

УДК 519.6, 629.734.7

## Проектная математическая модель обтекания купола нестационарным потоком

*Н.А. Егоров<sup>1</sup>, Ю.Д. Шевелёв<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт автоматизации проектирования РАН

В докладе рассматривается проектная методика оценки аэродинамических характеристик купола, входящего в состав парашютной системы с упругим звеном [1]. Наличие упругого звена обуславливает существенно нестационарный характер обтекания купола. Для проведения расчетов используется метод дискретных вихрей (МДВ), базирующийся на математической модели движения идеальной среды и обеспечивающий высокое быстродействие по сравнению с другими подходами вычислительной гидроаэродинамики. МДВ зарекомендовал себя надежным инструментом для решения широкого круга задач обтекания [2,3].

В упрощенной постановке рассматривается одномерное движение в вертикальном направлении. Вертикальную ось направим вниз для удобства анализа результатов исследований.

Работа парашютной системы с упругим звеном в упрощенном виде описывается системой двух уравнений:

$$m_r \frac{d^2 H_r}{dt^2} = m_r g - F_{уп} \quad (1)$$

$$m_n \frac{d^2 H_n}{dt^2} = m_n g - Q + F_{уп} \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает движение груза. Правая часть состоит из суммы силы тяжести и силы упругости звена. Аэродинамическую силу, действующую на груз, не учитываем. Уравнение (2) описывает движение парашюта. Правая часть кроме силы тяжести и упругости включает аэродинамическую силу  $Q$ . Упругое звено считаем невесомым, с постоянной линейной зависимостью между напряжением и деформацией, т.е. при любых растяжениях справедлив закон Гука с постоянным коэффициентом жёсткости  $c$ :

$$F_{уп} = c(H_r - H_n) \quad (3)$$

В настоящем докладе сравниваются особенности работы двух математических моделей парашютной системы с упругим звеном. Первая модель предполагает постоянный коэффициент аэродинамического сопротивления парашюта  $c_n = \text{const}$ . В этом случае аэродинамическая сила вычисляется по формуле:

$$Q = c_n \frac{\rho H_n}{2} \left( \frac{dH_n}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

Во второй модели аэродинамическая сила вычисляется непосредственно во время процесса продольных колебаний упругого звена методом дискретных вихрей.

Дополнив систему дифференциальных уравнений (1 - 2) начальными условиями получаем задачу Коши. Для расчёта кинематических параметров в обеих моделях используется метод Эйлера.

Численные значения параметров выбраны следующими: масса парашюта составляет 0,2 кг, масса груза - 2 кг, жесткость упругого звена равна 5 Н/м, площадь купола 2,3 м<sup>2</sup>, скорость груза и парашюта в начальный момент времени равны и составляют 3 м/с, абсолютное удлинение упругого звена в начальный момент времени равно 1,9 м. Приведенные значения соответствуют параметрам проектируемой модели для экспериментального исследования особенностей работы упругого звена, которое, согласно оценкам [1], позволит снизить массу технических средств, обеспечивающих мягкую посадку спускаемых аппаратов.

Расчёт аэродинамической силы методом дискретных вихрей ведётся в предположении, что купол парашюта представляет собой абсолютно жёсткую непроницаемую полусферу. Купол образуют 2400 замкнутых вихревых рамок.

Решение задачи обтекания сводится к отысканию решения для уравнения потенциала скорости, которое в случае малых дозвуковых скоростей сводится к уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Граничным условием на непроницаемой поверхности является условие непротекания:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} - (\vec{V}^* \cdot \vec{n}) = 0 \quad (6)$$

где  $n$  - нормаль к непроницаемой поверхности,  $V^*$  скорость движения сплошной среды относительно поверхности.

Численное решение задачи обтекания тонкой полусферической оболочки с учетом отрыва потока с ее краев строится с помощью представления как оболочки, так и вихревого следа в виде совокупности замкнутых вихревых рамок. Каждая рамка состоит из четырех вихревых отрезков. Использование замкнутых вихревых особенностей обеспечивает автоматическое выполнение теоремы Гельмгольца о сохранении завихренности.

Интенсивности вихревых рамок на куполе определяются на каждом дискретном шаге по времени из условия непротекания. Интенсивности вихрей в пелене определяются интенсивностью вихревых рамок, примыкающих к линии схода. Далее рассчитываются новые координаты вихрей пелены и, с помощью интеграла Коши – Лагранжа, вычисляется нагрузка, действующая на купол.

Система уравнений движения парашютной системы интегрировалась по схеме Эйлера, при этом на каждом шаге решалась задача обтекания купола с учетом сформировавшейся на предыдущих шагах вихревой пелены. Процесс наполнения купола в настоящей работе не исследовался. Поэтому перед началом моделирования работы упругого звена проводился расчет поля течения при обтекании полусферы однородным потоком. После ряда оценочных расчетов продолжительность этапа установления течения выбрана равной 7 с (в размерных величинах). Далее начинался расчёт движения с учётом работы упругого звена, в течение интервала, соответствующего двум периодам колебания упругого звена.

