

УДК 629.734.7

Н.Ю. Бериславский¹, П.И. Иванов², Р.П. Иванов³¹ Государственный научно-испытательный центр ВС Украины² Херсонский национальный технический университет, Херсон³ Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков**ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКУПОЛЬНЫХ ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ**

В статье рассматривается процесс проектирования многокупольных парашютных систем. Представлен алгоритм выбора геометрических параметров системы и выведены зависимости, выражающие их взаимное влияние. Рассмотрены системы с количеством куполов до девяти и проанализированы особенности их работы, а также возможные варианты отказов, обусловленные геометрией их горизонтальных проекций. Даны рекомендации по диапазонам ограничения теоретических зависимостей. Рассмотрены практические примеры. Результаты данной работы могут быть полезны специалистам, занимающимся вопросами проектирования и испытаний парашютной техники.

Ключевые слова: многокупольная парашютная система, одиночный купол, балансировочный угол парашюта связи.

Введение

Многокупольная парашютная система (МКС) – парашютная система, в состав которой входят два или более парашютов [1],[2].

МКС находят широкое применение в авиации и космонавтике – от торможения самолета для уменьшения длины пробега при посадке до спасения посадочных модулей космических аппаратов в земной атмосфере и атмосферах других планет. Они обладают достаточно высокой степенью маятниковой и пульсационной устойчивости, живучести. Кроме того, многокупольные парашютные системы незаменимы при десантировании тяжелых грузов, поскольку могут достигать весьма внушительной суммарной площади. Исходя из вышесказанного, становится очевидным, что вопросы исследования МКС являются одним из важных направлений в отрасли парашютостроения.

Основная часть

Коэффициент сопротивления многокупольной системы по результатам летных испытаний и данным системы внешнетраекторных измерений (ВТИ) определяется по формуле:

$$C_{ПМКС} = \frac{2(G_{ГР} + G_{МКС})}{nF_{П}\rho V_{СН}},$$

где $G_{ГР}$, $G_{МКС}$ [Н] – вес груза и парашютной системы (ПС) соответственно; n – количество куполов

связки; $F_{П}$ [м²] – раскройная площадь одного купола; ρ [кг/м³] – плотность воздуха на рассматриваемой высоте; $V_{СН}$ [м/с] – скорость снижения системы груз-ПС.

По результатам летных экспериментальных данных для связок куполов типа «плоский круг в раскрое» коэффициент лобового сопротивления двух и трехкупольной систем составляет: $C_{ПМКС} \approx 0,6$, а для связок с числом куполов более четырех: $C_{ПМКС} \approx 0,63$. С учетом этого последнюю формулу можно преобразовать к виду, удобному для приближенной оценки посадочной скорости на уровне моря:

– для 2-х и 3-х купольной систем:

$$V_{СН} \approx 5,22 \sqrt{\frac{(m_{ГР} + m_{МКС})}{nF_{П}}} = 5,22 \sqrt{\gamma_{УД}};$$

– для 4-х и более купольной систем:

$$V_{СН} \approx 5,094 \sqrt{\frac{(m_{ГР} + m_{МКС})}{nF_{П}}} = 5,094 \sqrt{\gamma_{УД}},$$

где $\gamma_{УД}$ [кг/м²] – удельная массовая нагрузка.

На рис. 1 представлены зависимости посадочной скорости системы груз – МКС от удельной массовой нагрузки для случаев 2-х и 3-х купольной систем (верхняя кривая) и для 4-х и более купольной систем (нижняя кривая). Одно из первых, с чем сталкивается конструктор при проектировании многокупольных парашютных систем – это формирование ее геометрии, рис. 2.

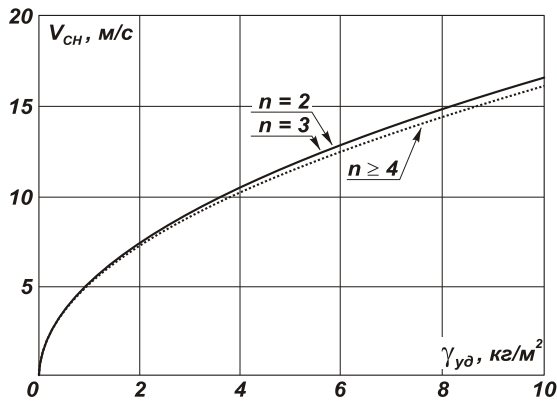


Рис. 1. Зависимости посадочной скорости МКС от удельной массовой нагрузки

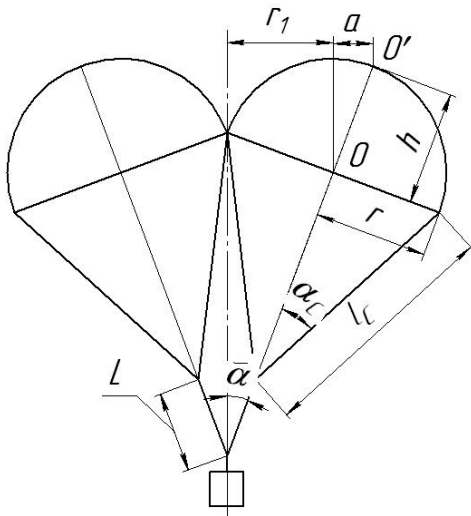


Рис. 2. Фронтальная проекция двухкупольной связки соприкасающихся куполов

Предварительно должен быть известен базовый купол парашюта (его геометрия и характеристики: масса, радиус раскройный и радиус миделя полностью наполненного сферического сегмента, площадь, коэффициент сопротивления и др.), который будет положен в основу формирования связки МКС, а также должна быть известна масса десантируемого груза.

