

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПОЛНЕНИЯ ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ

А.В. Трямкин, С.Н. Скиданов

В данной работе исследуется процесс наполнения парашютных систем. Получена экспериментальная зависимость изменения эффективной площади сопротивления парашюта от времени наполнения. Результаты решения уравнений движения системы "груз-парашют", с учетом найденной зависимости, имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Современный процесс десантирования различной техники и грузов можно разбить на следующие основные этапы:

I-й этап – вытягивание десантируемого объекта (ДО) из самолета вытяжной парашютной системой (ВПС);

II-й этап – движение ДО в воздухе;

III-й этап – приземление ДО.

Основная парашютная система (ОПС) может применяться как в однокупольном варианте, так и в многокупольном варианте, поэтому в дальнейшем, не зависимо от количества парашютов, будем считать ОПС исполненной в однокупольном варианте, т.к. многокупольную систему можно привести к системе с одним парашютом площадью, равной сумме всех площадей парашютов многокупольной системы.

Второй основной этап – движение десантируемого объекта в воздухе, можно разбить на следующие этапы (рис. 1):

1-й этап – отделение дополнительного вытяжного парашюта от ДО и его наполнение.

Продолжительность первого этапа называется временем раскрытия дополнительного вытяжного парашюта τ_1 . В течение первого этапа изменение скорости ДО и пройденного им пути происходит по законам падения в воздухе тела без парашюта.

2-й этап – отделение блока с основной парашютной системой от ДО, вытягивание купола (или куполов, в случае применения многокупольной парашютной системы) и строп на всю их длину и стягивание парашютной камеры с купола.

Наполненный воздухом дополнительный вытяжной парашют, быстро теряя скорость, снимает блок основной парашютной системы с ДО, вытягивает стропы из сот парашютной камеры и стаскивает камеру с купола. При этом купол основного парашюта вместе со стропами вытягивается на всю длину.

В течение второго этапа, если пренебречь трением купола при стаскивании парашютной камеры и усилиями, возникающими при выходе строп из сот камеры, изменение скорости падения

ДО и длины пройденного им пути (как и в течение первого этапа) происходит по законам падения тела в воздухе без парашюта.

Продолжительность второго этапа t_2 зависит от размеров дополнительного вытяжного парашюта, от массы ОПС, от длины купола и строп, от длины парашютной камеры и ее конструкции, скорости падения ДО к концу второго этапа и других факторов.

Как видно, в течение первых двух этапов движения в воздухе, с момента отделения ДО от самолета до полного вытягивания купола и строп на всю длину, парашют как тормозное устройство не работает.

Скорость ДО изменяется незначительно от скорости самолета V_0 до скорости в момент введения основного парашюта в действие. Время с момента отделения ДО от самолета до вытягивания

купола и строп на всю их длину называется временем вытягивания и обозначается $t_a : t_a = t_1 + t_2$.

3-й этап – наполнение купола парашюта до площади ограниченной рифовкой.

В конце второго этапа, после вытягивания купола и строп на всю их длину, начинается наполнение купола парашюта до площади ограниченной рифовкой. Продолжительность третьего этапа называется временем наполнения зарифованного парашюта t_3 .

4-й этап – снижение на зарифованном куполе.

В течение четвертого этапа t_4 ДО объект снижается на зарифованном парашюте. Время с момента наполнения зарифованного парашюта до момента разрифовки парашюта называется временем снижения на зарифованном парашюте и обозначается $t_p : t_p = t_3 + t_4$.

5-й этап – наполнение купола парашюта.

На пятом этапе происходит разрифовка парашюта. Купол парашюта наполняется до полной площади за время t_5 . Время с момента начала наполнения зарифованного купола до его полного раскрытия называется временем наполнения основного парашюта и обозначается $t_n : t_n = t_3 + t_4 + t_5$.

6-й этап – снижение на раскрытом парашюте.

