

## ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОКУПОЛЬНЫХ ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ

Иванов П.И.<sup>1\*</sup>, Бериславский Н.Ю.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт аэроупругих систем,  
НИИ АУС, ул. Гарнаева, 85, Феодосия, Республика Крым, 298112, Россия

<sup>2</sup> Феодосийский испытательный центр (морской)  
969-го Государственного лётно-испытательного центра им. В.П. Чкалова,  
ГЛИЦ 969, ул. Гагарина, 8, Феодосия, пгт. Приморский, Республика Крым, 298177, Россия

\* e-mail: Ivanovpetr@rambler.ru

\*\* e-mail gvardeec82@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.01.2020

Многокупольные системы (МКС), применяемые в отрасли парашютостроения, являются весьма перспективным средством спасения при десантировании тяжелых грузов и техники. В данной статье представлен краткий анализ некоторых проблемных вопросов, с которыми часто приходится сталкиваться при проектировании и испытаниях многокупольных парашютных систем, требующих еще своего детального исследования.

*Ключевые слова:* многокупольная парашютная система, связка однокупольных парашютов, купол-лидер, коэффициент сопротивления связки куполов, устойчивость многокупольной парашютной системы.

### Введение

Многокупольная парашютная система представляет собой связку (соединенных вместе) однокупольных парашютов (рис. 1), т.е. это пара-



Рис. 1. Многокупольная парашютная система

шютная система, состоящая из двух и более парашютов.

Основным преимуществом МКС перед однокупольными парашютными системами (ПС) является возможность их эффективного использования при десантировании тяжелых и сверхтяжелых грузов (военной техники, ступеней ракет и др.).

Вопросами многокупольных парашютных систем занимались известные ученые отрасли парашютостроения, такие, как О.В. Рысев, О.П. Перов, А.И. Антоненко, Ф.Г. Герасимато, С.П. Котова и многие другие [1–21]. Большие работы по испытаниям моделей связок МКС проводились также в аэродинамических трубах ЦАГИ.

Замена одного парашюта связкой МКС позволяет:

— уменьшить среднее время наполнения и потерю высоты при наполнении связки по сравнению с одиночным парашютом аналогичной площади, т.е. снизить высоту десантирования, так как, например, развитие современных средств обнаружения особенно остро ставит вопрос об уменьшении высоты десантирования;

— устранить сложности изготовления и эксплуатации парашютной системы большой площади, т.е. упростить технологию изготовления и эксплуатации ПС; существенно упростить укладку и монтаж ПС;

— повысить устойчивость куполов в связке и устойчивость снижения груза. Связка парашютов, составленная из неустойчивых куполов, в ряде случаев может стать устойчивой;

— повысить надежность работы ПС за счет резервирования. Это так называемый нагруженный резерв, когда параллельно функционируют одновременно несколько парашютов;

— проводить широкую унификацию при разработке серийных ПС;

— удобно размещать (распределять) ПС в уложенном состоянии на объекте десантирования.

В связи с появлением МКС возникает ряд до конца еще не исследованных и малоизученных вопросов:

1. Почему в одних МКС при установившемся снижении купола не соприкасаются, а в других — соприкасаются?

2. Почему в одних МКС купола устойчивы, а в других — неустойчивы и имеют тенденцию к закручиванию?

3. Почему в одних случаях коэффициент сопротивления связки куполов меньше, чем коэффициент сопротивления отдельного купола, а в других — больше?

Перечисленные выше, а также ряд других вопросов, заставляют проводить тщательные исследова-

ния с многокупольными парашютными системами.

Одним из неприятных факторов, порождаемых связкой куполов в процессе ее наполнения, является наличие купола-лидера. Это первый купол, начинающий наполнение в связке, площадь входного сечения которого, как правило, больше, чем у других куполов связки (рис. 2).

Из-за большой начальной скорости наполнения (скоростного напора) и большой массы груза он оказывается в самых жестких условиях по аэродинамической нагрузке и условиям прочности конструкции.

Поскольку заранее неизвестно, какой из куполов будет лидером (начнет первым свое интенсивное наполнение в связке), все купола связки приходится существенно упрочнять, рассчитывая на то, что любой из них может стать лидером. А это приводит к переутяжелению и увеличению массы связки парашютов в целом, что является весьма нежелательным. При этом масса МКС может оказаться весьма значительной, превышающей предельно допустимое значение по техническому заданию (ТЗ).

В этой связи до настоящего времени еще существует проблема поиска конструкторских решений для оптимального решения задачи купола-лидера. Так, например, делались попытки заранее назначить переупрочненный купол лидером, однако, насколько известно авторам, они не принесли стабильного желаемого результата.