Далее необходимо, по условиям безопасности посадки, задать требуемой посадочной скоростью $V_{сн}$ системы груз-МКС. Теперь можно уже оценить необходимое количество куполов в связке по формуле (в случае, если получается дробное число, оно округляется до ближайшего целого в большую сторону):

$$n = \frac{2G_{гр}}{c_{ПМКС} F_{П\rho} V_{сн}^2 - 2G_k} \quad (1)$$

Теперь, в зависимости от числа требуемых куполов, можно приступить к формированию геометрии связки.

Формирование геометрии связки начинается с формирования горизонтальной проекции соприкасающихся в точках касания куполов, входящих в связку, с вертикально расположенными осями. При-

нимается в модели связки, что каждый купол представляет собой сферический сегмент.

Алгоритм построения горизонтальной проекции соприкасающихся в точках касания куполов состоит в следующем.

1. Задается число куполов связки n .
2. Задается радиус r одиночного купола (сферического сегмента), входящего в связку, рис.2.
3. Вычисляется горизонтальное расстояние от центра связки до вершины вертикально расположенного купола:

$$b = \frac{r}{\sin(\pi/n)}$$

Это расстояние является радиусом окружности, на которой будут размещены центры окружностей – полюса вертикально расположенных сферических куполов.

4. Строится окружность радиуса b с центром O , расположенным на оси МКС.

5. На этой окружности радиуса b строятся окружности радиуса r – горизонтальные проекции одиночных куполов с вертикальными (параллельными друг другу) осями, так, чтобы они соприкасались друг с другом в одной точке.

6. Следующим движением является вращение (поворот) куполов (сферических сегментов относительно центров сфер) на величину угла балансирующего положения $\bar{\alpha}$ каждого купола так, чтобы этот поворот происходил в вертикальной плоскости, проходящей через линию b .

Под балансирующим углом $\bar{\alpha}$ одиночного купола связки понимается угол между осью купола и вертикалью.

В результате этого вращения полюс каждого купола удалится от точки центра связки O по горизонтали в плоскости линии b на расстояние $a = h \sin \bar{\alpha}$, где h – высота купола (расстояние от плоскости входного отверстия до точки полюса купола), а оси каждого купола пересекутся в одной точке, что и требуется для образования связки. При этом и центр основания полусферического купола окажется на расстоянии $r_1 = r \cos \bar{\alpha}$ от оси связки.

Теперь, расстояние от полюса каждого отклоненного купола до оси связки будет равно: $b - (r - r_1) + a$.

7. Рассматривая фронтальную проекцию куполов в связке, можно получить формулу для оценки величины балансирующего угла соприкасающихся куполов в связке:

$$\sin \bar{\alpha} = \frac{b - (r - r_1) + a}{h + l_c \cos \alpha_c + L} = \frac{\frac{r}{\sin(\pi/n)} - (r - r \cos \bar{\alpha}) + h \sin \bar{\alpha}}{h + l_c \cos \alpha_c + L}$$

откуда, после сокращения на величину $a = h \sin \bar{\alpha}$, получим:

$$\sin \bar{\alpha} = \frac{\frac{r}{\sin(\pi/n)} - (r - r \cos \bar{\alpha})}{l_c \cos \alpha_c + L}. \quad (2)$$

Для двухкупольной парашютной системы $n = 2$, $b = r$ и формула (2) принимает вид:

$$\sin \bar{\alpha} = \frac{r \cos \bar{\alpha}}{l_c \cos \alpha_c + L},$$

откуда можно явно выразить угол $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = \arctg \left(\frac{r}{l_c \cos \alpha_c + L} \right).$$

Для трех и более купольных систем уравнение (2) является трансцендентным относительно балансировочного угла $\bar{\alpha}$ и не выражается явно через угол $\bar{\alpha}$.

Приближенное решение уравнения (2) можно получить графическим методом.

Обозначив левую часть уравнения (2) как $z1(\bar{\alpha})$, а правую как $z2(\bar{\alpha})$, построим графики этих функций в одной и той же системе координат. Тогда точка пересечения графиков этих функций и даст нам искомое решение – балансировочный угол $\bar{\alpha}$ соприкасающихся куполов в связке.

На рис. 3 представлены графики искомых функций, где $x = \bar{\alpha}$ для заданных начальных условий: $n = 3$, $k = 0$, $l_c = \pi r$, $\cos \alpha_c = \frac{\sqrt{\pi^2 - 1}}{\pi}$,

$L = k l_c = k \pi r$. Здесь k – коэффициент, выражающий длину соединительного звена в долях от длины стропы парашюта. По результатам расчетов:

$$\Delta \bar{\alpha} \approx 0,383 \text{ рад} \approx 22^\circ 31'.$$

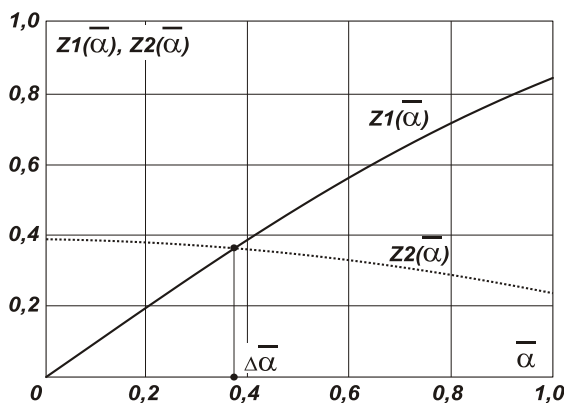


Рис. 3. Определение величины балансировочного угла соприкасающихся куполов в связке $\bar{\alpha}$ как абсциссы точки пересечения кривых $z1(x)$, и $z2(x)$

Однако на практике разность $(r - r \cos \bar{\alpha})$ мала при малых углах $\bar{\alpha}$ и с увеличением числа куполов в связке (и длин соединительных звеньев) становит-

ся значительно меньше, чем дробь $\frac{r}{\sin(\pi/n)}$. На-

пример, при $n = 3$, приняв даже значение $\bar{\alpha} = 30^\circ$, получим, что величина $\frac{r}{\sin(\pi/n)}$ превосходит величину $(r - r \cos \bar{\alpha})$ почти в 8,6 раза, а с увеличением числа куполов в связке это превосходство будет значительно возрастать.

