

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПУСКАЕМОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ МАРСА

Любимов В.В., Лазовский И.В.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара*

Ключевые слова: космический аппарат, атмосфера Марса, аэродинамические возмущения, спуск в атмосфере, аэродинамические коэффициенты, математическое моделирование.

Аннотация. Рассматривается математическая модель, описывающая спускаемое движение космического аппарата в атмосфере Марса с учетом аэродинамических возмущений, которые вызваны ветровыми воздействиями. Получены новые значения аэродинамических коэффициентов. Построены сравнительные графики изменения скорости, высоты и угла входа с учётом различных сценариев атмосферного воздействия.

SIMULATION OF THE DESCENT MOTION OF A SPACECRAFT TAKING INTO ACCOUNT AERODYNAMIC DISTURBANCES IN THE MARTIAN ATMOSPHERE

Lyubimov V.V., Lazovsky I.V.

Samara National Research University, Samara

Keywords: spacecraft, Martian atmosphere, aerodynamic disturbances, atmospheric descent, aerodynamic coefficients, mathematical modeling.

Abstract. A mathematical model describing the descent motion of a spacecraft in the Martian atmosphere is examined, taking into account aerodynamic disturbances caused by wind effects. New values for aerodynamic coefficients are obtained. Comparative graphs of changes in speed, altitude, and entry angle are constructed, taking into account various atmospheric impact scenarios.

I. Введение

В настоящее время имеется большое количество публикаций современных специалистов по тематикам моделирования и исследования спускаемого движения космических аппаратов в атмосферах планет земной группы [1-3], и т.д. Аэродинамическое воздействие на конструкцию космических аппаратов описывается в работе [4]. Моделирование атмосферных процессов в атмосферах планет представлено в следующих работах [5-7].

Целью данной работы является исследование влияния ветровых возмущений в задаче о спускаемом движении космического аппарата в атмосфере Марса.

II. Математическая модель движения космического аппарата

Нелинейная система уравнений неуправляемого движения центра масс КА при спуске в атмосфере Марса записывается в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = -g \sin \theta - \frac{C_x q S}{m},$$

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \theta,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{V} + \frac{C_y q S \cos \gamma}{mV},$$

где t – время спуска КА, V – скорость центра масс КА, H – высота полёта КА, θ – угол входа КА в атмосферу Марса, m – масса КА, g – ускорение свободного падения на рассматриваемой высоте H , q – скоростной напор, $q = 0,5\rho V^2$, ρ – плотность атмосферы Марса на заданной высоте H , $\rho = \rho_0 e^{-kH}$, ρ_0 – плотность атмосферы Марса на высоте $H = 0$, k – известный коэффициент плотности атмосферы Марса, $C_x(\alpha)$, $C_y(\alpha)$ – положительные аэродинамические коэффициенты аэродинамических сил, заданных в связанной системе координат, α – известный пространственный угол атаки, γ – известный угол крена.

Аэродинамические коэффициенты $C_x(\alpha)$, $C_y(\alpha)$ определяются экспериментальными зависимостями от пространственного угла атаки α (табл. 1).

Табл. 1. Аэродинамические коэффициенты C_x, C_y без учёта ветра

α , град	0	5	10	15	20
C_x	1,55	1,52	1,50	1,43	1,35
C_y	0	0,1	0,3	0,4	0,5

Для учёта ветровых возмущений проведён расчёт данных аэродинамических коэффициентов. Максимальная скорость ветра в атмосфере Марса равна 0,12 км/с. С учетом того, что скорость космического аппарата при спуске на Марс равна 3,4 км/с, то при попутном ветре значения коэффициентов C_x, C_y уменьшены на 3,5%, а при встречном – увеличены на 3,5%. Полученные результаты показаны в таблице 2 и таблице 3.

Табл. 2. Аэродинамические коэффициенты C_x, C_y при попутном ветре

α , град	0	5	10	15	20
C_x	1,49	1,47	1,45	1,38	1,3
C_y	0	0,1	0,29	0,39	0,48

Табл. 3. Аэродинамические коэффициенты C_x, C_y при встречном ветре

α , град	0	5	10	15	20
C_x	1,6	1,57	1,55	1,48	1,4
C_y	0	0,1	0,31	0,41	0,52

III. Численные результаты

На рисунках 1-2 представлены графики изменения скорости спуска при попутном V_1 (м/с) и встречном ветре V_2 (м/с) для углов атаки 0 и 20 (град) в зависимости от времени спуска t (с).

