

## КОМАНДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСАТМОСФЕРНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ПРИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Одним из вариантов первой ступени аэрокосмической системы (АэрКС) для запуска космических аппаратов на околоземную орбиту рассматривается субгиперзвуковой летательный аппарат (ЛА), развивающий на активном участке движения с работающей двигательной установкой (ДУ) скорость, несколько меньшую гиперзвуковой (число Маха равно 4) [1, 2]. Отличительной особенностью данного ЛА является пассивный (с выключенной ДУ) трансатмосферный режим полёта до высоты 62,8 км [1].

Будем рассматривать пассивное движение ЛА. Начальные и конечные условия движения заданы, и известна номинальная программа управления углом атаки (коэффициентом аэродинамической подъёмной силы), полученная для условий невозмущённого движения. При наличии возмущений атмосферы (отклонений плотности от стандартных значений) необходимо проводить коррекции угла атаки (коэффициента подъёмной силы) с целью уменьшения отклонений конечных условий движения от заданных значений.

В работе [3] рассмотрен алгоритм терминального управления коэффициентом подъёмной силы, основанный на прогнозировании конечных условий движения и оценена его эффективность по компенсации действия атмосферных возмущений.

Целью данной работы является разработка, исследование работоспособности и оценка эффективности алгоритма управления, основанного на использовании номинальной траектории и не требующего проведения прогноза конечных условий движения.

Пассивное движение ЛА с выключенной двигательной установкой описывается 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 [4]:

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

где плотность атмосферы  $\rho(h)$  представляется как нормальная случайная функция высоты  $h$ , математическое ожидание  $\rho_{cm}(h)$  вычисляется в соответствии со стандартной атмосферой, величина  $\xi$  – нормально распределённая случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\rho(h)$  определяется соотношением:

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

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

Для указанной модели возмущений (1), (2) проведено моделирование движения ЛА с номинальной программой управления коэффициентом подъёмной силы. В таблицах 1, 2 приведены конечные отклонения скорости и высоты от заданных значений.

Таблица 1 – Конечные отклонения скорости и высоты при  $\xi > 0$

$\xi$	1	2	3	4	5,5
$\Delta V, \text{ м/с}$	-6,3	-11,7	-21,0	-30,3	-39,1
$\Delta H, \text{ м/с}$	175,7	347,2	751,1	1146,3	1614,5

Таблица 2 – Значения отклонений скорости и высоты при  $\xi < 0$

$\xi$	-1	-2	-3	-4	-5,5
$\Delta V, \text{ м/с}$	6,0	18,7	29,5	33,8	46,0
$\Delta H, \text{ м/с}$	-179,9	-838,7	-1021,3	-1454,2	-1988,7

Для «плотной» атмосферы ( $\xi > 0$ ) ЛА имеет конечную скорость меньше заданной, т.е. тормозится сильнее (табл. 1). Для «разреженной» атмосферы ( $\xi < 0$ ) ЛА имеет конечную скорость больше заданной, т.е. тормозится слабее.

Принят следующий алгоритм формирования командного значения коэффициента подъёмной силы для уменьшения отклонений скорости.

Через равные промежутки времени (с шагом  $\Delta t = 5 \text{ с}$ ) определяются командные приращения коэффициента подъёмной силы:

$$C_{ya} = \frac{\Delta V}{\frac{\partial V}{\partial C_{ya}}}$$

Здесь  $\Delta V$  – отклонения скорости от значений, соответствующих номинальной траектории;  $\frac{\partial V}{\partial C_{ya}}$  – частные производные скорости по коэффициенту подъёмной силы, которые численно определены для номинальной траектории в заданные моменты времени (таблица 3).

Таблица 3 – Значения производной  $\frac{\partial V}{\partial C_{ya}}$

t, с	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\frac{\partial V}{\partial C_{ya}}, \frac{м}{с}$	-77	-73,1	-69,8	-66,4	-62,9	-59,1	-55	-50,4	-45,5	-39,9

Как следует из таблицы 3, эффективность управления, определяемая абсолютной величиной производной, к концу рассматриваемого участка движения уменьшается в два раза.