Это доказывает возможность и практическую целесообразность упрощения выражения (2) и замену его приближенным равенством, из которого уже можно явно выразить балансировочный угол соприкасающихся куполов с достаточной для практики степенью точности.

Поэтому вместо равенства (2) можно записать и на практике использовать приближенное равенство:

$$\sin \bar{\alpha} \approx \frac{r}{(l_c \cos \alpha_c + L) \sin(\pi/n)},$$

откуда:

$$\bar{\alpha} \approx \arcsin \left[\frac{r}{(l_c \cos \alpha_c + L) \sin(\pi/n)} \right]. \quad (3)$$

Здесь: l_c – длина строп купола связки; α_c – угол полуразвала строп купола; L – длина соединительного звена отдельного купола связки.

На рис. 4 – 10 представлены горизонтальные проекции различных связок куполов – от двухкупольной до девятикупольной.

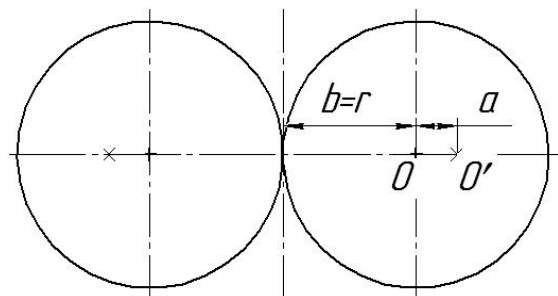


Рис. 4. Горизонтальная проекция двухкупольной связки соприкасающихся куполов

Анализ реальной двухкупольной системы показывает, что она может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) могут вращаться около оси симметрии системы, а также совершать маятниковые колебания.

Анализ реальной трехкупольной системы (рис. 5) показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) могут вращаться около оси симметрии системы, а также два купола в процессе наполнения могут сжаться один, и он может не наполниться.

Трехкупольные парашютные системы наиболее часто используются на практике. Это системы посадки космических спускаемых аппаратов (Апол-

лон), парашютно-реактивні системи десантування бойової та інших видів техніки.

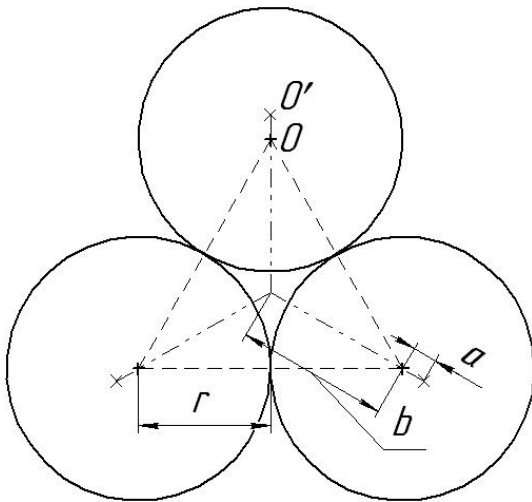


Рис. 5. Горизонтальная проекция связки трех куполов

Анализ реальной четырехкупольной системы (рис. 6) показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения: купола из вершин квадрата могут перейти в вершины ромба так, что два из них могут касаться друг друга кромками, рис.7.

Система в целом может вращаться около своей оси симметрии, а также три купола в процессе наполнения могут сжать один, и он может не наполниться.

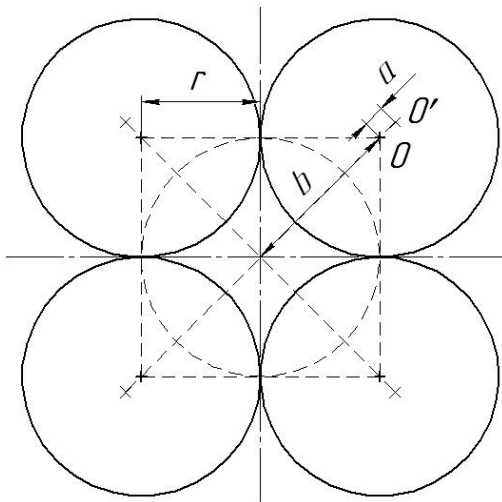


Рис. 6. Четырехкупольная система горизонтальная проекция типа квадрат

Тем не менее, четырехкупольная система достаточно часто применяется для десантирования тяжелой боевой техники и грузов с использованием достаточно мощных систем амортизации для смягчения удара при приземлении (приводнения) объекта. Здесь обычно за счет подбора длин соединительных звеньев удается добиться удаления (расхожде-

ния) куполов на значительные расстояния друг от друга и, таким образом, избежать их нежелательного контактирования в процессе установившегося снижения.

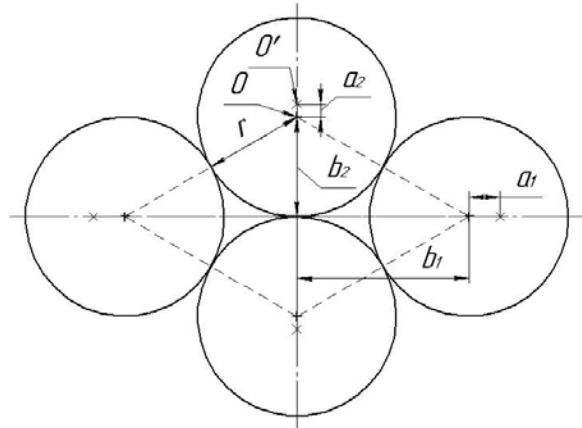


Рис. 7. Четырехкупольная система: горизонтальная проекция типа ромб

Анализ реальной пятикупольной системы (рис. 8) показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) могут вращаться около оси симметрии системы, а также другие купола в процессе наполнения могут сжать один из них, и он может не наполниться. Относительно большое расстояние в центре между куполами пятикупольной связки может провоцировать попадание в центр одного из куполов связки, который может быть зажат остальными.

