

РАСЧЁТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАНЁВРА ТОРМОЖЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ С УЧЁТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Введение. В настоящее время изучение Венеры является актуальным направлением исследования космического пространства. Так как наблюдение за поверхностью планеты с помощью наземных средств практически невозможно в связи с плотной атмосферой, Венеру исследуют с помощью космических аппаратов (КА) и автоматических межпланетных станций (АМС) [1]. Расход рабочего тела КА при осуществлении межпланетного перелёта КА к Венере может быть снижен за счёт проведения аэродинамического манёвра торможения для формирования заданной круговой орбиты у Венеры. Однако при торможении в верхних слоях атмосферы на КА действуют большие перегрузки, и температура поверхности КА может существенно увеличиваться. Следовательно, при расчёте подобных манёвров необходимо учитывать ограничения на температуру поверхности КА и максимальные перегрузки. В данной работе проводится расчёт аэродинамического манёвра торможения в сфере действия Венеры с учётом максимальных перегрузок и аэродинамического нагрева поверхности КА.

Математическая модель движения КА в атмосфере Венеры. Движение КА в атмосфере Венеры в траекторной системе координат описывается следующими уравнениями:

$$\dot{V} = -g_0 \frac{\rho V^2}{2P_x} - g \sin \theta, \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = K_{\text{ЭФ}} g_0 \frac{\rho V}{2P_x} + \left(\frac{V}{R_{\text{ПЛ}}} - \frac{g}{V} \right) \cos \theta, \quad (2)$$

$$\dot{h} = V \sin \theta, \quad (3)$$

$$\dot{L} = V \cos \theta. \quad (4)$$

Здесь V – модуль скорости СА; θ – угол наклона траектории; h – высота КА над поверхностью планеты; L – дальность полёта; g – ускорение свободного падения на поверхности планеты; $\rho = \rho_0 e^{-\beta h}$ – плотность атмосферы на высоте h ; ρ_0 – плотность атмосферы на поверхности планеты; β – коэффициент; P_x – баллистический коэффициент КА; $g = \frac{g_x R_{\text{ПЛ}}^2}{(R_{\text{ПЛ}} + p)}$ – ускорение свободного падения на высоте h ; $R_{\text{ПЛ}}$ – радиус планеты; $K_{\text{ЭФ}}$ – эффективное аэродинамическое качество КА [2].

Скорость входа космического аппарата в атмосферу Венеры определяется из гелиоцентрического участка перелёта [3]. В данной работе определяется угол входа в атмосферу Венеры, обеспечивающий условий осуществления аэродинамического торможения (выход из атмосферы, после осуществления манёвра, наибольшие по-

тери скорости КА, выполнение ограничений по температуре и перегрузкам). Результаты моделирования процесса аэродинамического торможения, представленные на рис. 1-3 показывают, что наибольшее снижение скорости КА достигается при угле входа 8,4 град. При этом выполняется ограничение на безопасную высоту полёта.