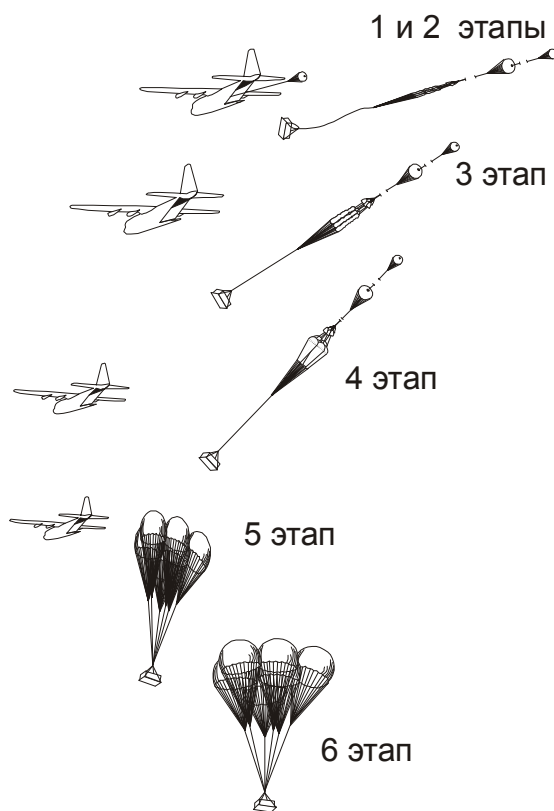


Рис. 1. Этапы движения десантируемого объекта в воздухе.

В течение шестого этапа ДО снижается на раскрытом парашюте до достижения им поверхности земли. Как правило, время шестого этапа t_6 выбирается таким образом, чтобы перед приземлением система "груз-парашют" имела скорость установившегося снижения.

Много работ как отечественных, так и зарубежных посвящено исследованиям процесса наполнения парашюта /1, 3, 4, 5, 6, 8/, но все они, в основном, решают вопросы связанные с проектированием парашютов и не дают достаточно простых выражений для исследования динамики движения системы "груз-парашют" в процессе наполнения купола.

В процессе наполнения изменяются как площадь купола парашюта F_n , так и его коэффициент сопротивления c_n . Знание законов изменения выше перечисленных параметров позволило бы существенно упростить решение задач связанных с наполнением парашюта. Существует много работ, где даются законы изменения площади парашюта и коэффициента сопротивления, но проще всего искать вид зависимостей изменения площади парашюта и коэффициента сопротивления не отдельно, а в виде их произведения. Это произведение называется эффективной площадью сопротивления парашюта и обозначается Φ :

$$\Phi = c_n F_n . \quad (1)$$

Анализ экспериментальных исследований процесса наполнения купола в аэродинамической трубе /4/ и проведенных летных испытаний (рис. 2) парашютно-реактивной системы (ПРС) в составе многокупольной парашютной системы МКС-175-12 /7/ позволяет найти зависимость эффективной площади парашюта Φ от времени наполнения t , которую с достаточной степенью точности можно аппроксимировать /2/ кривой

$$\Phi(t) = at^k, \quad 0 < t < \tau, \quad (2)$$

где a – постоянная величина, значение которой будет найдено ниже; k – постоянная наполнения – безразмерная величина, определяется экспериментально, для парашютной системы МКС-175-12 $k = 1.6 \div 2.4 /10/$; τ – время наполнения парашюта, с.

По результатам летных испытаний, в конце наполнения парашюта ($t = \tau$) коэффициент сопротивления принимает максимальное значение, следовательно, $\Phi_{\max} = c_n F_n$. Эффективная площадь сопротивления парашюта будет равна

$$\Phi_{\max} = a\tau^k$$

откуда

$$a = \frac{\Phi_{\max}}{\tau^k} . \quad (3)$$

Подставим (3) в (2), окончательно получим зависимость изменения эффективной площади сопротивления парашюта от времени наполнения

$$\Phi(t) = \Phi_{\max} \left(\frac{t}{\tau} \right)^k, \quad 0 < t < \tau. \quad (4)$$

В случае использования рифовки эффективная площадь сопротивления от времени наполнения зарифованного парашюта будет иметь вид:

$$\Phi_p(t) = \Phi_p \left(\frac{t}{t_3} \right)^k, \quad 0 < t < t_3 \quad (5)$$

где Φ_p – эффективная площадь сопротивления зарифованного парашюта, м²; t_3 – время наполнения зарифованного парашюта, с.