Для шестикупольной системы такой вариант также вполне вероятен, рис. 6.

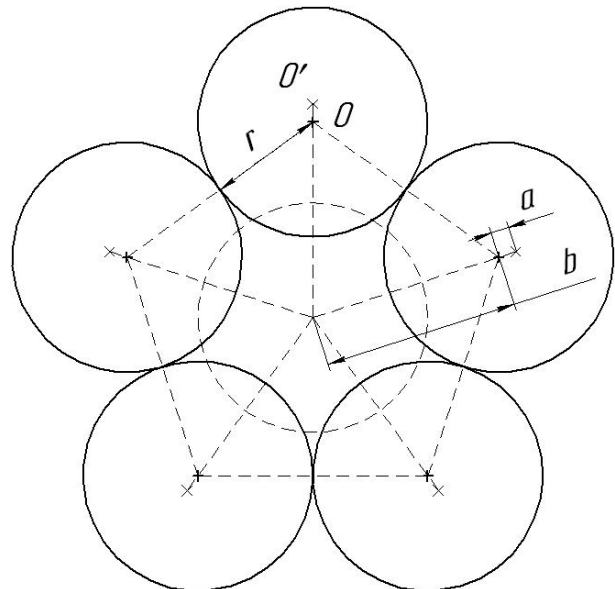


Рис. 8. Горизонтальная проекция связки для пятикупольной системы

Анализ реальной шестикупольной системы показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) мо-

гут вращаться около оси симметрии системы, а также отдельные купола могут легко смещаться в центр, где и остаться, так как в этом случае их сжатие другими куполами будет мало, поскольку достаточно велико межцентровое расстояние.

Для семикуповольной системы (рис. 9) такой вариант также вполне вероятен.

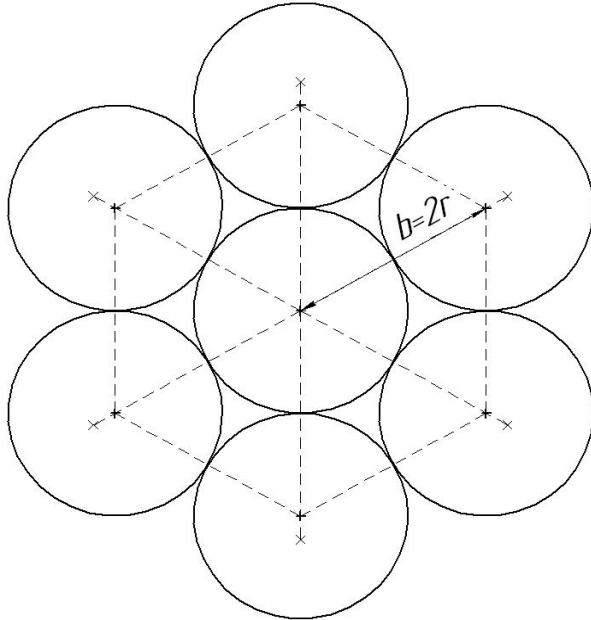


Рис. 9. Горизонтальная проекция связки для семикуповольной системы

Анализ реальной семикуповольной системы показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) могут вращаться около оси симметрии системы, а также отдельные купола связки могут легко смещаться в центр, где и оставаться, так как в этом случае их сжатие другими куполами будет мало, поскольку достаточно велико межцентровое расстояние.

Для восьмикуповольной системы такой вариант также вполне вероятен.

Анализ реальной восьмикуповольной системы показывает, что она также может быть неустойчивой в процессе снижения. Купола (и система в целом) могут вращаться около оси симметрии системы, а также отдельные купола связки могут легко смещаться в центр, где и остаться, так как в этом случае их сжатие другими куполами будет маловероятно, поскольку достаточно велико межцентровое расстояние в связке куполов.

И для девятикуповольной системы такой вариант также вполне вероятен, рис. 10. Однако в этом случае уже начинается прецессирование центрального купола в связке и нежелательное контактирование его с куполами периферии. И только специальным подбором длин соединительных звеньев и введением в связку других конструктивных особенностей удастся развести купола на значительное расстояние друг от

друга и уменьшить вероятность контактов, приводящих к ожогам и механическим повреждениям.

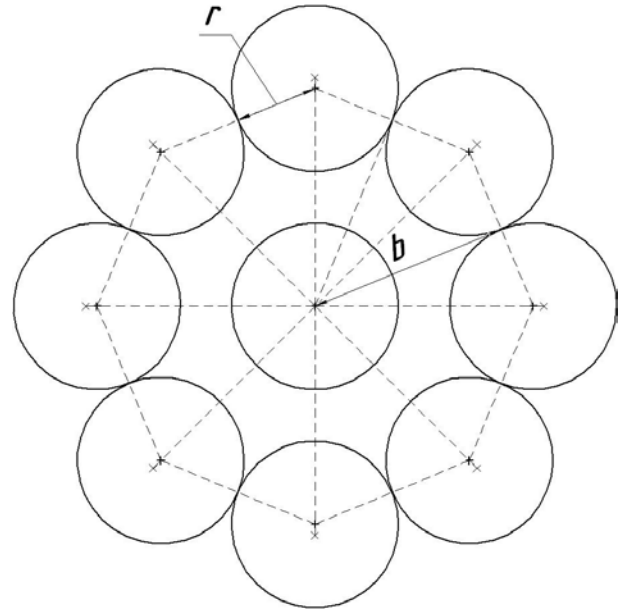


Рис. 10. Горизонтальная проекция связки для девятикуповольной системы

В реальном летном эксперименте купола связки устанавливаются на свои, примерно одинаковые, балансировочные углы $\alpha_{\bar{\sigma}}$, которые, как показывает практика, не превышают 55° . Удерживать купола на кольце по периферии связки с большим числом куполов можно, увеличив их балансировочные углы, рис. 11.

