

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Орлова Александра Александровича «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».

Диссертационная работа посвящена оптимизации траекторий межпланетных перелётов с гравитационными манёврами (при ограничении на высоту пролёта типа неравенства) космического аппарата (КА) в рамках модели центрального поля. В работе рассмотрены примеры оптимизации траекторий межпланетного перелета КА к Юпитеру с двигателями малой тяги (электроракетными двигательными установками - ЭРДУ), показывающие эффективность предложенной методики оптимизации траекторий с гравитационными маневрами: у Земли и у Венеры при перелете от Земли к Меркурию. В последней главе диссертационной работы был проведен анализ транспортной системы с солнечной электроракетной двигательной установкой (СЭРДУ) для различных вариантов мощности энергоустановки и ступенчатой зависимостью тяги от гелиоцентрического расстояния КА, реализующейся вследствие выключения части двигателей при снижении мощности солнечной энергетической установки.

**Актуальность** представляемой работы определяется:

- необходимостью разработки устойчивых методов оптимизации сложных маршрутов для перелётов внутри солнечной системы и межпланетных траекторий,
- востребованностью использования систем энергоустановок на основе солнечных батарей (ЭУСБ) для перелётов внутри солнечной системы,
- необходимостью развития методов описания и оптимизации работы ЭУСБ с учетом зависимости вырабатываемой ими энергии от положения, времени и числа активных двигателей.

В качестве **цели** работы заявлено повышение эффективности космических транспортных систем (КТС) на межпланетных траекториях КА. Для достижения этой цели в работе решены следующие задачи:

разработка методики оптимизации межпланетных траекторий с гравитационными манёврами при использовании ЭРДУ, позволяющей получать оптимальные решения и не требующей решения вспомогательных задач;



разработка методики решения краевых задач с ограничениями смешанного типа в виде равенств и неравенств на основе использования дополнительных ослабляющих переменных;

апробация разработанных методик, в частности, на примере проектно-баллистического анализа различных схем полета к Юпитеру, как прямой, так и с использованием гравитационных маневров.

Автором получены следующие наиболее значимые **научные и практические результаты**:

- предложена и апробирована методика проектирования сложных схем межпланетного перелета КА к небесным телам Солнечной системы с использованием гравитационных маневров;
- возможность использования разработанных методов и программного обеспечения для проектно-баллистического анализа таких космических миссий, как:
  - прямые межпланетные перелёты с использованием КТС, включающей химический разгонный блок (ХРБ) и ЭРДУ;
  - межпланетные перелёты с последовательностью гравитационных маневров около планет солнечной системы с использованием КТС, включающей ХРБ и ЭРДУ;
- разработанные методы могут быть использованы при создании программных продуктов, обеспечивающих решение широкого круга задач (выходящих за пределы рассмотренных автором) для проведения проектно-баллистического анализа.

**Научная новизна** работы состоит в разработке метода продолжения траектории пассивного движения КА в оптимальную траекторию для двигателя ограниченной тяги; развитии метода продолжения решения по гравитационному параметру для многоточечных краевых задач; применении методики на основе использования дополнительных ослабляющих переменных для решения краевых задач с ограничениями смешанного типа при рассмотрении траекторий с гравитационными маневрами и тягой ДУ ступенчатого вида, зависящей от располагаемой мощности ЭУСБ.

**Достоверность полученных результатов** в части постановок рассмотренных задач и полученных решений подтверждается результатами, опубликованными другими авторами.

В качестве недостатков автореферата можно отметить следующие:

- Выбор нулевого значения функции тяги  $\delta$  при нулевом значении функции переключения  $\psi$ , вообще говоря, не является оптимальным в случае  $\psi=0$  на каком-либо интервале перелёта. Как известно, этот

случай требует дополнительного анализа и не может быть описан в рамках только принципа максимума Понтрягина.

- В тексте автореферата отмечено, что введение ослабляющих переменных способствует гладкому переходу с минимальной высоты полёта на большую высоту. Однако при обязательном равенстве одного из ограничений на ослабляющие переменные (с. 17) гладкий переход от нулевого значения одного к нулевому значению другого не описан. Хотя именно этот переход представляется наиболее интересным, и работа в целом выиграла бы, если бы в ней был представлен подробный анализ такого перехода.

Несмотря на указанные недостатки, можно утверждать, что представленная диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, а развиваемые в ней подходы имеют большое практическое и методологическое значение.

На основании автореферата, можно сделать вывод о том, что диссертация Орлова А.А. «Оптимизация сложных схем перелёта КА с электроракетными двигателями при граничных условиях смешанного типа» является самостоятельным и законченным исследованием, соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (п. 9 – 14) ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Адрес ФГУП «ЦАГИ»: 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Ведущий научный сотрудник  
НИО-15 ФГУП «ЦАГИ»  
кандидат технических наук

Тел. +7 (495) 556-31-09,  
E-mail: yanova2007@yandex.ru



О.В. Янова

Подпись Яновой О.В. подтверждаю:

Ученый секретарь  
диссертационного совета № Д 403.004.01  
при ФГУП «ЦАГИ»  
доктор физико-математических наук



М.А. Брутян