

М. Н. Бурдаев

## О контроле и коррекции внеатмосферного участка траектории спуска с орбиты искусственного спутника планеты

**Аннотация.** В статье изложены результаты применения метода когнитивной графики к приближенному решению задачи расчета параметров внеатмосферного участка траектории спуска в атмосферы планет с орбит их искусственных спутников. Дана графическая форма представления общего решения этой задачи на примере спуска в атмосферу Земли.

**Ключевые слова и фразы:** спуск, внеатмосферный участок траектории, угол входа в атмосферу.

### Введение

Спуск с орбиты является одним из наиболее ответственных маневров космического аппарата [1–10]. Угловая дальность спуска с орбиты, например, у спускаемых аппаратов кораблей «Союз» составляет около  $92^\circ$ , что соответствует более чем десяти тысячам километров по Земле. Преобладающую часть этой дальности занимает внеатмосферный участок траектории спуска.

Как показывает опыт пилотируемых космических полетов, безопасность приземления спускаемого аппарата повышается, а затраты времени и материальных средств на его поиск и эвакуацию с места посадки сокращаются с увеличением точности определения географических координат предполагаемого места приземления спускаемого аппарата. Значительную долю ошибки прогнозирования места посадки спускаемого аппарата составляет ошибка определения координат точки его входа в атмосферу Земли. Одним из возможных способов ее

---

Исследования проводятся в рамках работ по гранту РФФИ № 12-07-00205-а «Разработка новых способов решения задач управления движениями космических аппаратов на всех этапах полетов и оперативного отображения получаемых результатов на основе методов годографов и когнитивной графики».

© М. Н. Бурдаев, 2014

© НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина, 2014

© Программные системы: теория и приложения, 2014

уменьшения является оперативный контроль траектории спуска для уточнения дальности до точки входа в атмосферу и ее коррекции при необходимости. Реализация этого способа возможна при наличии на борту спускаемого аппарата информации о высоте полета, скорости снижения и горизонтальной составляющей скорости полета.

### **Построение диаграммы начальных скоростей баллистического спуска с орбиты**

Траектория спуска с орбиты на Землю состоит из нескольких участков, которые различаются между собой по условиям и характеру движения. Например, у пилотируемых кораблей «Союз» траектория спуска состоит из пяти участков:

- (1) Внеатмосферный участок траектории спуска. Он пролегает от точки включения двигателя, создающего импульс скорости для схода с орбиты, до точки входа в атмосферу. На этом участке траектории спуска аэродинамические силы, действующие на космический аппарат, считаются настолько малыми, что их влиянием на траекторию полета можно пренебрегать. Высоту точки входа в атмосферу Земли обычно принимают близкой к ста километрам.
- (2) Первый атмосферный участок траектории спуска. На этом участке вследствие воздействия на космический аппарат силы аэродинамического сопротивления происходит его торможение от космической скорости до скорости, на которой возможно раскрытие парашюта. Основная часть кинетической и потенциальной энергий орбитального полета спускаемого аппарата преобразуется в тепловую и рассеивается в атмосфере. Величины и распределение динамических и тепловых нагрузок на этом участке траектории зависят от скорости и угла входа космического аппарата в атмосферу. Для пилотируемых кораблей угол входа в атмосферу Земли выбирают в пределах единиц градусов к местному горизонту в точке входа.
- (3) Второй атмосферный участок траектории спуска. На нем вводится в действие парашютная система, которая дополнительно снижает скорость спуска космического аппарата и доставляет его к поверхности Земли.
- (4) Третий атмосферный участок траектории спуска. На этом участке срабатывают ракетные двигатели мягкой посадки, уменьшая

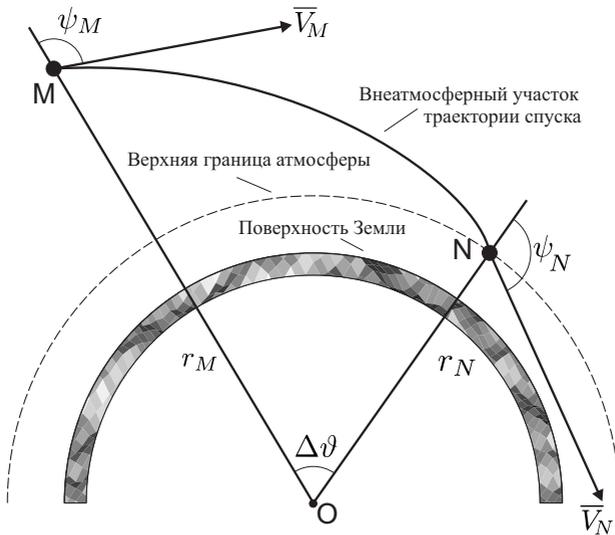


Рис. 1. Параметры внеатмосферного участка траектории спуска спутника с орбиты

скорость приземления до безопасной для спускаемого аппарата и экипажа величины.