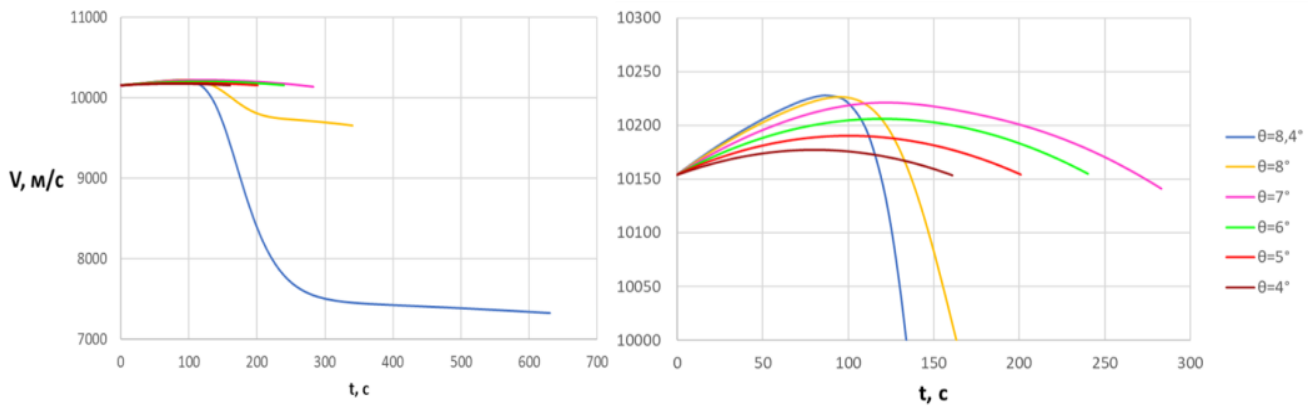


Рис. 1. Изменение скорости полёта для различных углов входа в атмосферу Венеры

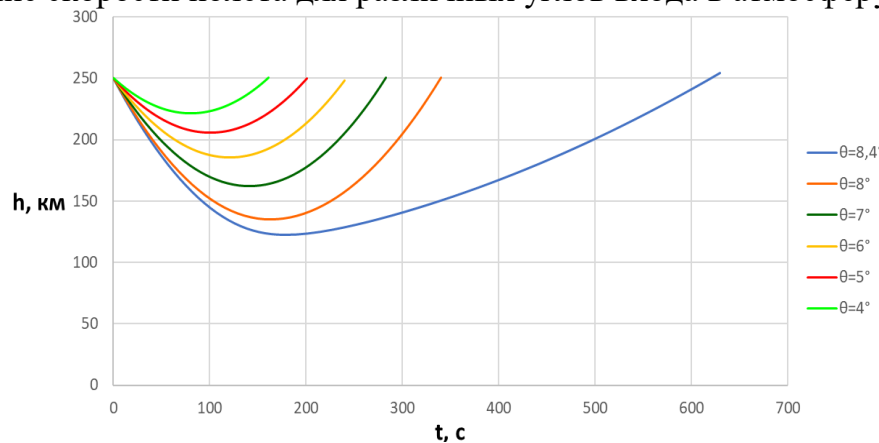


Рис. 2. Изменение высоты полёта для различных углов входа в атмосферу Венеры

При моделировании движения КА в атмосфере Венеры необходимо учитывать аэродинамический нагрев поверхности КА, т.к. ограничение на температуру поверхности является одним из важнейших требований при проектировании КА. Температура КА рассчитывается по следующим формулам:

$$T = \sqrt[4]{\frac{q_{\text{конв}} + q_{\text{рад}}}{\sigma \varepsilon}}, \quad (5)$$

$$q_{\text{конв}} = \frac{A_k}{\sqrt{R_k}} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n \left(\frac{V}{V_1}\right)^m, \quad q_{\text{рад}} = A_p \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2 \left(\frac{V}{10^4}\right)^{14} R_k, \quad (6)$$

где $q_{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток, $q_{\text{рад}}$ – радиационный тепловой поток,

$\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана, ε – коэффициент, характеризующий излучательную способность материала теплозащитного покрытия (принимался равным 0,85), R_k – радиус кривизны поверхности КА в соответствующей критической точке, V_1 – значение первой космической скорости на поверхности планеты, A_k , A_p , n , m – некоторые постоянные, зависящие от характеристик теплового воздействия в пограничном слое и от кинетических свойств газа [4].

