

## Разработка математической модели движения связки: парашютная система – возвращаемый аппарат транспортного пилотируемого корабля нового поколения

А.С. Волков<sup>1,2</sup>, И.С. Ильющенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>ОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва

На сегодняшний день одним из самых актуальных направлений в области спуска космических аппаратов является идея многоразового использования. В частности, крайне важным при возвращении из космоса являются экипаж и целевая аппаратура, в то время как транспорт довольно долго считался естественной и неизбежной потерей. К счастью, развитие технологий спуска позволяет нам уже сейчас озаботиться возможностью сохранения и возвращаемого аппарата (ВА) ПТК НП, разработки РКК «Энергия». Финальным этапом его спуска является мягкая посадка, обеспечивающая сохранность корпуса (тепловой экран отстреливается до приземления). Перед авторами же была поставлена задача математического моделирования процесса спуска на парашютной системе (ПС) на участке от ввода ПС до посадки. Этот этап крайне важен для мягкой посадки, поскольку мы должны быть уверены, что у самой Земли ВА будет ориентирован соответствующим образом. Ключевой вклад в ориентацию будет исходить именно от ПС, поэтому мы и сосредоточились на этой задаче.

Поскольку парашют и его поведение не являются областью квалификации авторов, а также по совету специалистов, в данной работе для 1-го приближения была использована относительно простая модель парашюта. Парашютная система, используемая при спуске ВА, зачастую состоит из нескольких куполов, поэтому авторским составом было принято решение моделировать не оригинальную композицию, а её функциональную замену – эквивалентный парашют (ЭП). За основу взято абсолютно твёрдое тонкостенное тело, состоящее из полусферы (купол парашюта) и конической поверхности (стропы). ЭП, как и оригинальная ПС, должен обеспечивать равномерный спуск ВА со скоростью 7 м/с в приземных слоях атмосферы с заданным коэффициентом аэродинамического сопротивления. Исходя из этого были вычислены параметры ЭП: габариты, поверхностные плотности строп и купола, момент инерции.

Используя полученные параметры стало возможным вывести стандартную систему уравнений, описывающую движение связки. Ключевым является уравнение связи, которое описывает положение точки прицепа (вертлюга) ЭП с ВА:

$$\vec{r} + \vec{d} = \vec{R} + \vec{c}$$

где  $\vec{r}$  и  $\vec{R}$  – радиус-векторы центров масс ЭП и ВА соответственно, которые также являются центрами соответствующих связанных СК,  $\vec{d}$  и  $\vec{c}$  – векторы, проведённые из центров масс ЭП и ВА в точку прицепа (все векторы в ИСК). С помощью него удалось разрешить систему уравнений таким образом, что к ней можно применить метод Рунге-Кутты 4 порядка, который и был выбран для интегрирования модели.

В ходе статистического моделирования было проведено 10000 испытаний. Для каждого испытания было сгенерировано случайное начальное условие на основе следующих параметров:

1. Атмосфера стандартная невозмущённая.
2. Ветер горизонтальный, направление носит случайный характер, скорость случайная из отрезка  $[0, 15]$  м/с.
3. Начальная скорость снижения (вертикальная) –  $75 \pm 15$  м/с.
4. Начальная угловая скорость ВА – случайное значение из отрезка  $[0, 360]$  град/с. Направление так же случайно.

В ходе каждого испытания проводилось вычисление максимальной поперечной (не вокруг оси ВА) угловой скорости на некотором промежутке времени (промежутки указаны в легенде графика). Затем было найдено распределение по максимальным поперечным угловым скоростям  $\omega_{max}$ , изображённое на графике (рис.1)

Изучив график, авторский состав пришёл к выводу, что через 3 секунды после наполнения купола ЭП, наиболее вероятными становятся относительно малые значения максимальной

поперечной угловой скорости. На данный момент при спуске на основном парашюте ВА ПТК НП, постоянно включены двигатели СИОС для того, чтобы демпфировать высокую угловую скорость. За 3 секунды они расходуют 11.25 кг топлива. Но в нашей модели, за эти 3 секунды парашют без двигателей самостоятельно демпфирует угловую скорость, независимо от её направления и величины до относительно малых значений. Более того, известно, что на малых временах после ввода основного парашюта момент, создаваемый двигателями СИОС значительно меньше моментов, действующих на ВА со стороны парашюта (за счёт высокой аэродинамической силы).

