

Утверждаю

Директор ИКИ РАН

Пеструкович А.А.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» на диссертацию Самохина Александра Сергеевича «Методика построения экстремалей Понтрягина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелётов с учётом планетоцентрических участков», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

В диссертационной работе Самохина Александра Сергеевича рассматриваются задачи оптимизации траекторий межпланетного перелёта космического аппарата к Фобосу. Рассматривается перспективная схема управления аппаратами двигательными установками большой и малой тяги. Успех подобной миссии может заложить основы для будущих космических программ от Меркурия до Юпитера, включая пояс астероидов. Тем самым можно утверждать, что поставленная задача траекторной оптимизации является важной и интересной для освоения дальнего космоса, особенно учитывая планы России по доставке к Земле проб грунта Фобоса в ближайшие годы.

Стоит отметить математическую сложность поставленной задачи. Для реалистичности исследуемой в диссертации модели Самохин А.С. учитывает притяжение Солнца, Земли и Марса на протяжении всего перелёта к Марсу, эфемериды, а также рассматривает задачу сквозной

оптимизации с единым функционалом – массой доставленного к Земле грунта. Планетоцентрические участки учитываются целиком без аппроксимации их по методике точечных сфер действия. Кроме того, рассматривается задача с управлением аппаратом кусочно-непрерывной ограниченной тягой. В результате постановка получилась громоздкой и используется ряд упрощений: Фобос и космический аппарат считаются материальными точками, задача посадки на Фобос не рассматривается, не решается задача входа в атмосферу Земли в конечный момент времени под нужным углом.

Для построения траекторий в диссертации предлагается методика – «лестница задач», заключающаяся в переходе от более простых задач к более сложным и позволяющая постепенно получить удовлетворительное начальное приближение для решения итоговой задачи.

Диссертация содержит 5 глав. Первая глава посвящена основной задаче работы. Выписывается постановка задачи космодинамики. Оптимизируется экспедиция без промежуточных витков подлёта к Фобосу, с кусочно-непрерывной тягой, с возвратом к Земле. Предполагается, что космический аппарат стартует с космодрома Байконур с 2020 по 2030 год и для забора грунта должен пробыть на Фобосе не менее 30 дней. Управление осуществляется четырьмя различными двигательными установками. Задача оптимального управления с единым функционалом анализируется на основе принципа максимума. Полученная краевая задача 70-го порядка решается численно, проведена многоэкстремальная оптимизация, приводятся числовые характеристики конкретной экстремали.

Во второй главе рассматриваются задачи в упрощённой постановке, необходимые для получения начального приближения в. Основой предлагаемой методики является последовательный переход между задачами, которые удаётся успешно решить. Рассматриваются задачи Ламберта и Лагранжа с учётом лишь одного притягивающего

центра в каждый момент времени. В данной главе в упрощённой постановке осуществлена глобальная оптимизация, проанализированы окна старта к Марсу, проверены условия второго порядка, найден абсолютный минимум манёвра к Марсу, а также оценена схема с использованием на траектории межпланетного перелёта пертурбационного манёвра у Луны.

В третьей главе продолжается построение начального приближения для задачи первой главы. Рассматриваются усложнённые по сравнению со второй главой постановки: притяжение одновременно Солнца, Земли, Марса на всей траектории перелёта к Марсу, переход к учёту малой тяги как ограниченного кусочно-непрерывного управления. Оценивается выигрыш от использования двигателей малой тяги. При продолжении траектории перелёта по времени их работы преодолены трудности связанные с перестройкой структуры управления – разным количеством активных и пассивных участков. Приводятся числовые характеристики полученных решений, построено требуемое начальное приближение.

В четвёртой главе рассматривается задача в отдельной постановке, отличающейся более выгодным трёхимпульсным подлётом к Фобосу, а также решается проблема фазировки с Фобосом. Для данной постановки применяется та же методика, что и в первых трёх главах: происходит последовательное усложнение постановки задач. В итоге от импульсной постановки осуществлён переход к задаче с управлением космическим аппаратом двигателями большой тяги и кусочно-непрерывной ограниченной малой тягой. Для решения задачи фазировки применяется три разных подхода. В случае подлёта без промежуточных витков используется перескок между соседними по оборотам Фобоса вокруг Марса локальным минимумом функционала или скольжение по огибающей таких минимумов с искусственно зафиксированным угловым положением Фобоса. В случае трёхвиткового

подлёта для фазировки ниже сферы Хилла Марса опускается точка осуществления предпоследнего импульса на траектории.