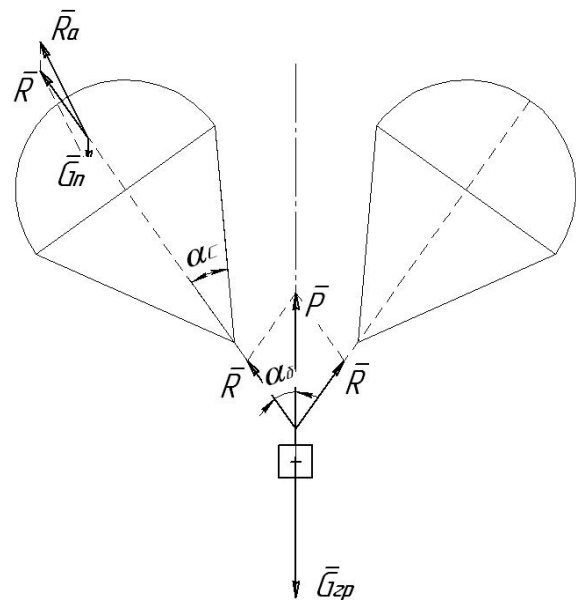


Рис. 11. Балансировка куполов в полете

В зависимости от значений $\bar{\alpha}$ и $\alpha_{\bar{\sigma}}$ в процессе снижения системы возможны три случая [1]:

- 1). $\alpha_{\bar{\sigma}} > \bar{\alpha}$, 2). $\alpha_{\bar{\sigma}} = \bar{\alpha}$, 3). $\alpha_{\bar{\sigma}} < \bar{\alpha}$.

В первом случае купола не соприкасаются. Во втором и в третьем – соприкасаются.

Рассмотрим случай функционирования системы, близкой к реальной.

Пусть для нее длина стропной системы будет равна диаметру купола в раскрое, т.е. примерно длине контура миделевого сечения наполненного купола: $l_c = \pi r$, где r – радиус основания наполненного купола. Тогда синус угла полуразвала строп полностью наполненного купола α_c можно оценить по формуле:

$$\sin \alpha_c = \frac{r}{\pi r} = \frac{1}{\pi}, \quad \cos \alpha_c = \frac{\sqrt{\pi^2 - 1}}{\pi},$$

$$\alpha_c = \arccos\left(\frac{\sqrt{\pi^2 - 1}}{\pi}\right), \quad \alpha_c^0 = \alpha_c \frac{180^0}{\pi}.$$

Пусть длина соединительных звеньев куполов составляет определенную часть от длины стропы: $L = k l_c = k \pi r$, где k – коэффициент (длина соединительного звена в долях длины стропы).

Тогда, с учетом того, что $l_c = \pi r$, формула (3) примет безразмерный вид:

$$\bar{\alpha} \approx \arcsin\left[\frac{1}{(\sqrt{\pi^2 - 1} + \pi k) \sin(\pi/n)}\right]. \quad (4)$$

На рис. 12 представлены зависимости $\bar{\alpha}(n)$ при различных значениях коэффициента $k = 0$ (соединительное звено отсутствует); $k = 0,1$; $k = 0,5$; $k = 1$ (длина соединительного звена равна длине стропы парашюта); $k = 1,5$; $k = 2,0$.

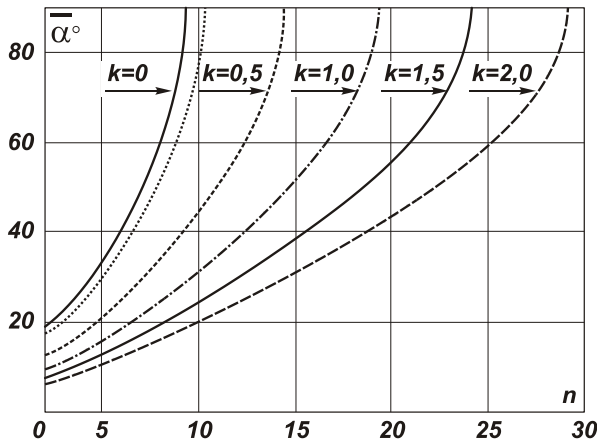


Рис. 12. Зависимости балансировочного угла $\bar{\alpha}$ для соприкасающихся куполов от числа куполов n и относительной длины соединительного звена k

Из представленных на рисунке графиков видно, что с увеличением числа куполов в связке балансировочный угол $\bar{\alpha}$ возрастает нелинейно и довольно интенсивно.

Влияние длины соединительного звена довольно существенно: с увеличением его длины значительно снижается рост балансировочного угла.

Однако теоретические кривые следует рассматривать до углов балансировки не более 45° . Это предельно возможное значение, достигаемое на практике.

Из графиков видно, что, например, для связки из пяти куполов, при $k = 2,0$: $\bar{\alpha} \approx 10,6^\circ$, при $k = 1,5$: $\bar{\alpha} \approx 12,8^\circ$, при $k = 1,0$: $\bar{\alpha} \approx 16,1^\circ$, при $k = 0,5$: $\bar{\alpha} \approx 22^\circ$, при $k = 0,1$: $\bar{\alpha} \approx 31,1^\circ$, при $k = 0$: $\bar{\alpha} \approx 34,8^\circ$.

Угол $\bar{\alpha}$ непрерывно возрастает с уменьшением относительной длины соединительного звена, чего и следовало ожидать.

При больших углах развала куполов (т.е. при больших балансировочных углах куполов связки), коэффициент сопротивления системы уменьшается, вследствие чего может резко увеличиваться скорость снижения системы.

Стремясь увеличить коэффициент сопротивления системы, уменьшают углы развала куполов за счет введения в конструкцию более длинных соединительных звеньев.