Исходя из этого, авторский состав пришёл к выводу, что в первые 3 секунды после ввода основного парашюта поддерживать работу двигателей СИОС не эффективно.

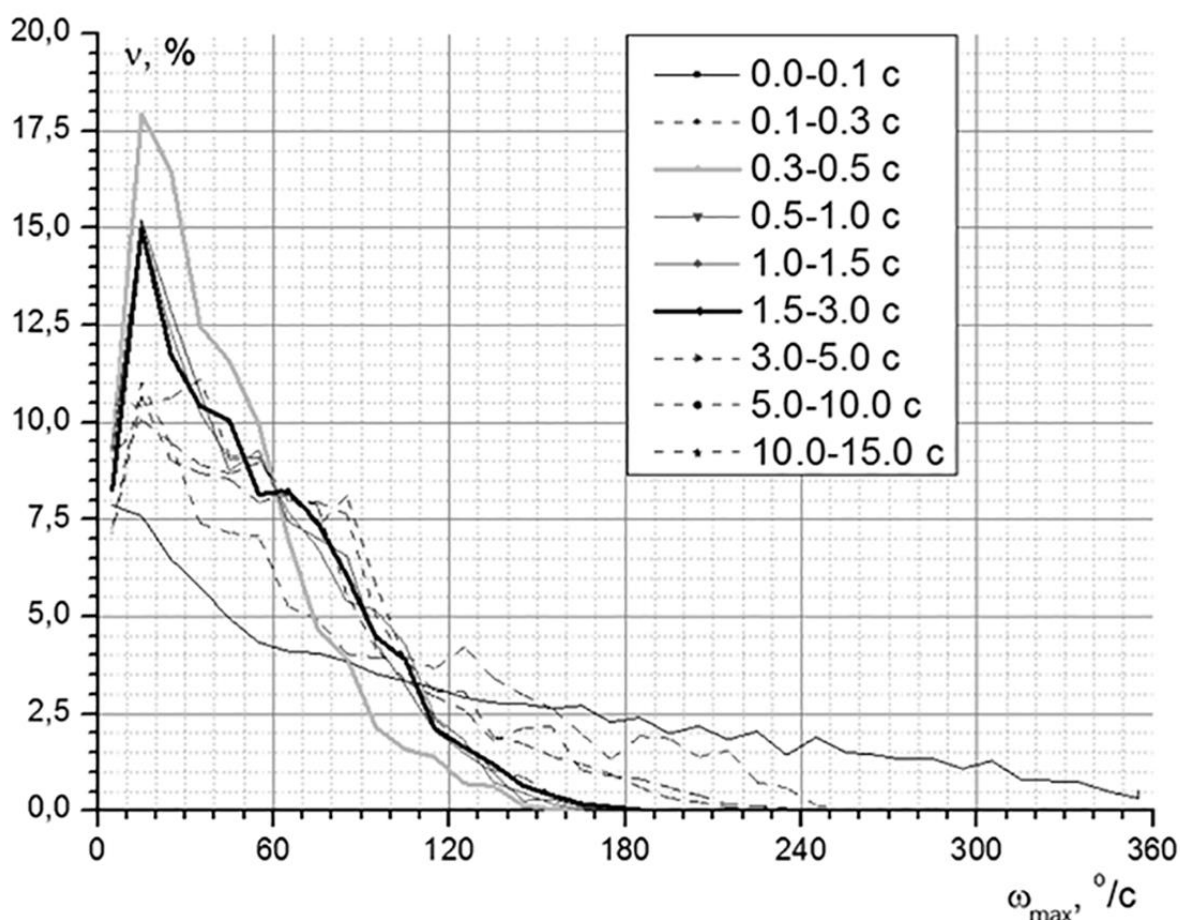


Рис. 1. Распределение по максимальным поперечным угловым скоростям  $\omega_{\max}$  на разных временных промежутках.

#### Литература

1. Айзерман М.А. Классическая механика: Учебно-методическое пособие. - 3-е изд. - М.: Издательство Физико-математической литературы, 2005. - 380 с.
2. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1973. - 320 с.
3. Бранец В.Н. Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления: учеб. пособие - М.: МФТИ, 2009. - 304 с.
4. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975. - 400 с.
5. Чуркин В.М. Устойчивость и колебания парашютных систем. Анализ динамики парашютных систем с полностью раскрытым куполом. - Саарбрюккен, Германия: Palmarium Academic Publishing, 2014. - 250 с.