для решения подобного рода задач, возникающих в процессе баллистического проектирования межпланетных исследовательских миссий для КА с маршевой двигательной установкой на базе электроракетного двигателя. И ввиду значительного числа как планируемых в будущем, так и уже осуществленных миссий по исследованию Солнечной системы тематика рассматриваемой диссертационной работы представляется **весьма актуальной**.

Как известно, баллистическое проектирование межпланетных траекторий для КА с маршевой ЭРДУ представляет собой весьма нетривиальную задачу, формализуемую, как правило, в виде отдельной (и притом весьма специфичной) оптимизационной проблемы механики космического полета. В рамках последней, КА с ЭРДУ рассматривается как

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 10
10 2018

управляемый динамический объект, траектория (и соответствующее ей управление) которого подлежит определению. При этом очевидно, что управление и порождаемая им траектория рассматриваемого объекта должны отвечать целому ряду требований: во-первых, доставлять экстремальное значение некоторому рассматриваемому целевому критерию качества, характеризующему межпланетный перелет, а во-вторых, удовлетворять целому ряду всевозможных ограничений, которые могут быть формализованы в виде набора отдельных условий, задающих терминальные многообразия, фазовые ограничения, а также ограничения в промежуточных точках. Для эффективного численного решения такой проблемы требуется использовать специальные методы, которые можно условно разделить на две большие группы – прямые и непрямые. Каждая из них обладает своими известными достоинствами и недостатками.

В диссертационном исследовании автор использует в качестве основного методического подхода к решению оптимизационных проблем непрямой метод вариационной группы – принцип максимума Понтрягина. Как и для любого непрямого метода, его применение сопровождается необходимостью записи в явном аналитическом виде набора необходимых условий оптимальности. Именно они и позволяют свести решение рассматриваемой оптимизационной проблемы к решению краевой задачи (в общем случае – многоточечной) для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Запись данных условий, как и непосредственно сама их «структура», в ряде случаев может оказаться достаточно сложной, как с точки зрения их аналитического представления, так и с точки зрения их последующего использования при проведении необходимых вычислений на практике. Это обстоятельство является одним из важнейших для содержания настоящей диссертационной работы. Как было отмечено ранее, автором рассматриваются сложные схемы межпланетных траекторий, включающие в себя несколько гравитационных маневров. Для их реализации используется известный и притом весьма

эффективный и простой подход, использующий в своей основе понятие точечных сфер действия (грависферы нулевой протяженности). При этом, несмотря на кажущуюся простоту принятой в работе математической модели гравитационного маневра, их наличие вдоль траектории КА с ЭРДУ порождает наборы ограничений смешанного типа, расположенные в промежуточных точках траектории. Это, в свою очередь, приводит для рассматриваемых в диссертационной работе задач оптимального управления к необходимости рассмотрения многоточечной краевой задачи принципа максимума. Данные ограничения описываются наборами условий в виде систем равенств и неравенств, которые (в силу непосредственно специфики формализма используемого метода оптимизации) достаточно затруднительно использовать при реализации численного решения многоточечной краевой задачи. Речь здесь идет, в первую очередь, об ограничениях типа неравенства, для которых всегда необходимо рассматривать следующие два случая: оптимальное решение может как принадлежать его границе, так и находится внутри допустимой (данном неравенством) области. И в зависимости от типа оптимального решения, число условий, используемых при замыкании краевой задачи в данном случае, будет различным. Поэтому, как правило, появляется необходимость решения двух задач, рассматривающих эти два случая по отдельности. При этом очевидно, что количество необходимых для рассмотрения анализируемых случаев будет возрастать при увеличении числа промежуточных точек (гравитационных маневров).

Избежать подобных трудностей позволяет **методический подход, предложенный автором диссертационной работы.** Он основан на использовании известной в нелинейном программировании схемы сведения смешанных ограничений к ограничениям только одного типа – ограничениям типа равенства. Это достаточно просто обеспечивается введением, так называемых, ослабляющих переменных. При этом при решении подобной задачи мы всегда получаем набор из фиксированного числа условий, что

значительно упрощает реализацию необходимых вычислений на практике и снимает вопрос, связанный с анализом соответствующих ограничений. В рассматриваемом случае такой прием приводит к «автоматизации» решения рассматриваемой оптимизационной проблемы баллистического проектирования.

Использование данного подхода позволило автору значительно упростить решение задач для сложных схем межпланетного перелета с множественными гравитационными маневрами. Полностью снимается проблема, связанная с необходимостью анализа ограничения, налагаемого на угол поворота асимптоты гиперболы при совершении им гравитационного маневра. В этом и состоит основной методический результат настоящей диссертационной работы.

Кроме этого, в качестве интересного методического результата диссертации следует считать предложенный автором подход, развивающий идею метода продолжения решения по гравитационному параметру. С его помощью на практике удастся реализовать «квазирегулярный» подход к решению краевых задач, использующий в качестве начального приближения тривиальное решение, которое соответствует пассивному движению в рамках ограниченной задачи двух тел. Эффективность данного подхода подтверждается большим числом полученных автором результатов.

Недостатки. К недостаткам работы следует отнести:

- из текста автореферата не совсем ясно как именно были получены некоторые необходимые условия оптимальности (и следствия из них) для рассматриваемых в диссертации задач с гравитационными маневрами;
- недостаточно полно приведено теоретическое обоснование методики применения так называемых ослабляющих переменных;
- автором работы не рассматриваются вопросы, связанные с оценкой точности и «достоверности» используемой модели гравитационного

маневра, что (возможно) должно найти свое отражение на полученных им результатах.

Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Судя по автореферату, диссертация является оригинальным и законченным научным исследованием, самостоятельно выполненным автором.

Стоит отметить, что избранная автором в качестве основной хорошо известная и широко применяемая методика исследования рассматриваемых в работе траекторных проблем, их строгая формализация свидетельствуют о достоверности и обоснованности полученных им результатов, носящих, в целом, как методический, так и чисто прикладной характер.

Таким образом, диссертационная работа полностью соответствует критериям «Положения о порядке присуждения научных степеней» п. 9-14, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Орлов Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Заместитель начальника
экспертно-аналитического центра
АО «Российские космические системы»,
чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор

В.В. Бетанов

Подпись заместителя начальника экспертно-аналитического центра
В.В. Бетанова заверяю.

Учёный секретарь
АО "Российские космические системы"
к.т.н., старший научный сотрудник

«05» октября 2018 г.



С.А. Федотов

Владимир Вадимович Бетанов, заместитель начальника центра ц13 АО «Российские космические системы», чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор
contact@spacecorp.ru, тел. 8-495-509-12-00