

Результаты численных исследований многокупольных парашютных систем

© С.Ю. Плосков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

В методологии аэродинамического проектирования многокупольных парашютных систем предусмотрена совместная реализация методов расчета надежности и методов механики сплошных сред. На основе разработанного автором программного комплекса исследовано влияние суммарной длины подвеса куполов в связке, угла установки парашюта в системе и их количества на аэродинамические характеристики таких систем. Проведен анализ особенностей обтекания многокупольных парашютных систем, набранных из обычных парашютов без рифления куполов и с рифлением. Впервые на основе данных численного моделирования продемонстрировано влияние резонансных явлений в вихревом следе на устойчивость связок парашютов. Проведен анализ результатов экспериментальных работ с многокупольными парашютными системами в аэродинамических трубах в России и за рубежом. Отмечены особенности купола, которые необходимо учитывать при построении многокупольных парашютных систем различных конфигураций и назначения.

Ключевые слова: парашют, методология аэродинамического проектирования парашютных систем, связка парашютов, многокупольная парашютная система, численные методы расчета парашютов, устойчивость парашютных систем, выбор облика парашютной системы

Введение. Современные парашютные системы нашли широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике. Основное преимущество многокупольных парашютных систем (МКС) заключается в возможности создания систем посадки на основе довольно простых технических решений — за счет объединения парашютных блоков. Это позволяет организовать ввод системы в действие и ее надежную работу в широком диапазоне высот и скоростей полета спасаемого объекта при возможном существенном изменении его располагаемых полетных масс.

Большое внимание разработке и исследованиям связок парашютов уделялось на всем протяжении создания парашютных систем после Второй мировой войны. Эти исследования нашли свое отражение в книгах У. Брауна [1], Н.А. Лобанова [2], Т. Кнаке [3]. Более современные отечественные исследования описаны в работе В.В. Лялина, В.И. Морозова и А.Т. Пономарева [4].

К фундаментальным экспериментальным исследованиям МКС в аэродинамических трубах относятся работы И.М. Носарева [5] и Дж. Брауна, У. Уолкотта [6]. В большинстве случаев экспериментальные исследования МКС как в России, так и за рубежом носили разрозненный характер и касались обработки конкретных систем.

В настоящее время благодаря развитию вычислительной техники стало возможным математическое моделирование подобных парашютных систем. Однако до сих пор очень мало известно о характеристиках течений внутри системы и в следе за парашютными связками.

Современный подход к проектированию МКС подробно изложен в работе П.И. Иванова и Н.Ю. Бериславского [7]. В ней рассмотрено решение некоторых вопросов, касающихся данной научной проблемы. Однако в указанной работе на большое количество поставленных вопросов так и не найдено ответа.

По мнению автора настоящей статьи, для ответов на эти вопросы алгоритм, представленный в статье [7], необходимо реализовать наоборот — основой проектирования облика многокупольных систем должна стать их надежность. Исходя из этой гипотезы в работе [8] была предложена методология аэродинамического проектирования МКС, синтезированная путем совместной реализации методов расчета надежности и методов механики сплошных сред.

После выбора соответствующих численных методик был разработан специализированный комплекс компьютерных программ. Указанное программное обеспечение имеет модульное построение, что позволило достаточно легко сформировать специализированный автоматизированный инструмент для анализа нестационарной отрывной аэродинамики многокупольных систем.

Для подтверждения работоспособности программного обеспечения и для оценки результатов моделирования проведены исследования в целях аэродинамического проектирования МКС, набранных из круглых парашютов без рифления и с рифлением.

Основная задача проведенных исследований — расчет суммарных и распределенных аэродинамических характеристик парашютных связок на этапе конечного спуска.

Определение аэродинамической конфигурации МКС. Определение конфигурации парашютной системы включает в себя выбор числа куполов, системы отсчета и геометрических параметров системы.

Выбор числа куполов в системе. Задача выбора конфигурации МКС должна решаться путем реализации метода структурных схем в виде простой методики, адаптированной для парашютных систем. Рассмотрим пример использования такого подхода на основе анализа парашютной системы космического спускаемого аппарата (КСА) Crew Dragon [9].

Расчетная схема метода структурных схем для МКС этого аппарата показана на рис. 1. Система имеет два пути работы, критических точек отказа нет. Путь работы системы (поток) включает в себя следующую цепочку: мортира — тормозной парашют — два основных парашюта. При вводе блоков основных парашютов возможно переключение между подсистемами левого и правого борта.

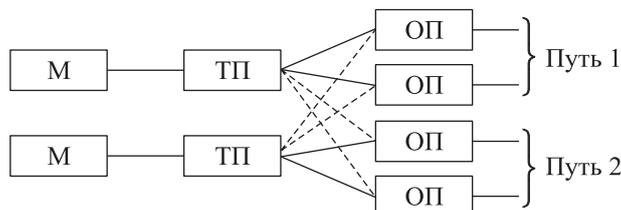


Рис. 1. Расчетная схема парашютной системы КСА Crew Dragon:
 М — мортира; ТП — тормозной парашют; ОП — основной парашют

Для основной парашютной системы допустим отказ одного парашюта. В самом простом случае, для одного пути работы, вероятность безотказной работы составляет $0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,998 = 0,996$. Для двух путей получаем следующую вероятность безотказной работы: $1 - (1 - 0,996)^2 = 0,99998 = 0,9(4)8$.

Соответственно, требуемая надежность системы по функционированию не менее 0,9999 определяет состав системы (две мортиры, два блока тормозных парашютов, четыре блока основных парашютов) и ее конфигурацию в виде реализации двух путей работы.

