

Балакин В.Л., Крикунов М.М., Кормакова И.В.

**ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСАТМОСФЕРНЫМ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ АПРИОРНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ОБ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

1. В последние годы в Самарском национальном исследовательском университете проводятся исследования командного управления летательными аппаратами на трансатмосферном участке движения. Это связано, в частности, с возможным использованием первой ступени аэрокосмической системы (АэРС) для запуска космических аппаратов на околоземную орбиту [1, 2].

В условиях действия возмущений атмосферы (отклонений плотности от стандартных значений) проводятся коррекции управления (коэффициента подъёмной силы  $C_{ya}$ ) с целью уменьшения отклонений конечных параметров движения от заданных значений.

Результаты исследований [3 – 6] показали, что при значительном уровне естественных и неустраняемых атмосферных возмущений на конечном участке траектории набора высоты первой ступени командное управление приближается к ограничениям. Причиной этого является снижение управляемости из-за падения на больших высотах плотности атмосферы и, следовательно, скоростного напора, определяющего аэродинамические силы, используемые для управления траекторией набора высоты.

В данной работе рассматривается влияние априорной информации о плотности атмосферы на результаты формирования командного управления.

2. Будем описывать движение ЛА с выключенной двигательной установкой стандартной системой дифференциальных уравнений в траекторной системе координат с заданными начальными и конечными условиями движения и номинальной программой управления коэффициентом подъёмной силы согласно [3].

В расчётах используется универсальная модель отклонений плотности атмосферы [7]:

$$\rho(h) = \rho_{cm}(h) + \xi \cdot \sigma_{\rho}(h), \quad (1)$$

где  $\rho_{cm}(h)$  вычисляется в соответствии со стандартной атмосферой,  $h$  – высота,  $\xi$  – нормально распределённая случайная величина с нулевым математическим ожиданием и

дисперсией, равной единице. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\rho(h)$  определяется соотношением:

$$\sigma_\rho(h) = \sigma_{\rho_0} \exp(-0,15 \cdot 10^{-3} \cdot h), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\rho_0} = 0,05 \text{ кг} / \text{м}^3$  – средняя величина, соответствующая условиям на нулевой высоте.

Проведено моделирование возмущённого движения ЛА с командным управлением для трёх моделей атмосферы при прогнозировании конечных условий движения в алгоритме терминального управления коэффициентом подъёмной силы, предложенного в [3].

Первая модель соответствует стандартной плотности атмосферы  $\rho_{cm}(h)$ , вторая модель – реальной плотности атмосферы согласно (1), третья модель – плотности атмосферы, отличающейся от реальной на 10%. Моделирование проводилось для предельно «плотной» ( $\xi = 5,5$ ) и для предельно «разреженной» ( $\xi = -5,5$ ) атмосферы.

3. Результаты моделирования показали следующее.

В предельном случае отсутствия какой-либо информации о реальной атмосфере при прогнозировании конечных условий движения задача терминального управления решается в течение всего времени набора высоты. На конечном участке набора высоты командное управление приближается к наложенным на него ограничениям (при  $\xi = -5,5$  конечное значение  $C_{ya} = 0,62$  при ограничении  $C_{ya} = 0,8$ ) или даже выходит на него (при  $\xi = 5,5$  конечное значение  $C_{ya} = -0,4$ ), что соответствует ранее полученным результатам [3].

Во втором предельном («идеальном») случае наличия достоверной информации о реальной атмосфере при прогнозировании конечных условий движения задача терминального управления решается на начальном участке набора высоты. Полученное командное управление находится сравнительно далеко от имеющихся ограничений: при  $\xi = -5,5$  конечное значение  $C_{ya} = 0,42$ ; при  $\xi = 5,5$  конечное значение  $C_{ya} = -0,32$ .

В третьем («промежуточном») случае наличия информации об атмосфере, несколько отличающейся от реальной при прогнозировании конечных условий движения, задача терминального управления решается в течение всего времени набора высоты. Тем не менее отличие плотности атмосферы на 10% от реальной можно считать приемлемым при формировании командного управления, так как оно не выходит на ограничения.

Таким образом, априорная информация об атмосферных возмущениях

существенно, а в некоторых случаях и принципиально, влияет на результаты управления трансатмосферным летательным аппаратом.

### **Библиографический список**

1. Young D.A., Olds J.R. Responsive Access Small Cargo Affordable Launch (RASCAL) Independent Performance Evaluation // 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference (May 2005, Capua, Italy). 23 p. <http://hdl.handle.net/1853/8372>. DOI:10.2514/6.2005-3241

2. Urschel P.H., Cox T.H. Launch Condition Deviations of Reusable Launch Vehicle Simulations in Exo-Atmospheric Zoom Climbs // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit (August 2003, Austin, United States). DOI: 10.2514/6.2003-5544

3. Балакин В.Л., Ковалёв А.В. Терминальное управление субгиперзвуковой первой ступенью аэрокосмической системы // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016.–Т.15.–№ 2.–С. 9-21. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-9-21.

4. Балакин В.Л., Ковалёв А.В., Крикунов М.М. Оценка эффективности терминального управления трансатмосферной первой ступенью аэрокосмической системы в условиях атмосферных и аэродинамических возмущений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15.–№ 3.–С. 9-16. DOI: 10.18287/2412-7533-2016-15-3-9-16.

5. Балакин В.Л., Лазарев Ю.Н., Баяндина Т.А., Ковалёв А.В., Крикунов М.М. Терминальное управление трансатмосферным летательным аппаратом при аэродинамических возмущениях // Сборник трудов XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Часть I. Самара, 15-17 июня 2016 г. – Самара. Изд-во СамНЦ РАН.–2017.–С. 7-9.

6. Балакин В.Л., Лазарев Ю.Н., Баяндина Т.А., Комлева Е.М., Крикунов М.М. Командное управление трансатмосферным летательным аппаратом при атмосферных возмущениях // Сборник трудов XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Часть I. Самара, 15-17 июня 2016 г. – Самара. Изд-во СамНЦ РАН.–2017.–С. 10-13.

7. Школьный Е.П., Майборода А. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. Л.: Гидрометеиздат, 1973.–308 с.