Изменение эффективной площади сопротивления за время наполнения парашюта после разрифовки определяется из выражения

$$\Phi(t) = at^k + \Phi_p, \quad 0 < t < t_5. \quad (6)$$

В конце наполнения парашюта $t = t_5$ и

$$\Phi_{\max} = at_5^k + \Phi_p$$

откуда

$$a = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_p}{t_5^k}. \quad (7)$$

Подставим (7) в (6), окончательно получим

$$\Phi(t) = (\Phi_{\max} - \Phi_p) \left(\frac{t}{t_5} \right)^k + \Phi_p, \quad 0 < t < t_5. \quad (8)$$

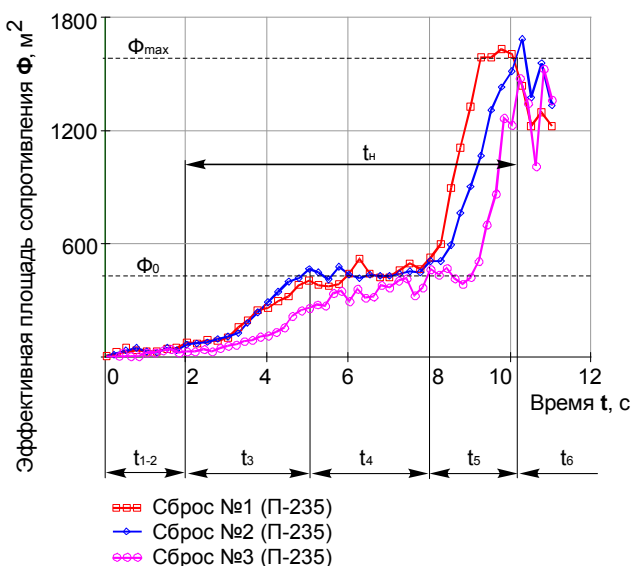


Рис. 2. Изменение эффективной площади сопротивления парашютной системы от времени

Воспользуемся полученными выражениями для определения траекторных параметров существующей серийной парашютно-реактивной системы, движение в воздухе которой происходит в соответствии со всеми выше изложенными этапами.

При составлении уравнений движения системы "груз–парашют" будем предполагать, что при снижении системы ось парашюта, проходящая через коуш строп и вершину купола, касательная к траектории движения груза, а парашют обтекается потоком, скорость которого на бесконечности равна скорости движения груза и совпадает по направлению с

осью парашюта. Масса груза намного больше массы парашюта. Пренебрежем возмущениями,

вносимыми в поток присутствием груза. Пренебрежем также центробежными силами, действующими на парашют при движении системы по криволинейной траектории. Материал купола и строп будем считать нерастяжимыми, а воздух – несжимаемым.

Уравнения движения в связанной системе координат, с учетом принятых допущений будут иметь вид:

Этап 1-2

$$\begin{cases} \frac{dV_{1-2}}{dt} = g \sin \theta_{1-2} - \frac{\Phi_e \rho}{2m} V_{1-2}^2, \\ \frac{d\theta_{1-2}}{dt} = \frac{g}{V_{1-2}} \cos \theta_{1-2}, \\ \frac{dH_{1-2}}{dt} = V_{1-2} \sin \theta_{1-2}. \end{cases} \quad (9)$$

где m – масса системы, кг; V_{1-2} – скорость центра масс системы, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; θ_{1-2} – угол наклона траектории, рад; Φ_e – эффективная площадь сопротивления груза, м²; ρ – плотность воздуха у земли, кг/м³; H_{1-2} – потеря высоты на первом этапе. В дальнейшем, индексы, стоящие при переменных, относятся к каждому из рассматриваемых этапов.