Вес системы распределяется между всеми куполами связки примерно одинаково. Если пренебречь силой сопротивления тяжелого груза в процессе установившегося снижения, тяговое усилие R в каждом соединительном звене каждого купола осесимметричной связки определится из формулы:

$$nR \cos \alpha_6 = G_{гр},$$

или:

$$R = \frac{G_{гр}}{n \cos \alpha_6}. \quad (5)$$

Если $\alpha_6 \approx \bar{\alpha}$, то $\cos \alpha_6 \approx \cos \bar{\alpha}$, и в последней формуле тогда можно использовать зависимость (4), преобразовав ее к функции $\sin \bar{\alpha}$, а функцию $\sin \bar{\alpha}$, в свою очередь, к функции $\cos \bar{\alpha}$:

$$\sin \bar{\alpha} \approx \frac{1}{(\sqrt{\pi^2 - 1} + \pi k) \sin(\pi/n)},$$

$$\cos \bar{\alpha} = \sqrt{1 - \sin^2 \bar{\alpha}} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{1}{(\sqrt{\pi^2 - 1} + \pi k) \sin(\pi/n)}\right)^2}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (5), получим зависимости тягового усилия от числа куполов в связке и длин соединительных звеньев.

Формулу (5) удобнее представить в безразмерном виде, относя тяговое усилие в звеньях куполов к весу груза:

$$R_{отн} = \frac{R}{G_{гр}} = \frac{1}{n \cos \bar{\alpha}}. \quad (6)$$

На рис. 13 представлены зависимости для относительного тягового усилия в соединительных звеньях куполов связки МКС при различных значе-

ниях куполов в связке и различных длинах соединительных звеньев, т.е. при различных значениях коэффициента k : $k = 0$ (соединительное звено отсутствует); $k = 0,1$; $k = 0,5$; $k = 1$ (длина соединительного звена равна длине стропы парашюта); $k = 1,5$.

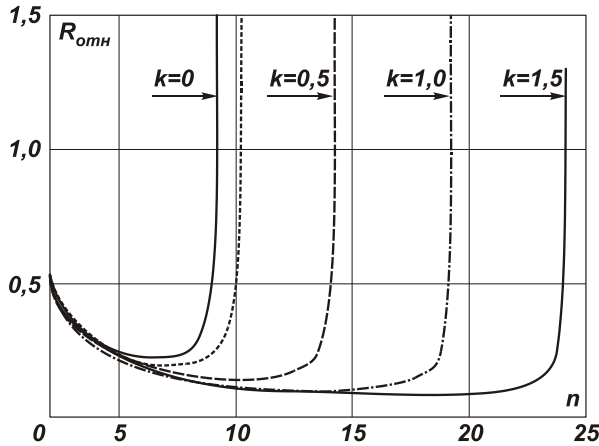


Рис. 13. Зависимости относительного тягового усилия для соприкасающихся куполов от числа куполов n и относительной длины соединительного звена k

Анализ графиков зависимостей $R_{отн}$ от числа куполов n при заданных относительных длинах соединительных звеньев k показывает, что все они имеют точки минимума, причем, чем больше величина k , тем более вправо (в сторону большего числа куполов) сдвигается точка минимума.

Анализ графиков зависимостей $R_{отн}$ от числа куполов при заданных относительных длинах соединительных звеньев показывает, что все они в конце имеют резкий подъем, что объясняется ростом установочного балансирующего угла соприкасающихся куполов.

На практике купола при больших углах балансировки увеличивают скорость снижения системы в целом, а, следовательно, скоростной напор и нагрузку на каждый купол связки в целом.

Вектор тягового усилия \bar{R} отдельного купола, установившегося в потоке под своим балансирующим углом α_{δ} , является результирующей вектора силы веса купола \bar{G}_k и вектора его полной аэродинамической силы \bar{R}_a :

$$\bar{R} = \bar{G}_k + \bar{R}_a.$$

В свою очередь, вектор полной аэродинамической силы \bar{R}_a равен геометрической сумме подъемной силы \bar{Y}_k и силы лобового сопротивления \bar{X}_k :

$$\bar{R}_a = \bar{Y}_k + \bar{X}_k.$$

Вектор \bar{R}_a будет отклонен от линии действия тягового усилия R в каждом соединительном звене

каждого купола на угол $\Delta\alpha_{\delta}$ в сторону оси связки куполов и лежит в плоскости, проходящей через ось купола и ось системы.

Очевидно, что

$$Y = c_y(\alpha_{\delta} - \Delta\alpha_{\delta})F_{II} \frac{\rho V_{CH}^2}{2},$$

$$X = c_x(\alpha_{\delta} - \Delta\alpha_{\delta})F_{II} \frac{\rho V_{CH}^2}{2},$$

$$R_a = c_R(\alpha_{\delta} - \Delta\alpha_{\delta})F_{II} \frac{\rho V_{CH}^2}{2}.$$

Коэффициенты подъемной силы и силы лобового сопротивления: одиночного купола связки:

$$c_x = c_R \cos(\alpha_{\delta} - \Delta\alpha_{\delta}), \quad c_y = c_R \sin(\alpha_{\delta} - \Delta\alpha_{\delta}).$$

Угол $\Delta\alpha_{\delta}$ можно найти из треугольника сил по теореме косинусов:

$$G_k^2 = R^2 + R_a^2 - 2RR_a \cos(\Delta\alpha_{\delta}),$$

откуда:

$$\cos(\Delta\alpha_{\delta}) = \frac{R^2 + R_a^2 - G_k^2}{2RR_a},$$

и

$$\Delta\alpha_{\delta} = \arccos\left(\frac{R^2 + R_a^2 - G_k^2}{2RR_a}\right). \quad (7)$$

Воспользовавшись теоремой синусов:

$$\frac{G_k}{\sin(\Delta\alpha_{\delta})} = \frac{R_a}{\sin(\pi - \alpha_{\delta})} = \frac{R}{\sin(\alpha_{\delta} + \Delta\alpha_{\delta})},$$

получим, в частности:

$$\begin{aligned} R_a &= G_k \frac{\sin(\alpha_{\delta})}{\sin(\Delta\alpha_{\delta})} = G_k \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha_{\delta})}}{\sin(\Delta\alpha_{\delta})} = \\ &= G_k \frac{\sqrt{1 - (G_{гр}/(nR))^2}}{\sin(\Delta\alpha_{\delta})}. \end{aligned} \quad (8)$$

В данном выражении была использована формула (5). Итак, для того, чтобы определить величину полной аэродинамической силы, необходимо знать R и $\Delta\alpha_{\delta}$.