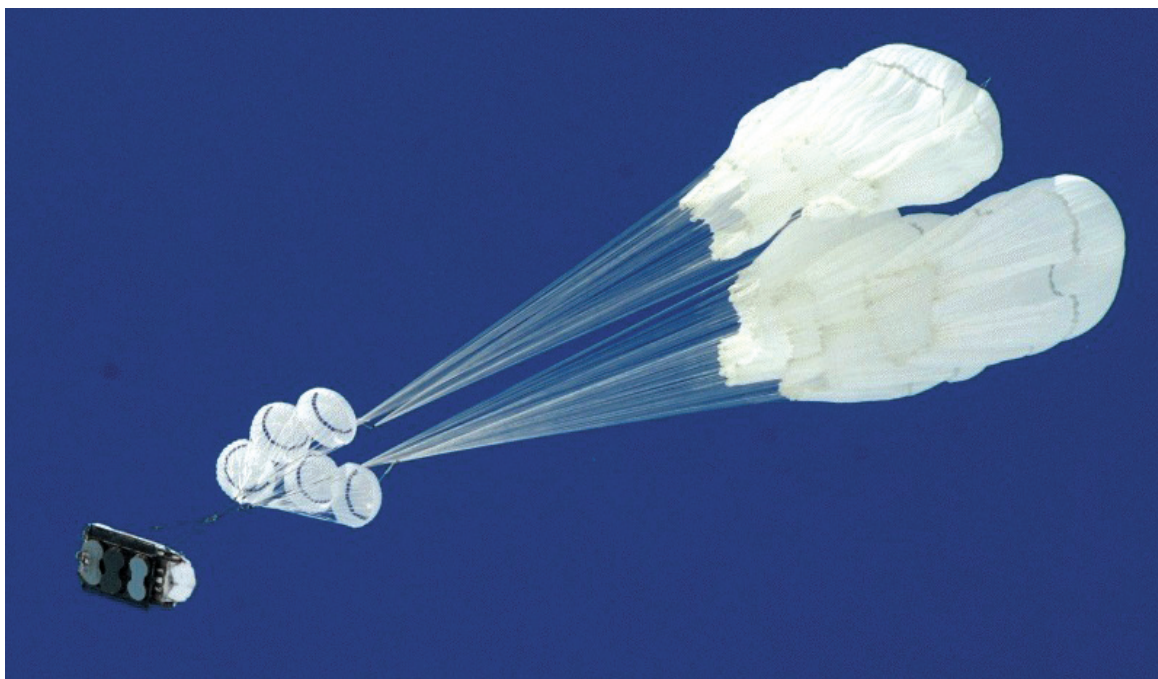


Рис. 2. Наполнение связки куполов с куполом-лидером

Летно-испытательные исследования и результаты эксплуатации МКС за последние 30—40 лет показали следующее.

Взаимное влияние куполов связки друг на друга — интерференция — приводит к уменьшению коэффициентов сопротивления  $c_{\text{п}}$  и коэффициента динамичности  $k_{\text{д}}$  связки, по сравнению с этими же характеристиками одиночного купола. Кроме того, контактное взаимодействие куполов связки между собой приводит к механическим повреждениям и ожигаемости основы и силового каркаса куполов, что снижает их прочность и срок службы.

Интерференция куполов обусловлена как специфической структурой процесса обтекания связки (аэродинамический фактор), так и динамикой взаимодействия куполов в процессе наполнения и в процессе снижения в полностью наполненном состоянии.

Касание куполов, взаимное затенение, а также и то, что в результате отклонения осей парашютов от оси набегающего потока уменьшается эффективная площадь, участвующая в создании сопротивления, приводит к снижению  $c_{\text{п}}$  системы с ростом числа куполов в связке.

Коэффициент сопротивления связки куполов определяется по формуле

$$c_{\text{п}} = \frac{2G}{nF_{\text{п}}\rho_0V_{\text{сн}}^2},$$

где  $G$  — вес груза;  $n$  — число куполов в связке;  $F_{\text{п}}$  — площадь одного купола в связке;  $\rho_0$  — плотность воздуха на уровне моря по стандартной атмосфере;  $V_{\text{сн}}$  — скорость снижения (посадочная).

Чем меньше посадочная скорость, тем больше коэффициент сопротивления связки куполов.

Коэффициент сопротивления системы  $c_{\text{п сист}}$  (плоский круг в раскрое; конусный парашют) уменьшается с увеличением числа куполов в связке по сравнению с  $c_{\text{п}}$  одиночного купола.

Некоторые интересные сведения о коэффициентах сопротивления парашютов больших площадей основного класса приведены в таблице.

Большой разброс в значениях коэффициентов сопротивления (большие значения дисперсий) как для одиночных куполов, так и для связок парашютов связан с тем, что коэффициент сопротивления обратно пропорционален квадрату посадочной скорости. Поэтому относительно небольшие изменения скорости за счет разброса параметров атмосферы, влияния приземной атмосферной турбулентности, изменения посадочного веса груза, геометрии и площади купола приводят к су-

#### Коэффициенты сопротивления парашютов основного класса с большими площадями

$F_{\text{п}}, \text{м}^2$	$c_{\text{п ср}}$	$F_{\text{п}}, \text{м}^2$	$c_{\text{п ср}}$
1000	0,8	760×1	0,807
574	0,65	760×2	0,907
600	1	760×3	0,73
540×1	0,822	760×4	0,866
540×2	0,825	760×5	0,874

ществленным изменением коэффициента сопротивления парашюта большой площади или связки куполов.

То есть коэффициент сопротивления парашюта является характеристикой, более чувствительной к изменению посадочных условий, чем сама вертикальная составляющая посадочной скорости, что следует всегда иметь в виду при сравнении характеристик различных парашютов.