Проведено моделирование возмущённого движения ЛА при наборе высоты с командным управлением (3).

В таблицах 4 и 5 приведены командные значения коэффициента подъёмной силы, а в таблицах 6 и 7 – конечные отклонения скорости при сформированном командном управлении для "плотной" ( $\xi > 0$ ) и "разреженной" ( $\xi < 0$ ) атмосферы.

Таблица 4 – Значения коэффициента подъёмной силы при  $\xi > 0$

$\xi$	t, с	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	$C_{ya}$	-0,035	-0,040	-0,046	-0,053	-0,061	-0,070	-0,081	-0,095	-0,113	-0,137
2	$C_{ya}$	-0,069	-0,080	-0,092	-0,105	-0,121	-0,139	-0,161	-0,189	-0,225	-0,273
3	$C_{ya}$	-0,104	-0,120	-0,138	-0,157	-0,180	-0,207	-0,240	-0,282	-0,336	-0,409
4	$C_{ya}$	-0,138	-0,160	-0,183	-0,209	-0,239	-0,275	-0,319	-0,375	-0,446	-0,543
5,5	$C_{ya}$	-0,189	-0,218	-0,250	-0,286	-0,327	-0,376	-0,437	-0,513	-0,609	-0,743

Таблица 5 – Значения коэффициента подъёмной силы при  $\xi < 0$

$\xi$	t, с	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
-1	$C_{ya}$	0,035	0,041	0,047	0,053	0,061	0,070	0,081	0,095	0,113	0,138
-2	$C_{ya}$	0,071	0,082	0,094	0,107	0,122	0,141	0,163	0,192	0,228	0,277
-3	$C_{ya}$	0,106	0,123	0,141	0,161	0,184	0,213	0,246	0,289	0,343	0,418
-4	$C_{ya}$	0,142	0,165	0,189	0,216	0,247	0,284	0,330	0,387	0,459	0,559
-5,5	$C_{ya}$	0,196	0,228	0,261	0,298	0,342	0,394	0,456	0,535	0,635	0,773

Таблица 6 – Конечные отклонения скорости при  $\xi > 0$

$\xi$	1	2	3	4	5,5
$\Delta V_{\kappa}^y, м/с$	-5,6	-8,2	-10,7	-11,5	-13,2

Таблица 7 – Конечные отклонения скорости при  $\xi < 0$

$\xi$	-1	-2	-3	-4	-5,5
$\Delta V_{\kappa}^y, м/с$	3,9	-0,8	2,2	5,2	6,6

По результатам проведённого моделирования можно сделать следующие выводы.

Разработанный алгоритм формирования командного коэффициента подъёмной силы работоспособен, поскольку уменьшаются отклонения по скорости, как для «плотной» (таблицы 1 и 6), так и для «разреженной» (таблицы 2 и 7) атмосферы.

Для «плотной» атмосферы формируются отрицательные командные значения коэффициента подъёмной силы. Это соответствует физическому смыслу, поскольку при номинальной программе управления имеется недостаток скорости из-за большой конечной высоты. Для «разреженной» атмосферы формируются положительные командные значения коэффициента подъёмной силы. Это соответствует физическому смыслу, поскольку при номинальной программе управления имеется избыток скорости из-за малой конечной высоты. Из-за ухудшения управляемости на конечном участке движения в случае «плотной» атмосферы при  $\xi=4; 5,5$  (таблица 4) полученные командные значения коэффициента подъёмной силы ( $C_{ya} < -0,4$ ) соответствуют отрицательным углам атаки, превышающим (по модулю) допустимые значения.

Для решаемой задачи подтвердился известный недостаток алгоритма, использующего номинальную траекторию, а именно, снижение его эффективности при увеличении уровня действующих возмущений.

#### **Библиографический список**

1. 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: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-68-79.

2. 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

3. 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

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