Величину полной аэродинамической силы R_a можно также выразить из теоремы косинусов путем следующих преобразований:

$$\begin{aligned} G_k^2 &= R^2 + R_a^2 - 2RR_a \cos(\Delta\alpha_{\delta}) + R^2 \cos^2(\Delta\alpha_{\delta}) - \\ &\quad - R^2 \cos^2(\Delta\alpha_{\delta}), \end{aligned}$$

откуда:

$$G_k^2 - R^2 + R^2 \cos^2(\Delta\alpha_{\delta}) = (R_a - R \cos(\Delta\alpha_{\delta}))^2,$$

и

$$G_k^2 + R^2 (\cos^2(\Delta\alpha_{\delta}) - 1) = (R_a - R \cos(\Delta\alpha_{\delta}))^2,$$

и

$$G_k^2 - R^2 \sin^2(\Delta\alpha_{\delta}) = (R_a - R \cos(\Delta\alpha_{\delta}))^2,$$

откуда окончательно получим:

$$R_a = R \cos(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) + \sqrt{G_k^2 - R^2 \sin^2(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}})}. \quad (9)$$

Здесь $R = G_{гр} / (n \cos \bar{\alpha})$,

$$\cos \bar{\alpha} \approx \sqrt{1 - \left(1 / \left(\sqrt{\pi^2 - 1} + \pi k \right) \sin(\pi / n) \right)^2},$$

$$a \quad R_a = G_k \cdot \sqrt{1 - \left(G_{гр} / (nR) \right)^2} / \sin(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}).$$

Для вычисления R необходимо ввести параметры: $G_{гр}$, n , k . Вычислим R и представим уравнение (9) в виде:

$$G_k \cdot \sqrt{1 - \left(G_{гр} / (nR) \right)^2} / \sin(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) = R \cos(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) + \sqrt{G_k^2 - R^2 \sin^2(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}})} \quad (10)$$

Уравнение (10) является трансцендентным относительно значения $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$, и оно не может быть явно выражено из этого уравнения. Однако решение можно получить графическим методом.

Обозначив левую часть уравнения (10) как $y1(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}})$, а правую – как $y2(\Delta\alpha_{\bar{\alpha}})$, построим графики этих функций в одной и той же системе координат.

Тогда точка пересечения графиков этих функций и даст нам искомое решение $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$ – угол наклона вектора полной аэродинамической силы купола R_a к вектору тягового усилия \bar{R} отдельного купола. На рис.14 представлены графики искомых функций, где $x = \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$ для заданных начальных условий: $G_{гр} = 10000\text{н}$, $G_k = 1000\text{н}$, $n = 3$, $k = 0$. По результатам расчетов: $R = 3616\text{н}$, $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}} \approx 0,085\text{рад} \approx 4^\circ 53'$.

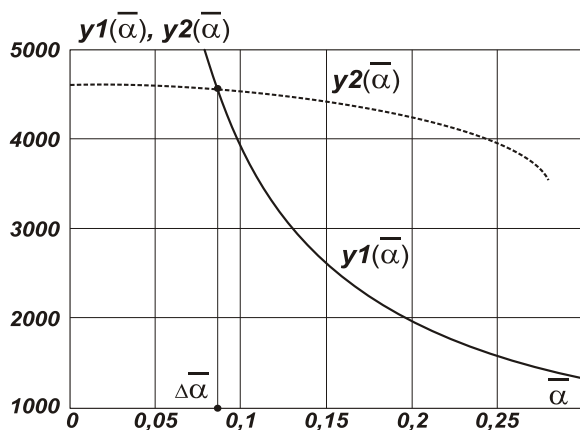


Рис. 14. Определение угла отклонения $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$ как абсциссы точки пересечения кривых $y1(x)$, и $y2(x)$

Здесь график $y1(x)$ – круто ниспадающая кривая; график $y2(x)$ – более пологая кривая. Абсцисса x точки пересечения кривых есть искомое значение

угла наклона вектора полной аэродинамической силы купола R_a к вектору тягового усилия \bar{R} отдельного купола $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$.

Интересно отметить, что ордината точки пересечения кривой $y2(x)$ с осью ординат ($x = \Delta\alpha_{\bar{\alpha}} = 0$), численно равна сумме: $R + G_k$.

Теперь, когда известен угол $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}}$, легко рассчитать по формуле (8) полную аэродинамическую силу одиночного купола.

Для нашего примера, это будет: $R_a = 4565\text{Н}$.