Из определения коэффициента динамичности парашюта (согласно ГОСТ 21452-88) как отношения максимальной нагрузки при наполнении купола к установившейся нагрузке наполненного купола следует:

$$k_{\text{д}} = 2 \frac{V^2}{V_0^2},$$

где  $V_0$  — скорость системы объект—парашют в момент начала наполнения купола;  $V_{\text{н}}$  — скорость системы к моменту окончания процесса наполнения [7].

Чем больше коэффициент динамичности, тем энергичнее наполняется купол и тем выше аэродинамическая нагрузка на парашют.

Снижение коэффициента динамичности связки, по сравнению с одиночным куполом, обусловлено тем, что купола связки вступают в работу последовательно, растягивая во времени процесс нагружения системы, что и снижает значение коэффициента динамичности связки.

С целью снижения аэродинамической нагрузки на купола связки, ограничивают их скорость раскрытия путем введения рифления по нижней кромке купола каждого парашюта связки, что ограничивает начальное значение площади входного сечения каждого купола (см. рис. 2).

Параметр рифления купола парашюта:

$$\varnothing = \frac{l_{\text{р}}}{2\pi R},$$

где  $l_{\text{р}}$  — длина пояса рифления;  $R$  — радиус купола в раскрое.

Используемые в настоящее время значения параметра рифления парашютов основного класса находятся в диапазоне от 0,12—0,18, причем оптимальным в большинстве случаев можно считать параметр  $\varnothing = 0,14 \div 0,16$ . Рифление позволяет задержать во времени процесс раскрытия, снизить нагрузку на парашюты как в первой (до рифления), так и во второй (после рифления) фазе в процессе наполнения, что позволяет облегчить парашюты связки и уменьшить их массу и объем целом.

При всех значениях параметра рифления от  $\varnothing = 0,12$  до  $\varnothing = 0,18$  в аэродинамической трубе купола не контактировали — отходили друг от друга, и  $c_{\text{п сист}}$  системы был выше  $c_{\text{п}}$  одиночного купола.

Снижение аэродинамической нагрузки на связку куполов достигается также за счет введения в конструкцию связки тормозных парашютов, число которых, в основном, соответствует числу основных куполов парашютов (см. рис. 1, 2).

При введении в действие МКС, в процессе вытягивания основных куполов связки, первыми в работу торможения груза вступают тормозные парашюты, как правило расположенные вблизи соединительных звеньев основных парашютов связки с грузом. Они достаточно быстро раскрываются (в силу небольших размеров и площадей) и эффективно снижают скорость груза уже к моменту выхода купола-лидера связки основных куполов в фазу с рифлением. В силу этого несколько смягчается режим работы лидера и остальных куполов по скоростному напору. Однако, поскольку связка тормозных парашютов создает достаточно мощный спутный след, ухудшаются условия наполнения связки куполов основных парашютов, увеличивается суммарное время их наполнения. Кроме того, из-за больших габаритных размеров десантируемых грузов (техника и др.) спутный след грузов влияет на работу связки тормозных парашютов: не все они могут наполниться вовремя, например из-за скручивания строп и других аэродинамических и динамических эффектов.

Снижения аэродинамической нагрузки можно достичь также введением конструктивной проницаемости по поверхности куполов парашютов связки [23].

Все сказанное выше, в совокупности с собственной интерференцией основных парашютов, может приводить к длительным задержкам по времени наполнения отдельных куполов связки или даже к их ненаполнению. При этом существенно возрастает дисперсия (разброс) времени

наполнения основных куполов связки. Проблема неодновременности наполнения куполов в связке является одной из важных, требующих своего решения.

Введение удлинительных стренг в систему приводит к уменьшению углов наклона осей куполов к направлению потока, увеличению эффективной площади сопротивления и повышению коэффициента  $c_{\text{п}}$  связки. При очень больших длинах соединительных звеньев коэффициент сопротивления связки стремится к коэффициенту сопротивления одиночного купола.

В трубном эксперименте была получена зависимость относительного коэффициента сопротивления системы в связке от числа куполов и относительной длины удлинительной стренги. Анализ ее показывает, что с уменьшением длин удлинительных звеньев возрастает интенсивность падения коэффициента сопротивления связки по сравнению с коэффициентом сопротивления одиночного купола связки.

По результатам экспериментов установлена следующая зависимость:

$$c = \frac{c_{\text{п сист}}}{c_{\text{п один}}} = -0,051 \cdot \bar{l}^2 + 0,26 \cdot \bar{l} + 0,62, \quad 0,4 \leq \bar{l} \leq 2,5.$$

Здесь  $\bar{l} = \frac{l_{\text{стр}} + l_{\text{зв}}}{d}$  — относительное удаление груза

от плоскости входного отверстия центрального купола;  $d$  — диаметр купола в раскрое;  $l_{\text{стр}}$  — длина строп;  $l_{\text{зв}}$  — длина соединительного звена.

На рис. 3 приведен график поведения данной эмпирической зависимости.

