

## **О Т З Ы В**

официального оппонента на диссертацию Владислава Александровича Зубко «Особенности использования гравитационных манёвров и резонансных орбит для расширения возможностей исследования Венеры и малых небесных тел», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия» и 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

В диссертационной работе предложен ряд подходов к построению траекторий полёта к Венере, которые обеспечат доставку посадочного аппарата (ПА) в практически любую заданную точку на поверхности Венеры. Учитываются строение и состав атмосферы Венеры, характер её поверхности. Также рассматриваются возможности попутного исследования астероидов. С этой целью для проектирования траекторий автор развивает методику использования гравитационных манёвров с построением орбит космического аппарата (КА), находящихся в синхронизме с орбитальным движением Венеры. Поэтому диссертация соответствует заявленным научным специальностям 1.3.1 и 2.5.16.

### **Актуальность избранной темы**

Последние годы активно ведётся разработка новых планов исследования Венеры. Автор даёт развёрнутый обзор проектируемых миссий, как в России, так и за рубежом. Подчёркивается, что отечественный проект «Венера-Д» превосходит аналогичные проекты масштабом решаемых научных задач. Однако посадка на поверхность Венеры в области, выбранные для исследования, затруднена из-за специфики медленного вращательного движения Венеры. Это приводит к необходимости проектирования и моделирования нетривиальных схем перелётных орбит (в отличие, например, от стандартных схем перелёта к Марсу). Необходимо также учитывать характеристики атмосферы Венеры при расчёте орбиты ПА. Вне всякого сомнения, это определяет актуальность темы диссертации.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Автором разработана методика построения перелётных траекторий к Венере с использованием гравитационного манёвра около неё для построения резонансных гелиоцентрических орбит КА, позволяющих вновь встретиться с планетой и направить посадочный аппарат в заданную область на её поверхности. В предлагаемую методику входит построение алгоритма, связывающего локализацию целевой точки на поверхности Венеры с параметрами траектории КА при пролёте её сферы действия, что позволяет осуществить переход на требуемую резонансную орбиту. Автором проведена селекция оптимального резонансного соотношения среди ряда возможных, что необходимо для расширения районов посадки.

Определены возможные области посадки ПА для дат старта в эпоху 2029–2034 гг. (ориентировочное время реализации миссии «Венера-Д»).

Также при реализации миссии «Венера-Д» становится возможным попутно исследовать малые небесные тела. Изучению этого вопроса автор посвящает отдельную, четвёртую главу.

## **Достоверность и новизна полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертации научных результатов следует из использования общепринятых математических моделей небесной механики и динамики полёта космических аппаратов. При моделировании автор использует численный метод Рунге-Кутты 8(9) порядка, что, как правило, гарантирует высокую точность получаемых результатов.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими результатами.

Автор разработал методику построения перелётных траекторий к Венере с использованием гравитационного манёвра для синтеза резонансных гелиоцентрических орбит КА, позволяющих ему вновь встретиться с планетой и достичь заданной точки на её поверхности.

Разработан алгоритм, позволяющий поставить в соответствие выбранное место посадки и синтезируемую резонансную орбиту, обеспечивающую требуемый перелёт.

Разработаны методы определения длительности затмения орбитального модуля Венерой, а также радиовидимости между орбитальным модулем и посадочным аппаратом.

Разработан алгоритм проектирования траектории КА, обеспечивающей попутное исследование малых небесных тел при перелёте к Венере.

К диссертации имеются следующие **замечания**.

1. Название работы «Особенности использования гравитационных манёвров и резонансных орбит ...» вызывает некоторый диссонанс, поскольку в один ряд ставятся совершенно разные объекты (техника баллистического проектирования и тип траекторий). Логичнее было бы название «Особенности использования гравитационных манёвров для построения резонансных орбит с целью расширения возможностей исследования Венеры».
2. В обзоре миссий к Венере в качестве основного результата миссий «Венера-15,16» указаны только полученные «радиолокационные изображения Венеры» (таблица 1.1, с. 29). В действительности, с использованием данных, полученных с КА «Венера-15», «Венера-16», был составлен первый атлас поверхности Венеры.
3. Логика построения приоритетов в диссертации не всегда соблюдается. Так, в качестве одного из посылов для обоснования использования сложной перелётной схемы ставится желательность посадки на особо выбранных местах, которые не достигаются стандартными схемами прямых перелётов. С другой стороны, проводится сравнение эффективностей различных перелётов по тривиальной оценке процента покрытия поверхности Венеры областями достижимости (с. 41, Таблица 1.3), то есть без отслеживания их приоритетности.

4. Анонсируемый в автореферате и диссертации учёт релятивистских эффектов в действительности не представлен. Поиск в тексте диссертации даёт следующий результат. Уравнение движения КА (В.1) содержит ускорения  $\mathbf{a}_{\text{grav}}$ ,  $\mathbf{a}_{\text{LT}}$ , которые учитывают релятивистские эффекты. Что это за ускорения, как они учитывают эффекты ОТО, остаётся загадкой (ссылка на источник, из которого можно подчерпнуть недостающую информацию, отсутствует). В действительности, как правило, при перелётах к Венере эффекты ОТО специалистам не представляются существенными.

Добавим к этому анонсируемый учёт «неравномерного распределения массы внутри планеты». В тексте диссертации его не удалось найти.

