

## ОТЗЫВ

официального оппонента Петухова Вячеслава Георгиевича на диссертационную работу Самохина Александра Сергеевича «Методика построения экстремалей Понтрягина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелётов с учётом планетоцентрических участков», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика».

Диссертационная работа Самохина Александра Сергеевича посвящена разработке методики оптимизации замкнутых траекторий перелета к Марсу и его естественному спутнику Фобосу с возвращением к Земле. Анализируются траектории космических аппаратов (КА) с двигателями большой и малой тяги, ставится и решается задача оптимизации траектории без использования допущений метода сфер действия, то есть с учетом притяжения Солнца и планет на всех участках траектории. Для обеспечения сходимости и численной устойчивости используется последовательное решение ряда задач в различных постановках, сначала – наиболее простых, потом более сложных и заканчивающихся решением задачи сквозной оптимизации замкнутой траектории с использованием комбинации большой и малой тяги с учетом возмущающих ускорений от удаленных небесных тел. Приводятся численные примеры, включающие полный набор данных для проверки полученных автором результатов.

**Актуальность** темы диссертации определяется актуальностью задачи исследования Марса и его естественных спутников. В диссертации рассматривается задача оптимизации траекторий перелета к спутнику Марса Фобосу, исследование которого может помочь в решении фундаментальных вопросов происхождения и эволюции Солнечной системы. Первые попытки запуска КА к Марсу были осуществлены в начале 1960-х годов и с тех пор в СССР и США было реализовано много космических миссий для его исследования. В последние годы миссии по изучению Марса успешно реализуются Европейским космическим агентством, Индией, КНР, ОАЭ. Ряд новых космических миссий, в том числе к Фобосу, планируется в ближайшем будущем. Для их успешной реализации необходима разработка новых и совершенствование существующих методик вычисления и оптимизации траекторий перелёта, которые позволили бы выбрать и реализовать эффективные схемы экспедиций. В большинстве известных исследований расчет и оптимизация межпланетных траекторий производится в рамках метода сфер действия, при использовании которого на планетоцентрических участках не учитывается притяжение Солнца, а на

гелиоцентрических – планет. Несмотря на то, что для целей проектно-баллистического анализа метод сфер действия обычно дает хорошие оценки требуемых затрат топлива, его использование часто приводит к значительным ошибкам в длительности перелета и не позволяет с приемлемой точностью определить свободные параметры планетоцентрических орбит и программу управления вектором тяги двигательной установки. Учёт влияния притяжения Солнца и планет на всех участках межпланетного полета критически важен на финальных этапах подготовки космической миссии и при ее реализации для подготовки полетного задания, однако важен и при проведении проектно-баллистического анализа, поскольку позволяет существенно улучшить его качество. Вместе с тем, известно очень мало исследований по оптимизации межпланетных траекторий с использованием комбинации большой и малой тяги с учетом притяжения планет и Солнца на всех участках траектории, а известные методы имеют проблемы с вычислительной устойчивостью, сходимостью и, как правило, требуют больших вычислительных затрат. Поэтому тема диссертации, безусловно, актуальна.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация А.С. Самохина состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников

Во *введении* обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется её цель, определяется научная новизна исследований, излагается теоретическая, практическая значимость полученных результатов и обосновывается их достоверность, приводятся подробные сведения о публикациях автора и апробации работы, а также осуществляется краткий обзор содержания диссертации.

В *первой главе* рассмотрена оптимизация экспедиции КА к Фобосу с возвратом к Земле с учетом притяжения Солнца и планет на всех участках траектории, эфемерид и необходимости фазирования КА с Фобосом при управлении КА кусочно-непрерывной ограниченной большой и малой тягой. КА и Фобос при этом представляют собой непритягивающие материальные точки, а задача посадки на Фобос не рассматривается. В главе производится формализация задачи как задачи оптимального управления с единым функционалом, её исследование и выписывается итоговая 9-точечная краевая задача 70-го порядка. В конце главы приводится описание полученной в результате численного решения задачи экстремали, достаточное для повторения расчётов. Произведено сравнение схем экспедиций с комбинированной тягой и без двигателей малой тяги.

Во *второй главе* описывается предложенная методика – «лестница задач», заключающаяся в поэтапном переходе от задач в более простой к задачам в более

сложной постановке с продолжением решений по различным параметрам внутри одной постановки. В этой главе на каждом участке миссии учитывается притяжение только одного тела и траектория КА, являющаяся комбинацией конических сечений, описывается сначала как совокупность решений задачи Ламберта, затем как решение задачи Лагранжа. При внешней оптимизации используются градиентные методы. Численно построены окна старта к Марсу. Для задачи в упрощённой постановке проверено выполнение достаточных условий оптимальности второго порядка. В конце данной главы также рассчитан выигрыш от возможного гравитационного манёвра у Луны.

В *третьей главе* осуществлён переход к задаче многих тел. В этой главе, используя результаты второй главы, осуществляется окончательное построение начального приближения для решения сложной краевой задачи, описанной в первой главе, тем самым завершается описание методики построения «лестницы задач». Метод Ньютона, использующийся для решения краевой задачи внутри метода стрельбы не сходится с произвольного начального приближения, подбор же хорошего начального приближения для неизвестных параметров пристрелки не может быть осуществлён за разумное время ввиду большой размерности пространства параметров задачи. В главе приводятся математические постановки рассматриваемых задач и соответствующие им краевые задачи, приводятся параметры вычисленных траекторий перелёта КА.