Как видно из графика, с увеличением относительного удаления груза от кромки купола  $c_{\text{п сист}}$  возрастает и достигает своего максимума в райо-

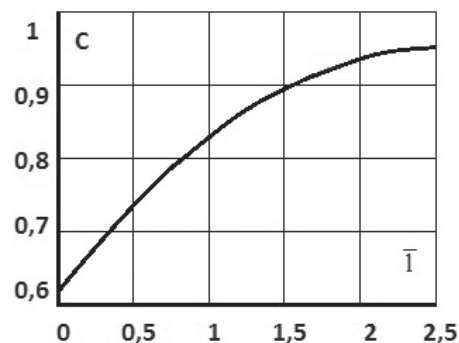


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента сопротивления от относительного удаления купола от груза

не  $\bar{T} \approx 2,4$ . Однако при этом нужно иметь в виду, что с возрастанием удаления куполов от груза вместе с длиной возрастает и масса соединительных и удлинительных звеньев, что весьма нежелательно. Поэтому приходится идти на компромисс и выбирать длину их в пределах  $\bar{T} \approx 1,5...2$ .

Установлено также, что с увеличением числа  $n$  куполов в связке отношение коэффициентов сопротивлений падает:

$$\frac{c_{\text{купола в связке}}}{c_{\text{одиночного купола}}} = f(n),$$

т.е. сопротивление одиночного купола в связке уменьшается с ростом числа куполов в связке. Причиной этого также является интерференционное взаимодействие парашютов в связке — сдавливание куполов центра периферийными, уменьшение площадей их миделя и, как следствие, уменьшение коэффициентов их сопротивления.

Кроме того, исследования трехкупольных моделей в аэродинамических трубах показали необходимость введения удлинительных звеньев для обеспечения устойчивости ПС. В трехкупольной системе без соединительных звеньев купола вращаются, касаются друг друга, происходит закручивание строп.

Введение удлинительных звеньев повышает качество работы системы — исчезает тенденция к закручиванию, купола отходят друг от друга. Коэффициент сопротивления связки увеличивается от  $c_{\Pi} = 0,6$  до  $0,65$  при  $\bar{T} = 1,65$ .

Конусные модели куполов в связке без удлинительных звеньев полностью не раскрывались, форма куполов была деформированной, входные отверстия были искажены. Введение удлинительных звеньев  $\bar{l}_{\text{зв}} = \frac{l_{\text{зв}}}{d} = 0,46$  (т.е.  $\bar{T} = 1,6$ ) дает удовлетворительную картину. Купола полностью наполняются, устойчивы.

Вместе с тем введение удлинительных звеньев у конусных куполов приводит к уменьшению устойчивости системы — купола начинают колебаться, появляется опасность сцепления строп, закручивания и запутывания их. Устойчивость их примерно такая, как если вместо введения удлинительных звеньев произвести удлинение строп в таком же отношении.

При исследовании системы конусных парашютов была обнаружена неодновременность раскрытия куполов, ведущая к уменьшению коэффи-

циента динамичности  $k_{\text{д}}$  связки, по сравнению с  $k_{\text{д}}$  одиночного купола. Не было ни одного эксперимента, в котором бы наблюдалось одновременное раскрытие куполов. Всегда раскрывался вначале один купол, раскрытие других задерживалось.

Поэтому для связки была предложена следующая формула для расчета коэффициента динамичности системы:

$$k_{\text{д сист}} = \frac{(n-1) + k_{\text{д1}}}{n},$$

где  $n$  — число куполов в связке;  $k_{\text{д1}}$  — коэффициент динамичности одиночного купола. График функции  $k_{\text{д сист}} = f(n)$  при  $k_{\text{д1}} = 1,5$  представлен на рис. 4.

Как видно из графика, наиболее сильно коэффициент динамичности уменьшается при формировании связки от двух до пяти куполов, далее скорость его уменьшения замедляется.

Крайне важным параметром при низковысотном десантировании является потеря высоты при наполнении связки парашютов МКС.

На моделях была получена следующая эмпирическая зависимость потери высоты при наполнении от основных параметров МКС:

$$\Delta \bar{H}_n = 0,053n^{0,84} K_W^{0,28} N^{0,75} Fr^{-0,50} (\pi - \theta_0)^{2,59},$$

где  $\Delta \bar{H}_n = \frac{\Delta H_n}{\sqrt{F_{\Pi}}}$  — относительное изменение по-

тери высоты за время наполнения;  $n$  — количество парашютов в связке;  $K_W$  — воздухопроницаемость ткани купола парашюта;  $N$  — число Ньютона;  $Fr$  — число Фруда;  $\theta_0$  — траекторный угол в момент начала наполнения системы.

Последняя зависимость применима для МКС основного класса, образованных из круглых па-

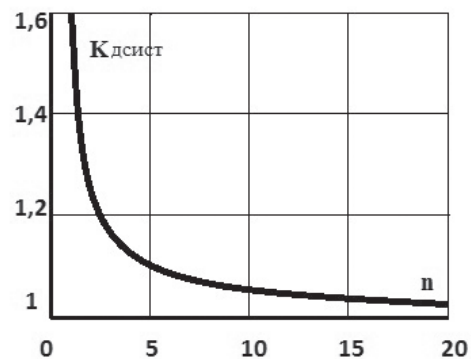


Рис. 4. Зависимость коэффициента динамичности связки от числа куполов в связке

рашютов путем соединения их в связку простой конструкции при следующих значениях параметров:

$$n = 2 \div 6; K_W = 0,02 \div 0,2; N = 5 \div 20;$$

$$Fr = 12 \div 64; \theta_0 = 20^\circ \div (-90^\circ).$$

Также была получена и другая эмпирическая зависимость потери высоты десантируемым объектом за время наполнения МКС:

$$\Delta H_n = c \cdot \sin \theta_{cp} \cdot \sqrt{F_n^\Sigma} \cdot \frac{n-m+2}{2\sqrt{n}},$$

где  $\Delta H_n$  — потеря высоты при наполнении МКС;  $c$  — экспериментальный коэффициент;  $\theta_{cp}$  — среднее значение траекторного угла;  $F_n^\Sigma$  — суммарная площадь связки куполов МКС;  $n$  — количество парашютов в связке;  $m$  — количество одновременно наполнившихся парашютов.