5. Отдельно обозначим наличие в тексте неоднократных, к сожалению, труднообъяснимых терминов и фраз типа «максимизации достижимых районов посадки» (с. 12), «в качестве окна старта принимается двухнедельный интервал от оптимальной даты старта» (с. 42, по-видимому, имеется в виду двухнедельный интервал, серединой которого является оптимальная дата старта), «естественный угол поворота» (с. 63, 79, 80, 85, 101, термин, по-видимому, введён автором вместо общепринятого угла поворота вектора асимптотической скорости), «Случай  $|\Phi - \sigma|$ . В этом случае ...» (с. 74, не приведено условие для  $|\Phi - \sigma|$ ), «...посадочный аппарат по петлевой схеме» (с. 125, без пояснения термина «петлевая схема»).

6. Для максимальной перегрузки автор применяет формулу (2.29):

$n_{\text{max}} = \frac{V_{\text{BX}}^2 \sin \theta_{\text{BX}}}{2gHe}$  (с.97). В тексте не объясняется, что такое  $e$ . Указано, что

формула взята из [80] (Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов). Однако такой формулы в [80] нет. Близкая к ней формула (14.11) приведена в упомянутом учебнике на с. 384:

$n_{\text{max}} \cong \frac{\beta V_{\text{BX}}^2 \sin \theta_{\text{BX}}}{2g_0}$ , но всё-таки это другая формула.

7. Фрагмент текста: (с.203–204): «Перепишем уравнение следующим образом:  $\frac{R}{\sin(\beta_{\odot} - \alpha_p)} \geq \frac{P_1}{1 + e_1 \cos \varpi_{\odot}}$ . Следует отметить, что в данном случае

предполагается, что это известная константа, поскольку положение планеты во время расчёта тени фиксировано в наших предыдущих предположениях». В итоге уравнение превращается в неравенство, а неравенство получает наименование «константа».

8. Автор использует два обозначения функции тангенс:  $\tan$  и  $tg$ , хотя в отечественной литературе тангенс обозначается как  $tg$ . На с. 202 и с. 203 автор несколько раз использует функцию  $\arctan$ . Что это – обратный тригонометрический тангенс (русское обозначение  $\arctg$ , английское –  $\arctan$  или  $\text{atan}$ ), или это обратный гиперболический тангенс (русское обозначение  $\text{arth}$ , английское –  $\text{artanh}$ ) – читатель вынужден решить самостоятельно.

9. В диссертации ссылки на рисунки нередко появляются позже самих рисунков. Часть рисунков содержит надписи на английском языке, оставленные без перевода. В рисунках Приложения Б все надписи на английском. Например, на рисунке 1.5 (с. 36) есть надписи на английском языке про отечественный проект «Венера-Д». При этом на осях единица измерений а.е. (должно быть au). Кроме того, на этом рисунке вызывает недоумение обозначение  $\Delta V_{\text{морМ}}$ .

10. с.130. Подпись к рис.3.21:  $e = 0,8339^{\circ}$ . Получается, что эксцентриситет измеряется в градусах.

11. В описании препринтов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [24, 38] не указан номер препринта; ссылка [100] «Papkov, O. Multiple Gravity Assist Interplanetary Trajectories (1st ed.)» приведена неверно (правильно: Labunsky A.V., Papkov O.V., Sukhanov K.G. Multiple Gravity Assist Interplanetary Trajectories».

12. с.206. «Переходы между этими системами координат описаны в работе [27]». Переходы между системами координат в статье «[27] Кондратюк Ю.В.

Тем, кто будет читать, чтобы строить // Пионеры ракетной техники» не описываются.

13. К сожалению, автор нередко пренебрегает запятыми. Из-за этого некоторые предложения становятся бессмысленными. Ограничимся одним примером (С.67): «Эксцентриситет орбиты будем искать в предположении, что произведение корня, содержащего функцию квадрата эксцентриситета орбиты и косинуса наклона, сохраняет величину для любой орбиты из семейства, для которого...». Перед союзом «и» необходима запятая.

14. Неверно указано название журнала в ссылке «64. Izzo D. Revisiting Lambert's problem // Celestial Mechanical Dynamical Astronomy.» Правильно: Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy.

Результаты диссертации могут быть использованы при проектировании миссии «Венера Д». Результаты диссертации достаточно полно представлены в публикациях, докладывались на российских и международных конференциях.

Автореферат в целом соответствует содержанию диссертации.

Учитывая тот факт, что работа носит квалификационный характер и, как отмечено выше, обладает актуальностью тематики и практической значимостью полученных автором научных результатов, считаю, что диссертация заслуживает положительной оценки.

Резюмируя, считаю, что диссертационная работа «Особенности использования гравитационных манёвров и резонансных орбит для расширения возможностей исследования Венеры и малых небесных тел» удовлетворяет требованиям Положения ВАК (в текущей редакции) к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия» и 2.5.16 – «Динамика,

баллистика, управление движением летательных аппаратов», а её автор, Владислав Александрович Зубко, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент

**Тучин Андрей Георгиевич**, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика;

главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д.4, <https://www.keldysh.ru>; тел. +7 (495) 333-80-67; e-mail: [tag@kiam1.rssi.ru](mailto:tag@kiam1.rssi.ru).

“28” июня 2024 г.

А.Г. Тучин

Подпись официального оппонента А.Г. Тучина заверяю.

Учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
кандидат физико-математических наук

“28” июня 2024 г.



А.А. Давыдов