Пятая глава посвящена третьей рассматриваемой в диссертации задаче. Рассматривается упрощённая круговая постановка, в отличие от предыдущих глав минимизируется время перелёта. При этом задача решается в соответствии с разработанной методикой и постепенно осуществляется переход от плоской импульсной постановки к трёхмерной постановке с непрерывной тягой. Задача решалась с использованием неинерциальных вращающихся систем координат. Построены экстремали Понтрягина для безимпульсного подлёта к Фобосу и Деймосу.

Основная **научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. В работе поставлена трёхмерная космодинамическая задача сквозной оптимизации с рассмотрением планетоцентрических участков, кусочно-непрерывным управлением комбинированной тягой.

2. Для решения получившихся громоздких задач разработана методика, позволяющая построить приемлемое начальное приближение, заключающаяся в постепенном усложнении постановок задач.

3. Разработаны методы для преодоления возникающих в процессе решения численных трудностей: при построении экстремалей Понтрягина используется счёт с двух концов в середину траектории, рассматриваются планетоцентрические системы координат, вводится штраф на схлопывание промежуточного активного участка при перестройке структуры траектории.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается адекватностью разработанных и применённых моделей и методик современным теориям, проверкой и тестированием разными способами, апробацией теоретических результатов численными расчётами. Кроме того, в работе проведено сравнение полученных результатов с исследованиями других авторов, в том числе с

результатами расчётов разработанного в ИПМ им. М.В. Келдыша программного комплекса ValCalc, работы частей разработанного автором программного комплекса была продемонстрирована на международных соревнованиях по глобальной оптимизации межпланетных траекторий ГТОС X.

Практическая и теоретическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработанный математический аппарат может использоваться как для оптимизации миссии к Фобосу, так и для исследования других тел Солнечной системы.

2) Построенная методика применяется для космического аппарата, оснащённого перспективной двигательной установкой малой тяги, при этом проведена разумная оптимизация с единым функционалом, позволяющая оценить возможное количество доставляемого грунта.

3) Проведена оценка выигрыша от пертурбационного манёвра у Луны и трёхимпульсного подлёта к Фобосу.

4) Разработан программный комплекс, на основе которого могут быть произведены расчёты для миссий с другими параметрами.

5) Разработана методика, позволяющая строить начальное приближение для громоздких задач космодинамики.

Результаты работы получены лично автором. Получено 4 свидетельства о регистрации прав на программы для ЭВМ. Материалы диссертации опубликованы в 38 научных работах, среди них 7 работ – в рекомендованных ВАК РФ изданиях.

Автореферат соответствует диссертации.

В качестве замечаний автору следует отметить следующее:

1) Непонятна целесообразность включения в диссертацию четвёртой и пятой глав, в первых трёх главах разработанная методика изложена подробно и проведённое в них

исследование выглядит завершённым. В результате текст работы получился перегруженным.

- 2) Целесообразно было бы оценить влияние на полученные в первой главе экстремали таких возмущающих факторов как: учёт несферичности Земли и Марса, учёт солнечного ветра, учёт притяжения Юпитера.

Данные недостатки **не снижают** положительной оценки выполненной Самохиным Александром Сергеевичем работы.

Выводы. Диссертация Самохина Александра Сергеевича «Методика построения экстремалей Понтрягина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелётов с учётом планетоцентрических участков» является завершённой научно-квалификационной работой, содержит результаты, обладающие научной новизной и имеющие теоретическую и практическую значимость. Она полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а её автор, Самохин Александр Сергеевич, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

кандидат технических наук

Эйсмонт Натан Андреевич

22.04.2021

Подпись Эйсмонта Н.А. заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН

кандидат физ.-мат. наук

Садовский Андрей Михайлович