Минимум потери высоты при наполнении МКС имеет место при количестве парашютов в связке, равном

$$n_{opt} = \frac{2}{1-\bar{m}},$$

где  $n_{opt}$  — количество парашютов в связке, соответствующее минимуму потери высоты при наполнении;  $\bar{m}$  — коэффициент одновременности;  $n_{opt} = 4$  при  $\bar{m} = 0,5$ .

Зависимость количества парашютов, минимизирующих потерю высоты, от коэффициента одновременности наполнения куполов связки  $n = f(\bar{m})$  представлена на рис. 5.

Как видно из графика, количество куполов в связке, минимизирующих потерю высоты при наполнении, резко возрастает в диапазоне  $\bar{m} > 0,6$ .

В этой связи возникает задача получения максимального значения коэффициента одновременности

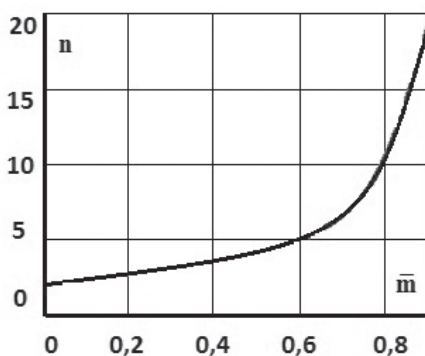


Рис. 5. График функции  $n = f(\bar{m})$

менности благодаря удачным конструктивным приемам, способам и методам проектирования и исполнения связок куполов.

Коэффициент одновременности наполнения зависит от числа Ньютона  $N$ , характеризующего класс ПС, и для  $N = 0 \div 6$  может быть представлен зависимостью:

$$\bar{m} = 0,0375N^2 - 0,2875N + 1.$$

Для ПС тормозного класса ( $N = 0 \div 0,2$  и куполов малых площадей) в отдельных случаях (при отсутствии мощного спутного следа от объекта) коэффициент  $\bar{m}$  одновременности может принимать значение, близкое к единице.

Минимальную потерю высоты с момента начала вытягивания основного парашюта и до выхода системы «объект—парашют» на вертикаль и достижения установившейся скорости снижения обеспечивает МКС с количеством парашютов в связке  $n = 3 \div 5$  (при коэффициенте одновременности  $\bar{m} = 0,5$ ).

Результаты расчетов показали, что с увеличением  $\bar{m}$  минимум потери высоты смещается в сторону большого количества парашютов и уменьшается по абсолютной величине.

Минимальная потеря высоты имеет место при десантировании объектов больших масс со скоростью снижения 17—22 м/с и для диапазона масс 5—25 т и составляет 150—250 м, а в диапазоне скоростей снижения 15—30 м/с не превышает 300 м. При увеличении коэффициента одновременности  $\bar{m}$  с 0,5 до 1,0 потеря высоты уменьшается в 1,5—2,0 раза.

Минимальную потерю высоты обеспечивает МКС, составленная из парашютов с куполами конструкции типа «плоский круг в раскрое» с минимальной проницаемостью и с различными конструктивными особенностями, ускоряющими процесс раскрытия.

Минимальную потерю высоты также обеспечивает схема с непосредственным введением в действие основных парашютов без рифления.

Важным является вопрос обеспечения устойчивости системы «груз—МКС».

В теории трехмерной динамической устойчивости системы «объект—парашют» с пятью степенями свободы показано, что возможны четыре вида движения системы [8]:

- устойчивое вертикальное снижение;
- устойчивое планирование;
- раскачивание с большими углами крена;
- коническое вращение с большим углом раствора конуса вращения.

Установлено также, что система, устойчивая при малых возмущениях параметров движения, может быть неустойчива при больших возмущениях.

Эксперимент показывает, что в связке может изменяться характер работы куполов.

Устойчивые купола в связке могут быть неустойчивыми. Известны случаи, когда неустойчивые купола в связке становились устойчивыми, как в процессе наполнения, так и в процессе установившегося снижения.

С увеличением числа куполов в связке устойчивость системы возрастает. Причина этого факта, вероятно, в ограничении степеней свободы для куполов связки, что делает ее более устойчивой.

Кратко основные выводы по исследованиям устойчивости МКС можно сформулировать в следующем виде:

1. С точки зрения устойчивости снижения системы «объект—парашют» предпочтительнее использовать МКС.

2. С увеличением количества парашютов в связке (более трех) максимальный угол раскачки объекта практически не изменяется.

3. Колебания системы «объект—парашют» с количеством парашютов в связке больше трех практически не зависят от конструкции парашютов.

