



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



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки,
Московская область, 141402
ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95
e-mail: npol@laspace.ru
www.laspace.ru

от 30 ИЮЛ 2018 № 517/16276
на № _____ от _____

Учёному секретарю
диссертационного совета Д 002.024.01
К.ф.-м.н. А.Е. Бондареву

125047, Москва, Миусская пл. д. 4
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук ведущего математика отдела баллистики Симонова Александра Владимировича на диссертацию Лан Аньци на тему «Методика определения траекторий космического аппарата для экспедиции Земля – астероид – Земля с учётом выбора орбит пребывания у астероида и её применение для экспедиции к астероиду Апофис», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика»

Диссертационная работа Лан Аньци посвящена рассмотрению методических вопросов, связанных с решением и качественным исследованием задач оптимизации перелета космического аппарата (КА), оснащённого «химической» двигательной установкой «большой» тяги (ДУ БТ) к астероиду 99942 Apophis (Апофис) и последующим возвратом к Земле. Этот астероид был обнаружен в 2004 году и сразу привлек к себе внимание как наиболее угрожающий столкновением с Землёй в ближайшую пару сотен лет. На сегодняшний день он является одним из ярких представителей проблемы астероидно-кометной опасности, признанной ООН одной из восьми глобальных проблем человечества. Кроме того, с точки зрения фундаментальной науки, изучение характеристик астероидов и комет продвигает нас в вопросах зарождения и формирования Солнечной системы. А с практической точки зрения астероиды представляют собой источник редких и

дорогих ресурсов, редко встречающихся на Земле. Сегодня такие полёты прорабатываются в ряде стран.

Основной задачей работы является разработка методики оптимизации траектории полёта КА к опасному астероиду с изучением его характеристик, взятием образцов его грунта, выведением мини-зонда с радиомаяком на долговременную орбиту спутника астероида и с возвращением основного КА к Земле. При этом в такой миссии одновременно решаются как фундаментальные научные задачи по исследованию Солнечной системы, так и задачи в рамках проблемы астероидной опасности. Стоит отметить, что в разработанной методике максимизируется конечная масса КА, состоящая из массы конструкции и «полезной» массы научной аппаратуры, а не минимизируется суммарная характеристическая скорость всех манёвров, совершаемых КА. Это более точно отражает результаты работы с точки зрения реализации космической миссии посещения астероида с последующим возвратом к Земле, т.к. аппарат является составным – используются две двигательные установки с отличающимися характеристиками, причём масса баков линейно связана с массой заправляемого топлива.

Также в диссертации изучено движение КА по астероидоцентрической орбите. Пребывание на ней, во-первых, необходимо для ожидания аппаратом оптимальной даты старта к Земле в окрестности небесного тела. Во-вторых, задача максимизации длительности баллистического существования орбиты вокруг астероида имеет особую важность для долговременной работы некорректируемого радиомаяка – миниспутника астероида без двигательной установки, задачей которого является уточнение орбиты астероида, угрожающего столкновением с Землёй.

Актуальность диссертационной работы продиктована как общим и повсеместным увеличением числа миссий к малым небесным телам Солнечной системы, так и осознанием в обществе астероидной опасности как реальной проблемы и необходимости разработок средств противодействия. Астероид Апофис в 21 веке будет иметь несколько сближений с Землей, причем в 2029 году он пролетит достаточно близко от центра Земли, на расстоянии около 38 тыс. км – ближе, чем геостационарные спутники. Это и другие близкие прохождения планет изменяют его орбиту, что может привести к столкновению Апофиса с Землей в

перспективе ближайших десятилетий. Поэтому, с точки зрения проблемы астероидно-кометной опасности, изучение этого астероида представляет особый интерес и важность, и экспедиция к Апофису обоснованно изучается в работе.

Основные научные результаты, впервые полученные в диссертации, напрямую связаны с предлагаемой автором двухэтапной методикой решения задач оптимизации траекторий перелета КА с ДУБТ по маршруту Земля – Апофис – Земля. На первом этапе в импульсной постановке и при использовании точечных сфер действия определяются оба гелиоцентрических участка полёта КА. Сначала пространство варьируемых параметров, представляющее собой даты стартов и прилётов, «зондируется» методом И.М. Соболя. Затем проводится локальная оптимизация простым генетическим алгоритмом, а далее результат уточняется при помощи квазиньютоновского BFGS метода. На втором этапе решение первого этапа уточняется на более полной модели гелиоцентрического движения КА, учитывающего гравитационное влияние других небесных тел и солнечного давления. Также оцениваются гравитационные потери при разгоне с опорной орбиты у Земли. Математическая модель движения КА вблизи астероида учитывает притяжение небесных тел (Солнца, Земли, Луны, Юпитера и Венеры), нецентральности гравитационного поля самого астероида, а также солнечного давления. Сформулированные в диссертации научные положения и выводы обладают высокой степенью обоснованности.