- (5) Четвертый атмосферный участок траектории спуска. На нем космический аппарат свободно падает после выключения двигателей мягкой посадки. Длительность полета на первых трех участках измеряется минутами, на четвертом и пятом участках — секундами и долями секунд.

На внеатмосферном участке траектории спуска потери энергии спускаемым аппаратом не учитываются. Условие равенства суммарной энергии спускаемого аппарата в текущей ( $M$ ) и конечной ( $N$ ) точках внеатмосферного участка траектории спуска записывается в виде уравнения

$$V_M^2 - 2\frac{\mu}{r_M} = V_N^2 - 2\frac{\mu}{r_N},$$

с помощью которого можно выявить связь радиусов текущей  $r_M$  и конечной  $r_N$  точек участка и скоростей  $V_M$  и  $V_N$  космического аппарата в этих точках (см. рис. 1).

Связь величины  $V_M$  и угла  $\psi_M$ , характеризующего направление скорости  $V_M$  в текущей точке  $r_M$  внеатмосферного участка траекто-

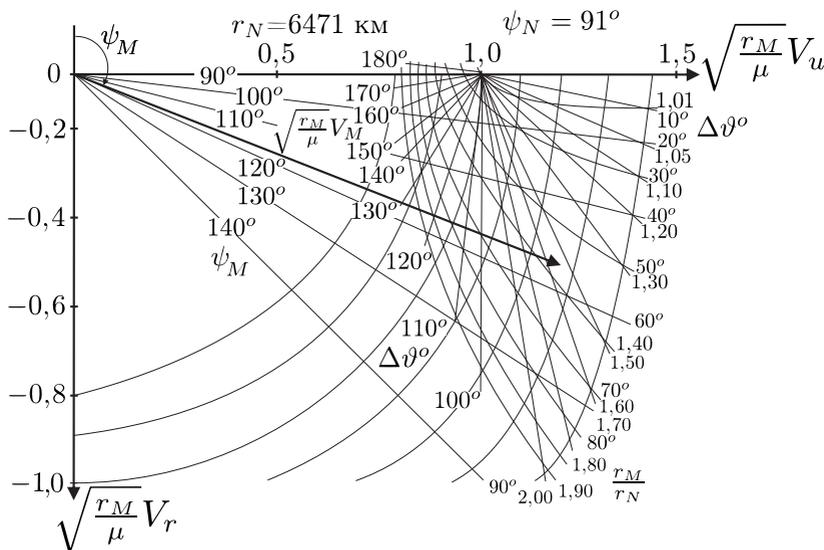


Рис. 2. Диаграмма начальных скоростей баллистического спуска с орбиты

рии спуска с радиусом  $r_N$  точки входа в атмосферу и угловой дальностью  $\Delta\vartheta$  до нее, определена соотношением

$$(1) \quad \sqrt{\frac{r_M}{\mu}} V_M = \sqrt{\frac{1 - \cos \Delta\vartheta}{\left(\frac{r_M}{r_N} - \cos \Delta\vartheta + \sin \Delta\vartheta \operatorname{ctg} \psi_M\right) \sin^2 \psi_M}}.$$

Взаимная зависимость между углами скорости  $\phi_M$  и  $\phi_N$  в граничных точках определена соотношением

$$(2) \quad \operatorname{ctg} \phi_N = -\frac{r_N}{r_M} \operatorname{ctg} \phi_M + \left(\frac{r_N}{r_M} - 1\right) \operatorname{ctg} \frac{\Delta\vartheta}{2},$$

где  $\Delta\vartheta$  — угол между радиусами на границах внеатмосферного участка траектории спуска.

Если заданы параметры входа в атмосферу в виде значений радиуса входа  $r_N$  и угла  $\phi_N$  входа в атмосферу, можно определить величину и направление текущей скорости  $V_M$  спускаемого аппарата для различных радиусов  $r_M$  точки на траектории спуска и угловой дальности от этой точки до точки входа в атмосферу  $\Delta\vartheta$ . Для этого

используются уравнения (1) и (2). Полученная зависимость показана в виде обобщенной диаграммы на рис. 2.