4. При количестве парашютов в связке от одного до трех существенное влияние на колебания системы оказывает конструкция парашютов.

Основным показателем качества работы системы «объект—МКС» является надежность [18].

1. Полная надежность МКС, определяемая как вероятность выдерживания скорости установившегося снижения в заданных пределах с учетом всех возможных вариантов отказов парашютов в связке, зависит от их количества и имеет минимум, положение которого зависит от значения коэффициента  $\alpha$ , характеризующего допустимый разброс скорости снижения. При увеличении коэффициента  $\alpha$  минимум смещается в сторону меньшего количества парашютов. При  $\alpha = 0,1$  минимум имеет место при  $n = 4$ , а при  $\alpha = 0,2$  — при  $n = 2$ .

2. При изменении количества парашютов от значения, соответствующего минимуму, до  $n = 10 \div 12$  полная надежность МКС монотонно возрастает.

3. При достижении определенного значения надежности отдельного парашюта в связке полная надежность МКС практически остается постоянной при изменении количества парашютов.

Надежность отдельного парашюта связки падает при увеличении количества парашютов из-за увеличения вероятности сдавливания его другими куполами.

Полная надежность — вероятность безотказной работы (ВБР) МКС —  $P_{\text{МКС}}$  при условии, что надежность  $p$  отдельного парашюта постоянна, определится по формуле произведения совместимых событий:

$$P_{\text{МКС}}(AB) = P(A)P\left(\frac{B}{A}\right).$$

Здесь  $P(A)$  — вероятность того, что в серии из  $n$  испытаний интересующее нас событие произойдет ровно  $i$  раз и определяется по формуле Бернулли для независимых повторных испытаний (биномиальное распределение вероятностей);

$P\left(\frac{B}{A}\right)$  — условная вероятность того, что в этой серии испытаний посадочная скорость не превысит предельного значения, заданного техническим заданием.

Окончательно формула для расчета надежности (вероятности безотказной работы) примет вид

$$P_{\text{МКС}} = \sum_{i=0}^{n-1} c_n^i p^{n-i} (1-p)^i \cdot P_{V/(n-i)},$$

где  $n$  — количество парашютов в связке;  $c_n^i$  — число сочетаний из  $n$  элементов по  $i$ ;  $p$  — надежность одного парашюта;  $P_{V/(n-i)}$  — условная вероятность выдерживания скорости  $V$  установившегося снижения в пределах, заданных техническим заданием, при отказе  $i$  парашютов.

При теоретической оценке надежности работы МКС используются математическая модель, включающая в себя граф состояний системы с учетом всех ее возможных переходов из состояния в состояние, в том числе всех возможных аварийных ситуаций [9], и метод статистического моделирования Монте-Карло.

Теоретическое расчетное значение вероятности безотказной работы связки МКС, как правило, не должно быть меньше 0,985 для односторонней доверительной вероятности  $\gamma = 0,95$ .

## Выводы

В кратком виде представлены некоторые важные результаты исследований многокупольных парашютных систем.

Рассмотрены следующие вопросы:

- преимущества и недостатки МКС; проблемные вопросы;
- проблема купола-лидера и интерференционное взаимодействие куполов в связке;
- коэффициент сопротивления и коэффициент динамичности куполов связки;
- методы снижения коэффициента динамичности и аэродинамической нагрузки на МКС за счет рифления куполов и применения тормозных парашютов;
- проблема неодновременности наполнения куполов в связке;
- влияние конструктивных факторов (удлинительных и соединительных звеньев), а также числа куполов в связке на некоторые характеристики МКС;
- потеря высоты при наполнении связки парашютов МКС;
- вопросы устойчивости системы «объект—МКС»;
- вопрос надежности функционирования системы «объект—МКС».

Естественно, что представленные результаты дают лишь некоторые отрывочные сведения, но не дают еще полной картины процесса функционирования МКС, позволяющей построить совершенную, цельную методику расчета и проектирования МКС. Требуются усилия ученых, конструкторов и испытателей парашютных систем с целью сбора и обработки информации по МКС, которая позволит выполнить детальный анализ и завершить начатую работу по построению методики функционирования МКС, которую можно будет в дальнейшем эффективно использовать в процессе проектирования МКС.