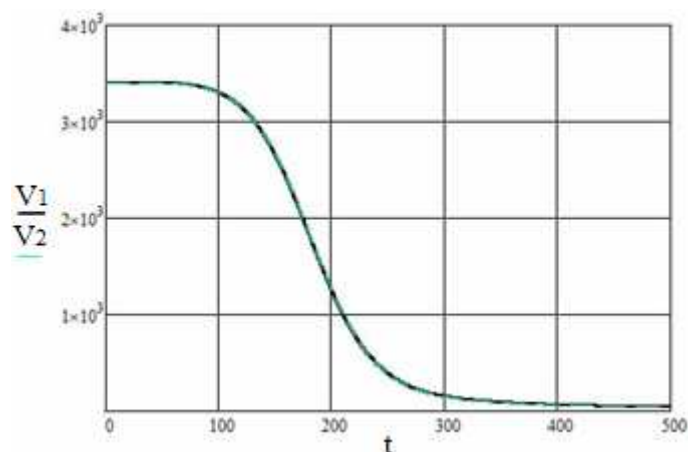


Рис. 1. Изменение скорости КА при попутном ветре

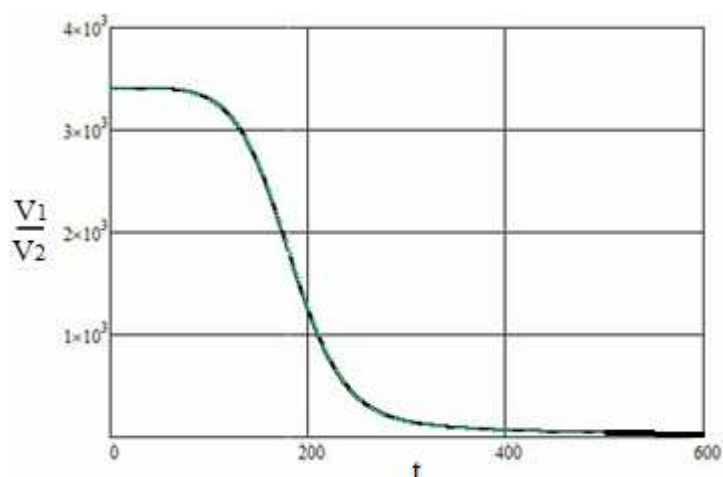


Рис. 2. Изменение скорости КА при встречном ветре

На рисунках 3-4 представлены зависимости угла входа в атмосферу Марса от времени для попутного θ_1 (рад) и встречного ветра θ_2 (рад) для углов атаки 0 и 20 (град) от времени спуска t (с).

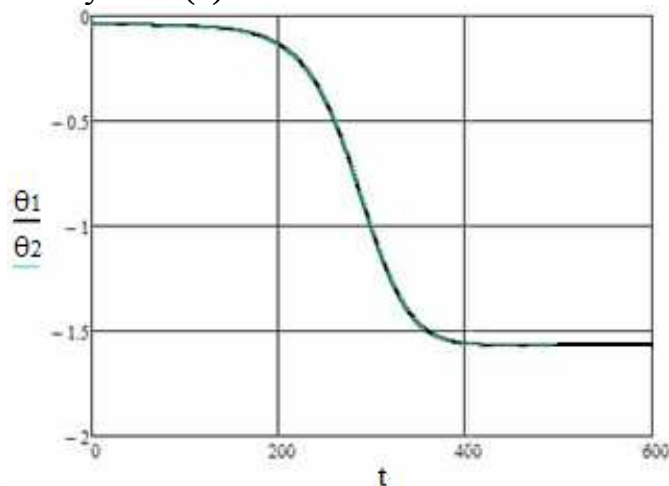


Рис. 3. Зависимость угла входа КА при попутном ветре

На рисунках 5-6 показана динамика изменения высоты полёта для попутного H_1 (км) и встречного ветра H_2 (км) для углов атаки 0 и 20 (град) в зависимости от времени спуска t (с).

