

## ОТЗЫВ

официального оппонента Петухова Вячеслава Георгиевича на диссертационную работу **Зубко Владислава Александровича** на тему *«Особенности использования гравитационных маневров и резонансных орбит для расширения возможностей исследования Венеры и малых небесных тел»*, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия (технические науки)», 2.5.16 — «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

**Актуальность темы исследований.** Исследование межпланетных траекторий представляет собой актуальную задачу. Увеличивается число проектов межпланетных космических аппаратов (КА) и исследований, посвященных проектированию их траекторий. Возрастает сложность используемых схем межпланетных перелетов. Значительное внимание уделяется межпланетным траекториям, включающим гравитационные маневры у планет для формирования гелиоцентрических траекторий КА.

К настоящему разработано и внедрено множество методов проектно-баллистического анализа межпланетных КА.

Однако с увеличением сложности космических миссий часто возникает необходимость решения совершенно новых проблем, которые ранее по каким-либо причинам не рассматривались. Одной из таких проблем является задача проектирования траекторий КА, обеспечивающих посадку в заданном районе Венеры. Эта задача существенно осложняется медленным вращением Венеры вокруг своей оси, что сильно ограничивает доступные для посадки области. В связи с этим представляется очевидной необходимость разработки дополнительных методов, методик и алгоритмов, позволяющих преодолеть указанное ограничение, оставаясь при этом в рамках возможностей, обеспечиваемых современным уровнем развития средств ракетно-космической техники.

Диссертационная работа, выполненная В.А. Зубко, посвящена проблеме проектно-баллистического анализа межпланетных траекторий перелета в задаче обеспечения посадки в заданный район поверхности планеты. В качестве основной цели выбрана Венера, как один из главных приоритетов в современных планетных исследованиях. Актуальность работы следует из необходимости создания простых и в то же время надежных подходов к выбору параметров траекторий перелета КА, обеспечивающих требуемые условия для посадки в выбранной области поверхности планеты

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа В.А. Зубко состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении сформулирована актуальность, приведен краткий обзор существующих работ по теме диссертации, поставлены цель и задачи исследования, а также сформулирована теоретическая и практическая значимость диссертации.

В первой главе, рассмотрен вопрос выбора мест посадки на поверхность Венеры с точки зрения их научной значимости и безопасности. Выбор мест посадки по этим критериям является наиболее важной частью любой миссии к Венере, включающей этап посадки, поскольку время жизни посадочного зонда ограничено и исследовать требуется наиболее значимые с точки зрения геологии участки поверхности. В главе приводятся карты Венеры, на которых размечены возможные районы посадки на её поверхности в зависимости от их научной значимости. Сделан обзор уже существующих, а также перспективных способов решения задачи обеспечения посадки в заданное место посадки, недостижимое в рамках прямого перелета, гелиоцентрическая часть которого определяется решением задачи Ламберта.

Во второй главе изложена методика использования резонансных с Венерой гелиоцентрических орбит КА для построения траектории полёта к Венере. Изложена общая концепция сценария миссии полёта к Венере в рамках разработанной методики. Формализована модель движения КА в рамках метода склеенных конических сечений, сделаны замечания касательно её применения в рамках разрабатываемой методики. Получены соотношения для углов поворота вектора асимптотической скорости за счёт гравитационного поля Венеры для случая резонансных гелиоцентрических орбит КА. Сформулирована оптимизационная задача, и выбран критерий оптимизации траекторий полёта к Венере в рамках разработанной методики.

Третья глава посвящена практическому применению методики и алгоритмов для проектирования баллистического сценария миссии «Венера-Д», а также укрупненному анализу результатов, полученных по описанному ранее методу, т.е. оценке районов на поверхности Венеры, куда возможна доставка посадочного аппарата (ПА). Проведен анализ ограничений, накладываемых на орбиту орбитального модуля (ОМ), на изменение достижимых районов посадки. Приведены примеры построения траектории полёта к регионам на поверхности Венеры, имеющим наивысший приоритет научной значимости (Велламо-Юг и Кутуе-Юг), проведен анализ требований к орбите ОМ при посадке ПА в заданных регионах. Проведено уточнение параметров траекторий полёта к Венере, полученных в рамках приближенной методики, с использованием более полных моделей движения, учитывающих притяжение Солнца и планет на всех участках траектории КА.