В основе представленной в работе методики, теоретических подходов и результатов, лежат оригинальные идеи, предложенные лично автором работы. Таким образом, **научная новизна основных результатов диссертационной работы** заключается:

- в создании автором эффективной методики построения оптимальных траекторий перелёта КА, оснащённого химической двигательной установкой, по маршруту Земля – астероид – Земля по критерию максимума конечной массы аппарата;
- в получении оптимальных траекторий полета КА к астероиду Апофис с возвращением к Земле, при учёте ограничений на времени ожидания у астероида и скорости входа спускаемого аппарата в атмосферу Земли.
- в разработке методики синтеза астероидоцентрического участка траектории, позволяющей максимизировать длительность баллистического

существования такой орбиты при учёте большого числа возмущающих факторов, включая нецентральность гравитационного поля астероида как вытянутого эллипсоида вращения, собственного вращения астероида вокруг малой оси, притяжения небесных тел и светового давления.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана методика оптимизации траекторий перелётов по маршруту Земля – астероид – Земля по критерию максимальной конечной массы КА;
- разработана математическая модель движения КА вокруг астероида и оценена степень влияния каждого из учитываемых факторов;
- определены характеристики астероидоцентрических орбит КА с большим временем баллистического существования и даны рекомендации к построению таких орбит;
- разработано программно-математическое обеспечение, реализующее описанную методику и которое может быть использовано при проектировании и оптимизации траекторий КА к различным малым телам Солнечной системы.

Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью и обоснованностью используемых в работе математических моделей, приведением автором большого количества результатов оптимизации межпланетных траекторий для случаев использования ракет-носителей типа «Союз» и «Зенит» с разгонным блоком «Фрегат», а также непосредственным сравнением ряда полученных результатов с существующими аналогичными результатами других авторов. Как это сделано, например, в разделе 4.3, где сравниваются полученные автором характеристики астероидоцентрической орбиты с большой длительностью существования с соответствующими результатами авторского коллектива НПО им. С.А. Лавочкина (Поль В.Г., Суханов К.Г., Симонов А.В.). При проведении исследований использованы строгие математические формулировки и эффективные методы оптимизации траекторий.

Полученные научные результаты, представленные в диссертационной работе, с достаточной полнотой опубликованы в девятнадцати работах, 10 из которых входят в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Оформление диссертационной работы отвечает требованиям ВАК. Изложение основного материала в работе дается логично, последовательно и обоснованно. Текст работы написан грамотным научно-техническим языком.

Текст автореферата полностью соответствует основному содержанию работы. В автореферате с достаточной для понимания степенью полноты изложены основные идеи, выводы и результаты диссертационной работы.

В качестве **недостатков** диссертационной работы следует отметить следующие:

- Методика определения параметров манёвра для выведения КА на орбиту вокруг астероида может быть применена только при условии достаточно хорошего знания параметров его движения. На текущий момент точность знания положения Апофиса оценивается величинами порядка тысячи километров и не отвечает этому критерию. Поэтому этот манёвр рекомендуется разбить на несколько (например, в 80% – 15% – 4% – 1%), после каждого из которых уточнять орбиты КА и астероида, после чего проводить следующую часть участка торможения.
- В разделе 2.6, посвящённом оценкам ошибок вычислений, сказано, что ошибка, связанная с переходами между системами координат составляет 66 км для траектории Земля – Апофис, и 25 км для обратной траектории. Во-первых, такие величины ошибок являются довольно большими, а во-вторых, природа их возникновения описана нечётко. Представляется возможным полностью исключить такие ошибки путём решения краевой задачи для манёвра разгона КА с опорной орбиты у Земли или Апофиса с прицеливанием в «картинную» плоскость у астероида или Земли соответственно.
- При определении траекторий возврата к Земле учтено только ограничение на скорость входа в атмосферу. Однако, не менее важным параметром является и траекторный угол в момент входа спускаемого аппарата в атмосферу. Вместе эти параметры определяют максимальную перегрузку и интегральный тепловой поток, действующие на аппарат при полёте в атмосфере, и являются одними из основных проектных характеристик спускаемого аппарата.

- Ракета-носитель «Союз-ФГ» уже несколько лет не применяется для запусков автоматических КА и используется только для пилотируемых миссий, где вскоре также будет заменена на «Союз-2».

Данные замечания не снижают научной ценности проведенного исследования, и их следует рассматривать как рекомендации к дальнейшему развитию разработанной методики.

Выводы. Диссертация Лан Аньци «Методика определения траекторий космического аппарата для экспедиции Земля – астероид – Земля с учётом выбора орбит пребывания у астероида и её применение для экспедиции к астероиду Апофис» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научно-технической проблемы, связанной с оптимизацией траекторий космических аппаратов для полётов к малым телам Солнечной системы и возвратов с них обратно на Землю. Содержание работы полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и соответствует критериям, изложенным в пунктах 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Лан Аньци заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по названной специальности.

Официальный оппонент

ведущий математик отдела баллистики,
кандидат технических наук

А.В. Симонов

Подпись официального оппонента
кандидата технических наук Александра Владимировича Симонова удостоверяю.

И.о. заместителя
генерального директора по персоналу



Н.П. Перевозчиков

Полное название организации: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО "НПО Лавочкина")

Почтовый адрес: 141402, РФ, г. Химки, Московская область, Ленинградская ул., д. 24.

Телефон: +7 (495) 573-56-75

Официальный сайт: <http://www.laspace.ru/>

Электронная почта: npol@laspace.ru