#### Библиографический список

1. *Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т.* Парашютные системы. — М.: Физматлит, 2009. — 576 с.
2. *Стасевич Р.А.* Основы проектирования и расчета грузовых парашютных систем: Учебное пособие. — Л.: Изд-во ЛВИКА им А.Ф. Можайского, 1969. — 110 с.
3. *Рысев О.В., Пономарев А.Т., Васильев М.И.* и др. Парашютные системы. — М.: Наука, 1996. — 288 с.
4. *Vishnyak A.A.* Parachute Simulations for ARIANE-5 Booster Recover System Design // 13th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference (15-18 May 1995; Clearwater Beach, FL, USA). AIAA-95-1593-CP, pp. 370-378. DOI: 10.2514/6.1995-1593
5. *Лобанов Н.А.* Основы расчета и конструирования парашютов. — М.: Машиностроение, 1965. — 363 с.
6. *Wolf D.E.* The dynamic stability of a nonrigid parachute and payload system // 8th Aerospace Sciences Meeting (19-21 January 1970; West Germany). DOI: 10.2514/6.1970-209
7. *Иванов П.И.* Летные испытания парашютных систем. — Феодосия: Гранд—С, 2001. — 332 с.
8. *Шибанов Г.П.* Эксплуатация и безопасность парашютных систем.— М.: Машиностроение. 2005. — 288 с.
9. *Рысев О.В., Вишняк А.А., Чуркин В.М., Юрцев Ю.Н.* Динамика связанных тел в задачах движения парашютных систем. — М.: Машиностроение, 1992. — 288 с.
10. *Wolf D.E.* A Simplified Dynamic Model of Parachute Inflation // Journal of Aircraft. 1974. Vol. 11. No. 1, pp. 28-33. DOI: 10.2514/3.60317
11. *Lester W.G.S., Phil M.A.D.* A Note on the Theory of Parachute Stability // Aeronautical research council. Reports and Memoranda no. 3352. 1962, pp. 48-61.
12. *Морозов В.И., Пономарев А.Т., Рысев О.В.* Математическое моделирование сложных аэроупругих систем. — М.: Физматлит, 1995.— 736 с.
13. *Агроник А.Г., Эгенбург Л.И.* Развитие авиационных средств спасения. — М.: Машиностроение, 1990. — 253 с.
14. *Алексеев С.М., Балкинд Я.В., Гершкович А.М.* и др. Средства спасения экипажа самолета. — М.: Машиностроение, 1975. — 431 с.
15. *Бериславский Н.Ю., Иванов П.И., Иванов Р.П.* Параметры и характеристики многокупольных парашютных систем // Наука и техника Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины. 2014. № 2. С. 58-66. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps\\_2014\\_2\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2014_2_15)
16. *Иванов П.И.* Вероятностные модели процесса функционирования многокупольных парашютных систем // Вестник Херсонского национального технического университета. 2008. № 2(31). С. 189—194.
17. *Соломатин И.И., Арабин М.В.* Учебное пособие по тяжелой воздушно-десантной технике. Ч.3. — М.: Военное издательство МО СССР, 1967. — 168 с.
18. *Чуркин В.М.* Динамика парашютных систем на этапе спуска. — М.: МАИ-ПРИНТ, 2008.— 184 с.
19. *Чуркин В.М., Серпичева Е.В., Силантьев В.М.* К оценке влияния аэродинамики груза на свободные колебания парашютной системы // Труды МАИ. 2003. №12. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34455>
20. *Чуркин В.М., Чуркина Т.Ю.* К анализу свободных колебаний парашютной системы с упругими стропами // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 3. С. 143-148.
21. *Иванов П.И., Куринный С.М., Криворотов М.М.* Асимметричность в процессе наполнения куполов парашютов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 7-16.



## PROBLEMATIC ISSUES OF FUNCTIONING OF MULTI-DOME PARACHUTE SYSTEMS

Ivanov P.I.<sup>1\*</sup>, Berislavskii N.Yu.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Research Institute of Aeroelastic Systems,  
85, Garnaeva str., Feodosia, Crimea Republic, 298112, Russia*

<sup>2</sup> *Feodosiya Testing Center (Marine)  
969-th State Flight-Testing Center named after V.P. Chkalova  
SFTC 969, Gagarin str., 8, Feodosiya, village Primorskiy, Republic of Crimea, 298177, Russia*

\* e-mail: Ivanovpetr@rambler.ru

\*\* e-mail: gvardeec82@mail.ru

### Abstract

Multi-dome parachute system (MPS) represents a bundle (connected together) of single-dome parachutes. The main advantage of the MPS over single-dome parachute systems (PS) consists in the possibility of their effective employing when heavy and super-heavy loads airdrop, such as military equipment, rocket stages, etc.

Replacing one parachute with an MPS bundle allows:

- reduce the average filling time and height loss when filling the bundle compared with a single parachute of the same area;

- eliminate manufacturing and operation complexity of a large area parachute system (PS), i.e. simplify of manufacturing and operation technology of the PS; significantly simplify parachute packing and PS installing;

- increase domes stability in the bundle and stability of the load descent. A bunch of parachutes composed of unstable domes could become stable in certain cases;

- increase the PS reliability due to the redundancy;

- bring about wide unification while of serial PS development;

- conveniently place (distribute) the PS in the laid state on the airdrop delivery object.

With a view to MPS advent, a number of incompletely explored and poorly studied issues arises, such as:

1. Why do some MPS domes adjoin each other at the steady descent, while the other do not?

2. Why the domes are stable in some MPS, while in the other they are unstable and tend to twisting?

3. Why in some cases the resistance coefficient of a bunch of domes is less than the one of an individual dome, and in the other is greater.

The above said, as well as a number of other issues induce performing thorough studies of multi-dome parachute systems. It was also revealed that a system

stable at small perturbations of motion parameters could be unstable at large perturbations.

The experiment shows that the nature of the domes operation can change in a bundle. Stable domes in a bundle can turn out to be unstable. There were cases when unstable domes in a bundle became stable, both in the process of filling and steady descent. The system stability increases with the number of domes increasing in the bundle. It was found that employing MPS was more preferable from the stability viewpoint of descent of the object-parachute system.

With an increase in the number of parachutes in a bundle from three and more, the maximum angle of the object's pitching practically did not change.