В *четвёртой главе* разработанная методика применяется к другой схеме экспедиции, отличающейся трёхимпульсным подлётом КА к Фобосу. Для посадки на спутник Марса даётся импульс в перицентре подлётной гиперболы после чего КА перелетает к сфере Хилла Марса и затем, после второго импульса скорости, – к Фобосу. При построении траектории с малой тягой в данной главе во время подлёта к Фобосу учитывается только притяжение Марса. Во второй части данной главы описывается фазирование КА с Фобосом как с учётом эфемерид, так и в упрощённой постановке.

В *пятой главе* исследуется задача наискорейшего перелёта к Марсу в рамках ограниченной круговой задачи трех тел. Для получения экстремалей также строится лестница вспомогательных задач. Итоговая задача решается численно методом стрельбы, в результате получены траектории многовиткового подлёта КА к Фобосу и Марсу.

В *заключении* перечисляются основные полученные результаты.

#### **Научная новизна и достоверность результатов.**

В результате выполнения работы автором получены следующие новые результаты:

- 1) поставлены и исследованы задачи оптимизации экспедиции КА к Фобосу с возвратом к Земле с комбинацией большой и малой тяги, вычислены траектории, удовлетворяющие необходимым условиям оптимальности;
- 2) разработана методика сквозной оптимизации межпланетного перелёта КА с учетом притяжения Солнца и планет на всех участках траектории, разработаны необходимые для решения задач численные методы
- 3) произведено сравнение различных схем экспедиции, оценен выигрыш от использования двигательной установки малой тяги.

Достоверность полученных результатов определяется использованием хорошо обоснованных фундаментальных подходов и методов, различными численными экспериментами и сравнением результатов с результатами других научных коллективов.

#### **Практическая значимость**

Практическая значимость заключается в возможности использования предлагаемых автором методов для оптимизации межпланетных траекторий в сложных реалистичных постановках, что представляет несомненный интерес при проведении проектно-баллистического анализа и баллистических расчетов перспективных межпланетных КА.

#### **Замечания к тексту диссертации**

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

- 1) Для корректного сравнения вариантов траекторий с использованием двигателей большой и малой тяги необходимо использовать проектные модели КА, позволяющие оценивать массу двигательной установки, системы хранения и подачи топлива и системы электропитания, обеспечивающей функционирование двигательной установки. Эти величины зависят от типа двигательной установки, требуемых затрат топлива, тяги и удельного импульса, особенностей функционирования двигательной установки и системы электропитания, а в ряде случаев – и от некоторых траекторных параметров. В диссертации вместо таких проектных моделей используются постоянные значения, что приводит к не вполне корректному сравнению различных вариантов анализируемой миссии по критерию полезной массы КА.
- 2) В работе не учитывается нецентральность гравитационного поля Земли и Марса, а также притяжение Луны, что может приводить к значительному отличию

вычисленных планетоцентрических траекторий от реальных, особенно при рассмотрении планетоцентрических участков траектории с малой тягой.

3) При рассмотрении трехимпульсной схемы сближения КА с Фобосом в сфере действия Марса не учитываются возмущения от Солнца на участке траектории после первого импульса скорости до сближения с Фобосом. В соответствии с рассматриваемой схемой перелета, второй импульс скорости прикладывается в окрестности сферы Хилла Марса, поэтому траектория на участке между первым и третьим импульсами скорости будет сильно возмущаться из-за притяжения Солнца, а используемая автором модель движения, не учитывающая этот эффект, может приводить к значительным ошибкам в вычислении траектории.

4) Автор уделяет большое внимание полученным им в результате расчетов энергетическим хребтам в зависимостях импульсов скорости от даты старта и времени перелета. Это свойство давно и хорошо известно и изучено, его обнаружение не является новым результатом.

5) Автор разработал численный метод для борьбы с перестройкой структуры траектории, заключающийся во введении штрафа на схлопывание возникающего активного участка, эффективность которого по сравнению с известными методами непонятна. Для подтверждения эффективности стоило бы провести сравнение предложенного метода с известными и хорошо зарекомендовавшими себя подходами, заключающимися либо в «замораживании» структуры траектории (последовательности активных и пассивных участков) с введением дополнительных краевых условия на функцию переключения или в сглаживании релейной функции тяги.

6) В работе присутствуют необщепринятая терминология (например, используется термин «марсоцентрический» вместо «ареоцентрический») и жаргонизмы (например, «КА сидит на Фобосе» вместо «КА находится на Фобосе», «фазировка» вместо «фазирование»).

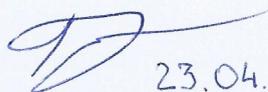
### **Заключение по работе**

**Указанные недостатки** в целом не снижают общей положительной характеристики работы.

Диссертация А.С. Самохина является законченным научным исследованием, имеющим теоретическую и практическую ценность. Основные результаты диссертации опубликованы в 38 научных работах, из них 7 – в изданиях, входящих в перечень ВАК. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Работа удовлетворяет требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Самохин

Александр Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика».

  
23.04.2021

Вячеслав Георгиевич Петухов,  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук  
(специальность 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»),  
первый заместитель директора Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московского авиационного института (национальный исследовательский университет)»,  
адрес: 125080 Москва, Ленинградское шоссе, д. 5, а/я 43  
телефон: 8 495 158 4931  
e-mail: PetukhovVG@mai.ru  
сайт: www.mai.ru

Подпись Петухова Вячеслава Георгиевича подтверждаю

Ученый секретарь НИИ ПМЭ МАИ  
К.Т.Н., с.н.с.



В. В. Кравченко