В четвертой главе рассмотрена задача повышения научной значимости миссии к Венере за счет попутного пролета астероида в рамках сценария с промежуточным гравитационным маневром. Найдено множество траекторий, позволяющих реализовать пролет какого-либо астероида достаточно большого

размера после гравитационного маневра у Венеры для всех рассмотренных автором синодических периодов.

В заключении сформулированы основные выводы по данному исследованию.

**Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации.

Как следует из текста диссертации, **научная новизна** и **теоретическая значимость работы** заключаются в следующем:

1. Разработана методика построения траекторий полета к Венере, позволяющих совершить посадку ПА в заданную точку на поверхности планеты с использованием гравитационного манёвра и резонансных гелиоцентрических орбит КА.

2. Разработан алгоритм, позволяющий установить аналитическую зависимость между выбранным местом посадки ПА, обладающим высокой научной значимостью, и резонансной орбитой, обеспечивающей требуемый перелет.

3. Установлены диапазоны допустимого выбора начальных орбитальных параметров ОМ в зависимости от накладываемых на его орбиту технических ограничений, и научных целей миссии.

4. Разработаны полуаналитические способы определения длительности затмения ОМ Венерой, а также радиовидимости между ОМ и ПА в зависимости от орбитальных параметров ОМ.

5. Разработан алгоритм, позволяющий определять траекторию КА, включающую попутное исследование одного или нескольких малых небесных тел (астероидов или комет), при их безымпulseном пролете, увеличивая тем самым научный потенциал миссии в целом.

**Практическая значимость работы** обеспечивается применением разработанной методики для расчета траекторий перелета КА в рамках проекта «Венера-Д». Автором продемонстрировано преимущество предлагаемой схемы полета перед традиционно используемыми схемами прямого перелета к Венере. Сценарий космической миссии, разработанный с помощью представленной в диссертации методики, принят в качестве основного сценария для одной из планируемых миссий к Венере в рамках предполагаемой программы исследований (2029-2034 г). Автором определены астероиды, пролет которых становится возможным при перелете КА к Венере по траекториям, полученным в рамках разработанной методики.

Судя по тексту диссертации, проведенное автором исследование является полным и всесторонним, перечень публикаций, полученных патентов, данные об апробации работы свидетельствуют о достоверности и практической эффективности полученных результатов.

К тексту диссертации присутствуют следующие замечания:

1. Следует отметить чрезмерно большой объем диссертации (227 страниц). По моему мнению, без ущерба для содержательной части, можно было бы сократить его в полтора раза.

2. На *странице 44* и далее высота перицентра орбиты КА вокруг Венеры выбирается равной 500 км, что в ряде случаев накладывает жесткие ограничения на выбор других элементов этой орбиты для обеспечения требуемой длительности орбитального существования КА. Выбор столь низкой высоты перицентра в диссертации никак не обоснован.

3. При анализе альтернативных подходов к обеспечению посадки в заданной район Венеры не были упомянуты и проанализированы некоторые перспективные возможности. Одна из них заключается в перелете к Венере по гелиоцентрической траектории с угловой дальностью более одного витка без использования гравитационного маневра у Венеры. Как известно, при угловой дальности более 360 градусов и достаточно большой длительности перелета задача Ламберта имеет по два решения для каждого числа целых оборотов, что может обеспечить существенное расширение доступных областей посадки. Другая возможность заключается в использовании маршевой электроракетной двигательной установки, которая при умеренных затратах рабочего тела может обеспечить подлет к Венере с околонулевым гиперболическим избытком скорости и обеспечить десантирование спускаемого аппарата в любую точку поверхности Венеры.

4. *Страница 101*: функционал (2.34) является суммой двух различных функционалов. Непонятно, почему весовой коэффициент свертки двух функционалов выбран равным 1. Для полноты анализа следовало бы рассмотреть задачу двухкритериальной оптимизации и построить Парето-фронт для этой задачи.