Теперь можно рассчитать коэффициент полной аэродинамической силы одиночного купола трехкупольной связки, установленного в потоке под балансирующим углом $\alpha_{\bar{\alpha}} = 22^\circ 49'$, $\Delta\alpha_{\bar{\alpha}} \approx 4^\circ 53'$:

$$c_R(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) = \frac{2R_a}{F_{\Pi} \rho V_{\text{сн}}^2}. \quad (11)$$

Скорость установившегося снижения для трехкупольной системы с площадью базового купола $F_{\Pi} = 300\text{м}^2$ рассчитаем по формуле:

$$V_{\text{сн}} \approx 5,22 \sqrt{\frac{(m_{гр} + m_{\text{вгс}})}{n F_{\Pi}}} = 5,22 \sqrt{\frac{1100}{3 \cdot 300}} = 5,77 \text{ м/с}.$$

Тогда коэффициент полной аэродинамической силы одиночного купола связки:

$$c_R(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) = \frac{2R_a}{F_{\Pi} \rho V_{\text{сн}}^2} = 0,761.$$

Коэффициенты подъемной силы и силы лобового сопротивления одиночного купола связки установленного под балансирующим углом $\alpha_{\bar{\alpha}}$:

$$\begin{aligned} c_x &= c_R \cos(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}), \\ c_y &= c_R \sin(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}). \end{aligned} \quad (12)$$

Для нашего примера:

$$\begin{aligned} (\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) &= 17^\circ 56', \\ \cos(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) &= 0,9514, \\ \sin(\alpha_{\bar{\alpha}} - \Delta\alpha_{\bar{\alpha}}) &= 0,308. \end{aligned}$$

Тогда

$$c_x = 0,724, \quad c_y = 0,234.$$

В заключение данной работы может быть представлен краткий алгоритм выбора параметров и оценки характеристик МКС.

Алгоритм методики выбора параметров и оценки характеристик МКС заключается в следующем.

1. Задаться предельно допустимой скоростью снижения $V_{\text{пр,сн}}$ системы груз-МКС по условиям безопасности посадки груза.

Установить статистическую оценку среднеквадратического отклонения для посадочной скорости, рассчитать статистическую оценку математического ожидания скорости снижения в момент посад-

ки $V_{сн}$ для заранее заданной односторонней доверительной вероятности.

2. Выбрать тип базового парашюта для связки, установить значения его площади купола $F_{П}$, коэффициента сопротивления $c_{П}$ и веса купола $G_{К}$ (включая вес его соединительных звеньев).

3. По данным статистики аналогов оценить коэффициент сопротивления связки МКС: $c_{ПМКС}$.

4. Задаться весом десантируемого груза: $G_{Гр}$.

5. Оценить требуемое число куполов в связке по формуле (1).

В случае, если получается дробное число, оно округляется до ближайшего целого в большую сторону.

6. Рассчитать величину балансирующего угла $\bar{\alpha}$ соприкасающихся куполов в связке по формулам (2), (3) или (4).

7. Оценить тяговое усилие R в каждом соединительном звене каждого купола осесимметричной связки по формуле (5).

8. Рассчитать $\Delta\alpha_6$ – угол наклона вектора полной аэродинамической силы купола \bar{R}_a к вектору тягового усилия \bar{R} отдельного купола, используя формулу (10).

9. Рассчитать по формуле (8) полную аэродинамическую силу R_a одиночного купола.

10. Рассчитать коэффициент полной аэродинамической силы $c_R(\alpha_6 - \Delta\alpha_6)$ одиночного купола по формуле (11).

11. Рассчитать коэффициенты подъемной силы c_y и силы лобового сопротивления c_x одиночного купола связки, установленного под балансирующим углом α_6 .

12. Если коэффициент лобового сопротивления одиночного купола c_x на балансирующем угле

α_6 окажется больше коэффициента сопротивления связки куполов, то необходимо выбрать небольшой шаг по балансирующему углу $\Delta\alpha_6$ и, увеличив на его величину угол $\bar{\alpha}$, перейти к пункту 5 настоящего алгоритма и повторить расчет до пункта 12.

Итерационный процесс повторяется m раз до тех пор, пока коэффициент лобового сопротивления одиночного купола c_x на новом балансирующем угле $\alpha_6 = \bar{\alpha} + m\Delta\alpha_6$ не окажется равным коэффициенту сопротивления связки куполов $c_{ПМКС}$.

Этот балансирующий угол и будет приближенно равен аэродинамическому балансирующему углу, на котором установятся купола связки в процессе установившегося снижения.

Выводы

1. В первом приближении рассмотрен один из этапов процесса проектирования многокупольных парашютных систем.

2. Представлен алгоритм выбора геометрических параметров системы и выведены зависимости, выражающие их взаимное влияние

3. Предложен алгоритм методики выбора параметров и характеристик МКС.

Список литературы

1. Лобанов, Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов [Текст] / Н.А. Лобанов. – М.: Машиностроение, 1965. – 363 с.

2. Стасевич, Р. А. Основы проектирования и расчета грузовых парашютных систем [Текст] / Р.А. Стасевич. – Ленинград: ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1969. – 110 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. Х.В. Раковский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ БАГАТОКУПОЛЬНИХ ПАРАШУТНИХ СИСТЕМ

Н.Ю. Беріславський, П.І. Іванов, Р.П. Іванов

У статті розглядається процес проектування багатокупольних парашютних систем. Представлено алгоритм вибору геометричних параметрів системи і виведені залежності, що виражають їх взаємний вплив. Розглянуто системи з кількістю куполів до дев'яти та проаналізовано особливості їх роботи, а також можливі варіанти відмов, обумовлені геометрією їх горизонтальних проєкцій. Видані рекомендації по діапазонах обмеження теоретичних залежностей. Розглянуті практичні приклади. Результати даної роботи можуть бути корисні фахівцям, які займаються питаннями проектування та випробування парашютної техніки.

Ключові слова: багатокупольна парашютна система, одиночний купол, балансувальний кут парашюта зв'язки.

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF MULTY-CANOPY PARACHUTE SYSTEMS

N.Y. Berislavsky, P.I. Ivanov, R.P. Ivanov

This article discusses the design process of multy-canopy parachute systems. There is presented an algorithm for selection of geometric system parameters and displayed dependencies expressing their mutual influence. There are considered systems with up to nine canopies and analyzed the characteristics of their work, as well as possible failures due to the geometry of their horizontal projections. There were given recommendations on ranges of theoretical dependencies limitations. Practical examples were considered. The results of this work can be useful for specialists involved in the design and testing of parachute equipment.

Keywords: multy-canopy parachute system, single canopy, balancing angle of parachute clusters.