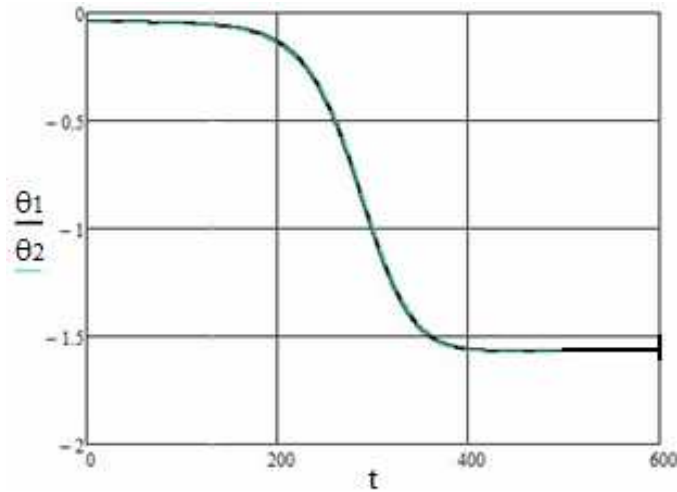


Рис. 4. Зависимость угла входа КА при встречном ветре

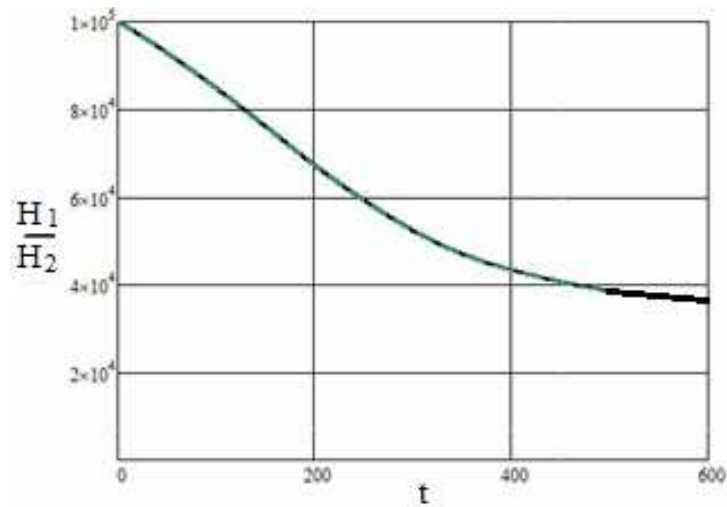


Рис. 5. Динамика изменения высоты КА полета при попутном ветре

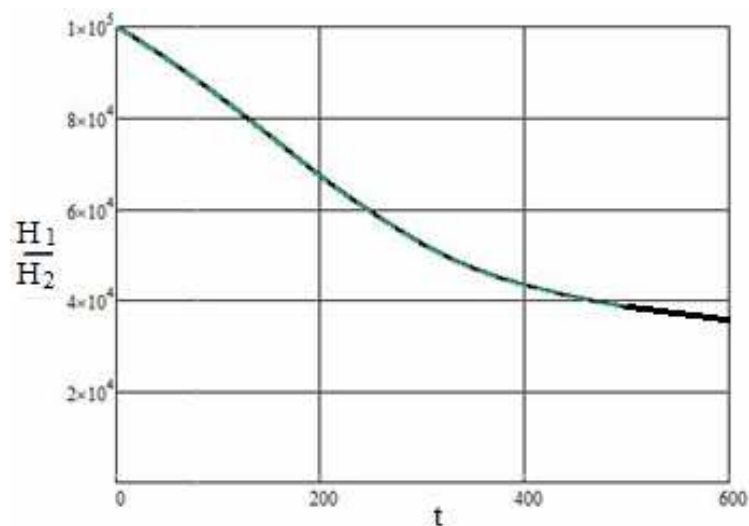


Рис. 6. Динамика изменения высоты КА полета при встречном ветре

Заключение

В представленной работе содержатся результаты оценки степени влияния ветровых возмущений на траекторные параметры спуска космического аппарата в атмосфере Марса. Анализ полученных результатов показывает, что изменение аэродинамических характеристик, соответствующих максимальной скорости

марсианского ветра, не являются критическим фактором при спуске КА в атмосфере. Однако, учёт ветровых возмущений может быть целесообразен при проектировании высокоточных систем посадки, где незначительные отклонения траекторных параметров могут иметь значение.

Список литературы

1. Ярошевский В.А. Вход в атмосферу космических летательных аппаратов. – М.: Физматлит, 1988. – 336 с.
2. Любимов В.В. Внешняя устойчивость резонансов в динамике полета космических аппаратов с малой асимметрией. – Самара: СНЦ РАН, 2013. – 276 с.
3. Абрамов И.П. Динамика спуска космических аппаратов на планеты с атмосферой. – М.: Машиностроение, 2018. – 456 с.
4. Титов В.Б. Аэродинамика спускаемых аппаратов. – М.: Машиностроение, 2019. – 384 с.
5. Жуков В.Я., Петров К.Г. Моделирование атмосферных процессов Марса. – СПб.: Наука, 2019. – 320 с.
6. Козлов Д.И., Орлов В.М. Статистическая динамика космических аппаратов. – М.: Физматлит, 2017. – 488 с.
7. Федоров К.М. Стохастические процессы в задачах космической динамики. – Новосибирск: Наука, 2018. – 276 с.

Сведения об авторах:

Любимов Владислав Васильевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры динамики полета и систем управления;

Лазовский Иван Васильевич – аспирант.