Fluctuations of the object-parachute system with more than three parachutes in a bundle practically independent from the parachute design.

With the number of parachutes in a bundle from one to three, the parachute design significantly affects the system fluctuations.

The article pays certain attention to the main quality indicator of the object-parachute system, namely its reliability.

To sum up, we note the following. The article briefly presents some important results of the study on multi-dome parachute systems. The following main issues were considered:

- the advantages and disadvantages of the MPS; problematic issues, which solving the MPS require;

- the problem of the leader dome and interference interaction of domes in a bundle;

- resistance coefficient and dynamic coefficient of the bundle domes;

- techniques for reducing dynamic coefficient value and aerodynamic load on the MPS due to the domes corrugation and the brake parachutes employing;

- the problem of non-simultaneous of domes filling in a bundle;

- design factors effect (extension and connecting links), as well as the number of domes in a bundle on some MPS characteristics;
- loss of height while the filling the MPS parachutes bundle;
- issues of the object-MPS system stability;
- the issue of the object-MPS system reliability.

**Keywords:** multi-dome parachute system, a bunch of single-dome parachutes, dome-leader, the coefficient of resistance of a bunch of domes, multi-dome parachute system stability

## References

1. Lyalin V.V., Morozov V.I., Ponomarev A.T. *Parashyutnye sistemy* (Parachute system), Moscow, Fizmatlit, 2009, 576 p.
2. Stasevich R.A. *Osnovy proektirovaniya i rascheta gruzovykh parashyutnykh sistem* (Fundamentals of design and calculation of cargo parachute systems), Leningrad, LVIKA im A.F. Mozhaiskogo, 1969, 110 p.
3. Rysev O.V., Ponomarev A.T., Vasil'ev M.I. et al. *Parashyutnye sistemy* (Parachute systems), Moscow, Nauka, 1996, 288 p.
4. Vishnyak A.A. Parachute Simulations for ARIANE-5 Booster Recover System Design. *13th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference (15-18 May 1995, Clearwater Beach, FL, USA)*. AIAA-95-1593-CP, pp. 370-378. DOI: 10.2514/6.1995-1593
5. Lobanov N.A. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya parashyutov* (Fundamentals of calculation and design of parachutes), Moscow, Mashinostroenie, 1965, 363 p.
6. Wolf D.E. The dynamic stability of a nonrigid parachute and payload system. *8th Aerospace Sciences Meeting (19-21 January 1970, West Germany)*. DOI: 10.2514/6.1970-209
7. Ivanov P.I. *Letnye ispytaniya parashyutnykh sistem* (Flight tests of parachute systems), Feodosiya, Grand-S, 2001, 332 p.
8. Shibanov G.P. *Ekspluatatsiya i bezopasnost' parashyutnykh sistem* (Operation and safety of parachute systems), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 288 p.
9. Rysev O.V., Vishnyak A.A., Churkin V.M., Yurtsev Yu.N. *Dinamika svyazannykh tel v zadachakh dvizheniya parashyutnykh sistem* (Dynamics of connected bodies in problems of parachute systems movement), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 288 p.
10. Wolf D.E. A Simplified Dynamic Model of Parachute Inflation. *Journal of Aircraft*, 1974, vol. 11, no. 1, pp. 28-33. DOI: 10.2514/3.60317
11. Lester W.G.S., Phil M.A.D. A Note on the Theory of Parachute Stability. *Aeronautical research council. Reports and Memoranda No. 3352*, 1962, pp. 48-61.
12. Morozov V.I., Ponomarev A.T., Rysev O.V. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh aerouprugikh sistem* (Mathematical modeling of complex aeroelastic systems), Moscow, Fizmatlit, 1995, 736 p.
13. Agronik A.G., Egenburg L.I. *Razvitie aviatsionnykh sredstv spaseniya* (Development of aviation salvation means), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 253 p.
14. Alekseev S.M., Balkind Ya.V., Gershkovich A.M. et al. *Sredstva spaseniya ekipazha samoleta* (Means of aircraft crew saving), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 431 p.
15. Berislavskii N.Yu., Ivanov P.I., Ivanov R.P. *Nauka i tekhnika Vozdushnykh Sil Vooruzhennykh Sil Ukrainy*, 2014, no. 2, pp. 58-66. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps\\_2014\\_2\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2014_2_15)
16. Ivanov P.I. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 2(31), pp. 189-194.
17. Solomatin I.I., Arabin M.V. *Uchebnoe posobie po tyazheloi vozdushno-desantnoi tekhnike* (Textbook on heavy airborne equipment), Moscow, Voennoe izdatel'stvo MO SSSR, 1967, part 3, 168 p.
18. Churkin V.M. *Dinamika parashyutnykh sistem na etape spuska* (Dynamics of parachute systems at the descent stage), Moscow, MAI- PRINT, 2008, 184 p.
19. Churkin V.M., Serpicheva E.V., Silant'ev V.M. *Trudy MAI*, 2003, no. 12. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34455>
20. Churkin V.M., Churkina T.Yu. The Analysis of free oscillations parachute Systems with elastic line. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 143-148.
21. Ivanov P.I., Kurinnyi S.M., Krivorotov M.M. Asymmetry in the parachute canopy filling process. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 7-16.