Результаты расчетов зависимости скорости элементов парашютной системы от времени приведены на рис. 1. Зависимость абсолютного удлинения упругого звена от времени приведена на рис. 2. Указанные зависимости, изображенные сплошными линиями, дополнены для сравнения аналогичными зависимостями, рассчитанными для постоянного значения коэффициента аэродинамического сопротивления парашюта  $c_n = 1,65$ . В случае  $c_n = \text{const}$  (пунктирные линии) интегрировалась только система уравнений движения элементов парашютной системы, а задача обтекания не решалась.

Использованная реализация метода дискретных вихрей является приближённой моделью движения сплошной среды, поэтому сделанные ниже выводы носят качественный характер. Проведенные исследования позволили выявить следующие важные отличия в работе двух вариантов моделирования движения:

1. При учёте эффектов обтекания в начальный момент времени скорость купола падает меньше, чем в модели  $c_n = \text{const}$ . Что вызывает большую амплитуду колебаний скорости груза.

2. При учёте эффектов обтекания амплитуда растяжения упругого звена больше и затухает она медленнее по сравнению с моделью  $c_n = \text{const}$ .

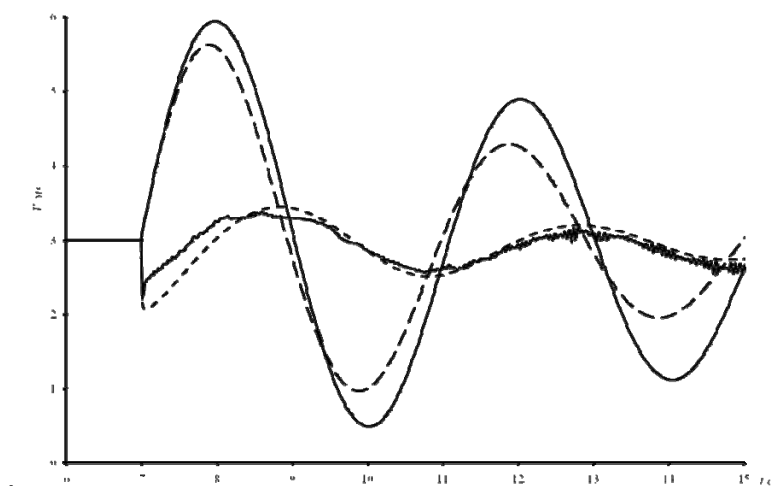


Рис. 1. Зависимости скорости купола (малая амплитуда) и груза (большая амплитуда) от времени

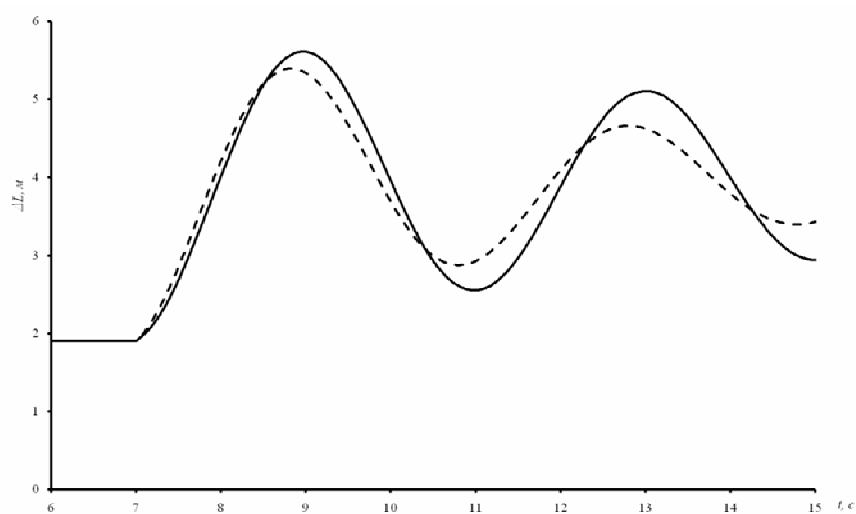


Рис. 2. Зависимость удлинения упругого звена от времени

### Литература

1. Журин С.В. Парашютно-реактивная система посадки с упругим звеном // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 107-114.
2. Гоман О.Г., Карплюк В.И., Ништ М.И., Судаков А.Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости. - М.: Машиностроение, 1993. - 288 с.
3. Дмитриев М.Л., Щеглов Г.А. Численное моделирование динамики упругой системы при ее отрывном обтекании идеальной несжимаемой средой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2007. № 4. С. 15-22.