С применением этой диаграммы можно решать следующие задачи:

- (1) зная высоту полета, скорость снижения и горизонтальную составляющую скорости полета, определять фактическую угловую дальность до точки входа в атмосферу;
- (2) зная высоту полета в текущей точке траектории и заданную угловую дальность от нее до точки входа в атмосферу, определять требуемую величину и направление вектора скорости полета;
- (3) зная величины и направления фактического и требуемого обобщенных векторов скорости, определять величину и направление корректирующего вектора импульса для обеспечения заданной угловой дальности до точки входа в атмосферу.

Все перечисленные операции, включая бортовые измерения и расчет команд управления, могут быть автоматизированы. Результаты выполненных расчетов могут выдаваться экипажу в графической и текстовой формах как рекомендации к исполнению.

## **Заключение**

Подход к решению задачи расчета параметров внеатмосферного участка спуска в атмосферы планет, результаты конкретных расчетов для спусков с орбиты спутников в атмосферу Земли и разработанная наглядная графическая форма представления общего решения этой задачи могут быть использованы при проектировании входящих в атмосферы планет космических аппаратов, для оперативного отображения, контроля и коррекции параметров спуска в процессе его реализации и в учебном процессе подготовки космонавтов.

## **Список литературы**

- [1] У. Лох. Динамика и термодинамика спуска в атмосфере планет. М.: Мир, 1966. — 275 с. ↑13
- [2] В. В. Андреевский. Динамика спуска космических аппаратов на Землю. М.: Машиностроение, 1970. — 235 с. ↑13
- [3] Ц. В. Соловьев, Е. В. Тарасов. Прогнозирование межпланетных полетов. М.: Машиностроение, 1973. — 400 с. ↑13
- [4] Д. Е. Охочимский, Ю. Ф. Голубев, Ю. Г. Сихарулидзе. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975. — 400 с. ↑13

- [5] В. Н. Кубасов, А. А. Дашков. Межпланетные полеты. М.: Машиностроение, 1979. — 272 с. ↑13
- [6] Космические аппараты / ред. К. П. Феоктистов. М.: Военное издательство, 1983. — 319 с. ↑13
- [7] Г. Т. Береговой, В. Н. Григоренко, Р. Б. Богдашевский, И. Н. Почкаев. Космическая академия. М.: Машиностроение, 1987. — 152 с. ↑13
- [8] Б. Абрамов, А. Еремин, А. Суворов. *Спуск с орбиты на тренажере* // Авиационорама, 2003. Т. 2, с. 28. ↑13
- [9] Пилотируемая экспедиция на Марс / ред. А. С. Коротеев. М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. — 320 с. ↑13
- [10] *Среднюю высоту орбиты МКС снова подняли на один километр.* — ПОЛИТ.РУ, URL [http://polit.ru/news/2013/02/23/space\\_mks\\_up\\_1/](http://polit.ru/news/2013/02/23/space_mks_up_1/). ↑13

Рекомендовал к публикации

д.т.н. В. М. Хачумов

*Об авторе:*

### Михаил Николаевич Бурдаев



Доктор технических наук, профессор, академик Академии космонавтики, космонавт-испытатель, главный научный сотрудник 57 отдела 5-го Научного управления ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина».

*e-mail:*

[burdaevmn@mail.ru](mailto:burdaevmn@mail.ru)

*Образец ссылки на эту публикацию:*

М. Н. Бурдаев. *О контроле и коррекции внеатмосферного участка траектории спуска с орбиты искусственного спутника планеты* // Программные системы: теория и приложения: электрон. научн. журн. 2014. Т. 5, № 2(20), с. 13–18.

**URL:** [http://psta.psiras.ru/read/psta2014\\_2\\_13-18.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2014_2_13-18.pdf)

Mikhail Burdayev. *About the control and correction of exoatmospheric orbit-descent trajectory area for planet artificial satellite.*

ABSTRACT. The article shows the results of applying cognitive graphics method to calculating problem approximate solution of exoatmospheric orbit-descent trajectory area parameters for planets artificial satellites. Presented graphically form for this problem general solution on the example of descent into Earth's atmosphere. (in Russian).

*Key Words and Phrases:* descent, exoatmospheric trajectory area, angle of entry into an atmosphere.