Так как в процессе летных испытаний ПРС диапазон высот десантирования составлял 300–400 метров, то в целях упрощения задачи будем считать плотность воздуха постоянной величиной равной плотности на высоте $H = 0$ (плотность воздуха у земли отличается от плотности воздуха на высоте 400 м при стандартных атмосферных условиях не более чем на 4%).

Система дифференциальных уравнений (9) интегрируется при начальных условиях: $V_{1-2}(0) = V_0$, $\theta_{1-2}(0) = 0$, $H_{1-2}(0) = H_0$, где V_0 – скорость полета самолета, H_0 – высота десантирования. Пределы интегрирования $0 < t < t_s$, время вытягивания парашютной системы МКС-175-12 по результатам летных испытаний ПРС равно $t_s = 1.8 \div 2.2$ с.

Этап 3

$$\begin{cases} \frac{dV_3}{dt} = g \sin \theta_3 - \left[\Phi_p \left(\frac{t}{t_3} \right)^k + \Phi_e \right] \frac{\rho}{2m} V_3^2, \\ \frac{d\theta_3}{dt} = \frac{g}{V_3} \cos \theta_3, \\ \frac{dH_3}{dt} = V_3 \sin \theta_3. \end{cases} \quad (10)$$

Система дифференциальных уравнений (10) интегрируется при начальных условиях: $V_3(0) = V_{1-2}(t_6)$, $\theta_3(0) = \theta_{1-2}(t_6)$, $H_3(0) = H_{1-2}(t_6)$. Пределы интегрирования $0 < t < t_3$.

На основании закона непрерывности парашюта должны раскрываться на определенной длине, т.к. для наполнения купола требуется заданный конический столб воздуха впереди купола. Эта определенная длина пропорциональна номинальному диаметру D_0 парашюта. В работе /5/ дается формула для определения времени наполнения парашютов:

$$\tau = \frac{nD_0}{V}, \quad (11)$$

где n – постоянная безразмерная величина, типичная для каждого парашюта, указывающая длину наполнения как кратное значение D_0 ; V – скорость системы "груз-парашют" в момент наполнения купола.

Так по результатам экспериментов десантирования ПРС постоянная n при наполнении зарифованной парашютной системы МКС-175-12 равна $n = 10 \div 12$, а при наполнении после разрифовки – $n = 1.8 \div 2$.

Этап 4

$$\begin{cases} \frac{dV_4}{dt} = g \sin \theta_4 - [\Phi_p + \Phi_z] \frac{\rho}{2m} V_4^2, \\ \frac{d\theta_4}{dt} = \frac{g}{V_4} \cos \theta_4, \\ \frac{dH_4}{dt} = V_4 \sin \theta_4. \end{cases} \quad (12)$$

Система дифференциальных уравнений (12) интегрируется при начальных условиях: $V_4(0) = V_3(t_3)$, $\theta_4(0) = \theta_3(t_3)$, $H_4(0) = H_3(t_3)$. Пределы интегрирования $0 < t < t_4$.

Время движения системы после наполнения зарифованного парашюта равно – $t_4 = t_p - t_3$.

Этап 5

$$\begin{cases} \frac{dV_5}{dt} = g \sin \theta_5 - \left[(\Phi_0 - \Phi_p) \left(\frac{t}{t_5} \right)^k + \Phi_p + \Phi_z \right] \frac{\rho}{2m} V_5^2, \\ \frac{d\theta_5}{dt} = \frac{g}{V_5} \cos \theta_5, \\ \frac{dH_5}{dt} = V_5 \sin \theta_5. \end{cases} \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений (13) интегрируется при начальных условиях: $V_5(0) = V_4(t_4)$, $\theta_5(0) = \theta_4(t_4)$, $H_5(0) = H_4(t_4)$. Пределы интегрирования $0 < t < t_5$. Продолжительность пятого этапа определяется из выражения (11).

Этап 6

$$\begin{cases} \frac{dV_6}{dt} = g \sin \theta_6 - [\Phi_0 + \Phi_2] \frac{\rho}{2m} V_6^2, \\ \frac{d\theta_6}{dt} = \frac{g}{V_6} \cos \theta_6, \\ \frac{dH_6}{dt} = V_6 \sin \theta_6. \end{cases} \quad (14)$$

Система дифференциальных уравнений (14) интегрируется при начальных условиях: $V_6(0) = V_5(t_5)$, $\theta_6(0) = \theta_5(t_5)$, $H_6(0) = H_5(t_5)$.