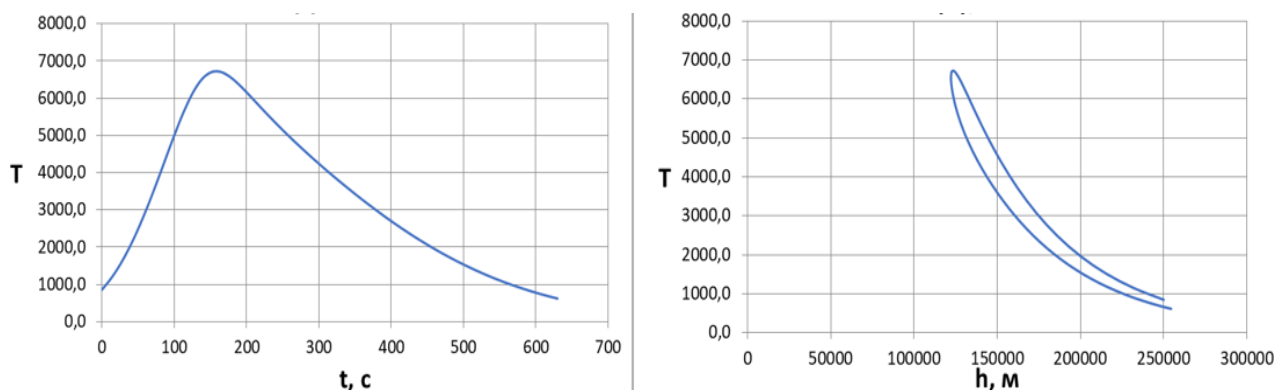


Рис. 3. Температура поверхности КА для угла входа в атмосферу 8,4 град в зависимости от времени и высоты полёта

На рис. 4 показаны результаты расчёта перегрузок в зависимости от угла входа в атмосферу, красной горизонтальной линией показано значение технического ограничения на перегрузку.

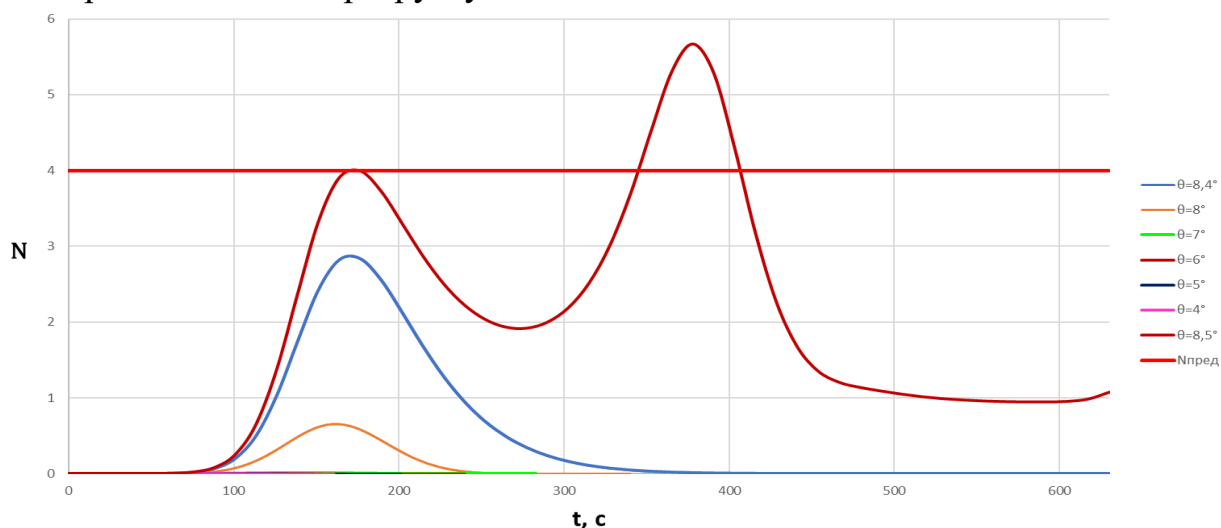


Рис. 4. Зависимость перегрузок от угла входа в атмосферу

Данные расчётов показывают, что выбранная траектория аэродинамического торможения с углом входа $\theta = 8,4$ град обеспечивает максимальное снижение скорости КА при выполнении ограничений на безопасную температуру поверхности и максимальную перегрузку.

Библиографический список

1. Засова Л. В. и др. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км / Космические исследования. – 2006. – Т. 44. – №. 4. – С. 381-400.
2. Белоконов, В. М. Траектории полётов к Луне и межпланетные траектории: Конспект лекций / Куйбыш. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. - 31 с.
3. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1982. – 352 с.
4. Орлов Д. А. Методика многокритериальной оптимизации управления движением космического аппарата при спуске в атмосфере планеты: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.09. РУДН. Москва, 2021. – 128 с.