5. *Страница 142*: «Среди всех требований к орбите ОМ, перечисленных ранее, наиболее важным является обеспечение длительности баллистического существования спутника 8 лет и более...». Требуемая длительность баллистического существования может быть достигнута и другими способами, например увеличением высоты перицентра или коррекциями орбиты.

6. Много стилистических ошибок, например «...вследствие малости данного времени к общему времени полёта» (страница 57), «Схема получения  $\Phi_1$  будет рассмотрена в §2.4» (утверждение, сделанное в параграфе 2.4 на странице 66), «Далее проведём сравнение различных резонансов, исследуя такой критерий, как устойчивость полученных значений достижимых районов посадки с точки зрения в некотором диапазоне асимптотических подлётных скоростей» (страница 83), «за счёт суперпозиции достижимых районов посадки, получаемых в одну пару, датой старта/посадки удаётся устранить недостижимые районы» (страница 117), «...в каждое окно старта возможен пролёт от 1 до 14 сценариев пролета астероидов» (страница 175) и т.д.

7. Много неточностей, связанных, в частности, с различным обозначением и расположением индексов одних и тех же переменных, с использованием малых или заглавных букв для обозначения одних и тех же переменных, с отсутствием расшифровки некоторых переменных. Присутствует значительное количество опечаток, неточностей и, в некоторых местах, несоответствие рисунков формулам. Приведем некоторые примеры:

На *странице 26* утверждается, что спускаемый аппарат КА «Венера-4» «погрузился на 26 км в атмосферу планеты», в то время как правильно было бы написать, что он достиг высоты 26 км над поверхностью планеты. На этой же странице утверждается, что КА «Венера-5, 6» осуществили первый успешный спуск в атмосфере Венеры, хотя он был осуществлен на полтора года ранее КА «Венера-4».

Система координат из *параграфа 2.3* - не орбитальная (первая ось - по вектору скорости планеты). Эта система координат и далее по тексту диссертации называется орбитальной. Только на *странице 162* упоминается, что используется неклассическое определение орбитальной системы координат.

Из *рис. 2.4* не понятны соотношения (2.3) и (2.4). *Рис. 2.4* не соответствует формулам из п. 2.3 (вектор  $\eta_0$  направлен в другую сторону).

*Страница 161*: «Так, в случае увеличения минимальной допустимой величины перигелия, список потенциально доступных для сближения астероидов будет расти». По-моему, будет уменьшаться, так как из него будут исключены астероиды с радиусом перигелия меньше минимального. Наверное, «...максимальной допустимой величины перигелия...».

*Страница 202*: функция арктангенса в двух местах обозначена как  $\arctan$ .

*Страница 206*: «Ускорения  $\mathbf{a}_{grav}$ ,  $\mathbf{a}_{LT}$  учитывают релятивистские эффекты». Не поясняется, что это за ускорения и как они учитывают релятивистские эффекты.

Однако указанные недостатки не затрагивают сути работы и не снижают её общую оценку.

Таким образом, диссертационная работа Зубко В.А. на тему «Особенности использования гравитационных маневров и резонансных орбит для расширения возможностей исследования Венеры и малых небесных тел» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки методики построения траекторий перелета к Венере, обеспечивающих доставку десантного аппарата к заданному месту посадки на поверхности планеты, имеющей значение для развития планетологии и механики космического полета. Диссертационная работа соответствует паспортам специальностей 1.3.1 — «Физика космоса,

астрономия (технические науки)», 2.5.16 — «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» и отвечает требованиям пп. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Зубко Владислав Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия (технические науки)», 2.5.16 — «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Доктор технических наук  
Член-корреспондент РАН,  
директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Вячеслав Георгиевич Петухов

125080, Москва, Ленинградское шоссе, д. 4, а/я 43

E-mail: [PetukhovVG@mai.ru](mailto:PetukhovVG@mai.ru)

Тел: +7(499) 158-00-20

«31» июля 2024 г.



В.Г. Петухов