На рисунке 3 даются экспериментальная и теоретическая зависимости изменения скорости снижения ПРС от времени. Интегрирование систем (9–10) и (12–14) проводилось с помощью ЭВМ. Масса ПРС $m = 19500$ кг; начальная скорость десантирования $V_0 = 81$ м/с; высота десантирования $H_0 = 344$ м; угол наклона траектории системы в момент отделения от самолета $\theta_0 = 0$ рад; эффективная площадь сопротивления груза $\Phi_2 = 16$ м²; эффективная площадь сопротивления парашютной системы $\Phi_0 = 1554$ м²; эффективная площадь сопротивления зарифованной парашютной системы $\Phi_p = 0.234\Phi_0$ м²; постоянная наполнения $k = 2$; постоянная n при наполнении зарифованной парашютной системы МКС-175-12 равна $n = 12$, а при наполнении после разрифовки – $n = 2$.

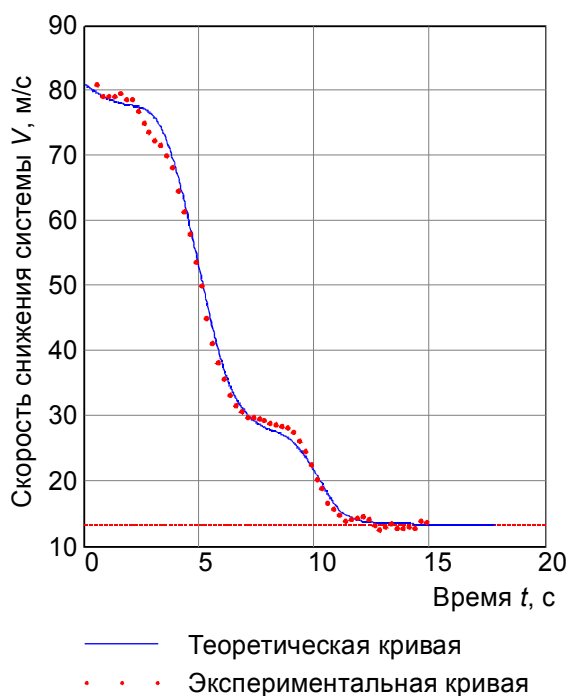


Рис. 3. Изменение скорости снижения системы от времени.

В заключение следует отметить, что найденная зависимость изменения эффективной площади сопротивления парашюта от времени его наполнения позволят существенно упростить решение задач динамики движения системы "груз-парашют", получая при этом достоверные результаты.

Литература

1. Белоцерковский С.М., Ништ М. И., Пономарев А. Т., Рысев О. В. Исследование парашютов и дельтапланов на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
2. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
3. Морозов В. И., Пономарев А. Т., Рысев О. В. Математическое моделирование сложных аэроупругих систем. – М.: Физматлит, 1995. – 736 с.
4. Носарев И. М. Исследование в аэродинамических трубах процесса раскрытия круглого купола парашюта. – М.: ЦАГИ, 1963. – 32 с.
5. Нэке Т.В. Руководство по проектированию парашютных спасательных систем. Глава 5. Характеристики и эксплуатационные качества парашютов. – М.: ЦНТИ "Волна", 1989.–152 с.
6. Рысев О. В., Пономарев А. Т., Васильев М. И., Вишняк А. А., Днепров И. В., Мосеев Ю. В. Парашютные системы. – М.: Наука, 1996. – 228 с.
7. Средства десантирования изделия "688". Отчет по результатам предварительных летных испытаний П235-0000 Отч 8. – МКПК "Универсал", инв. № 7130-90, 1991. – 28 с.
8. Dennis D.R. Recent advances in parachute technology // The aeronautical journal. – 1983, V. 87, № 869, P. 333–342.