Были проведены сертификационные испытания расчетной посадочной конфигурации парашютной системы КСА Crew Dragon. Отрабатывались две аэродинамические схемы: четырехкупольная для случая штатной посадки и трехкупольная — «аварийный» вариант для расчетного случая с отказом одного парашюта (рис. 2).



Рис. 2. Расчетная конфигурация четырехкупольной (а) и трехкупольной (б) парашютной системы КСА Crew Dragon на этапе конечного спуска

Для реализации определенной схемы построения МКС осуществляется:

- подбор тормозных и основных парашютов (в зависимости от выбора аэродинамической схемы куполов), например, из имеющихся прототипов;

- выбор основных геометрических соотношений системы (определяется аэродинамической схемой системы) с учетом опыта проектирования аналогичных систем.

Выбор системы отсчета. Обычно для МКС считается, что начало координат размещено в центре масс спускаемый объект — парашют (без учета присоединенных масс). Система координат, использованная для построения расчетных схем МКС, представлена на рис. 3.

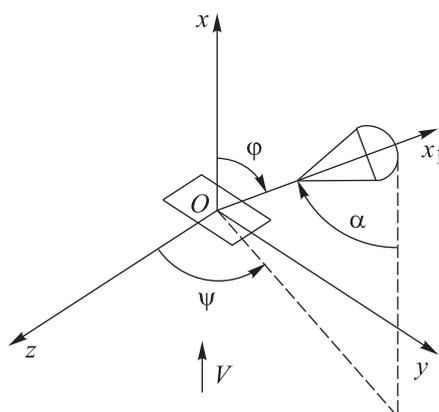


Рис. 3. Система координат для построения расчетных схем МКС

На практике наиболее распространены грузовые парашюты с одним коушем, который крепится к объекту шарнирно, т. е. без передачи аэродинамического момента на объект. Поскольку масса вытяжных, стабилизирующих и тормозных парашютов составляет менее 3 % массы объекта, а основных парашютов — менее 7 %, центр масс системы объект — парашют, как правило, находится между центром масс объекта и узлами подвески парашюта, т. е. вблизи коуша системы. Поэтому при исследовании изолированных парашютов и МКС за начало координат принимается точка пересечения геометрической оси симметрии парашютов системы с плоскостью объекта, проходящей через узел крепления удлинительных звеньев и строп парашютов к спускаемому грузу (точка O на рис. 3).

Выбор геометрических параметров системы. Для расчета суммарной силы сопротивления МКС, набранной из одинаковых парашютов, обычно используют формулу

$$X_{\text{МКС}} = k_i n (C_{xa} S_0) q,$$

где $k_i = \frac{C_{xa \text{ МКС}}}{C_{xa}}$ — коэффициент интерференции между куполами ($C_{xa \text{ МКС}}$, C_{xa} — коэффициенты лобового сопротивления МКС

и одиночного парашюта соответственно); n — количество парашютов в связке; S_0 — площадь одиночного парашюта; $C_{xa}S_0$ — характеристическая площадь купола; q — скоростной напор.

Основная сложность заключается в определении коэффициента k_i .

В работе У. Брауна [1] описываются опыты, на основании которых было установлено, что для надежного раскрытия многокупольной системы необходима минимальная суммарная длина подвеса $l_\Sigma = l_{\text{стр}} + l_{\text{зв}}$ ($l_{\text{стр}}$ — длина строп парашюта; $l_{\text{зв}}$ — длина парашютного звена), определяемая по эмпирической формуле

$$l_\Sigma = D_P \sqrt{n},$$

где D_P — проектный диаметр наполненного купола суммарной площади — предполагаемый диаметр его миделева сечения.

По данным отечественных исследований, минимальная суммарная длина подвеса для трехкупольной парашютной системы

$$l_\Sigma = 1,71D_0,$$

где D_0 — раскройный диаметр эквивалентного купола.

Суммарная относительная длина подвеса

$$\bar{l}_\Sigma = l_\Sigma / D_0 = 1,71.$$

Однако в реальных системах длина строп парашютов определяется из соображений уменьшения массы МКС, так как на долю строп и звеньев приходится большая часть массы парашютной системы. Предварительно длину l_Σ выбирают из условия $\bar{l}_\Sigma = \bar{l}_{\text{стр}}$ для парашюта, площадь которого равна суммарной площади куполов связки. Для трехкупольных парашютных систем при расчете суммарной длины подвеса коэффициент \bar{l}_Σ обычно выбирают равным не 1,71, а 1,6 для парашютов из сплошной ткани и 1,2 для ленточных парашютов или куполов с большой конструктивной проницаемостью.

На основании данных экспериментальных исследований в наиболее простом случае трехкупольной системы углы установки куполов в связке первоначально выбирают равными 30° [10], далее проводят их коррекцию по результатам модельного или натурного эксперимента.

Результаты численного моделирования МКС. Было определено, как изменение угла установки купола, а также суммарной длины звеньев и несущих строп парашютов (суммарной длины подвеса) влияет на аэродинамические характеристики многокупольных систем. Кроме того, проведен анализ особенностей аэродинамических течений около куполов в связках, что позволило объяснить повышение устойчивости парашютов при работе в составе многокупольных систем.

Связки из обычных парашютов. С использованием разработанного программного комплекса исследованы распределенные аэродинамические характеристики купола в составе МКС и выполнено их сравнение с результатами, полученными для изолированного парашюта. На рис. 4 представлена развертка коэффициента ΔC_p перепада давления по дискретной поверхности купола для одиночного парашюта (с углом атаки $\alpha = 25^\circ$) и в составе трехкупольной системы (с углами установки $\varphi = 35^\circ$) при ее осевом обтекании. В базовой плоскости графика данные представлены в направлении обхода по радиальным лентам каркаса купола и по кольцевым лентам в направлении от полюса к нижней кромке.

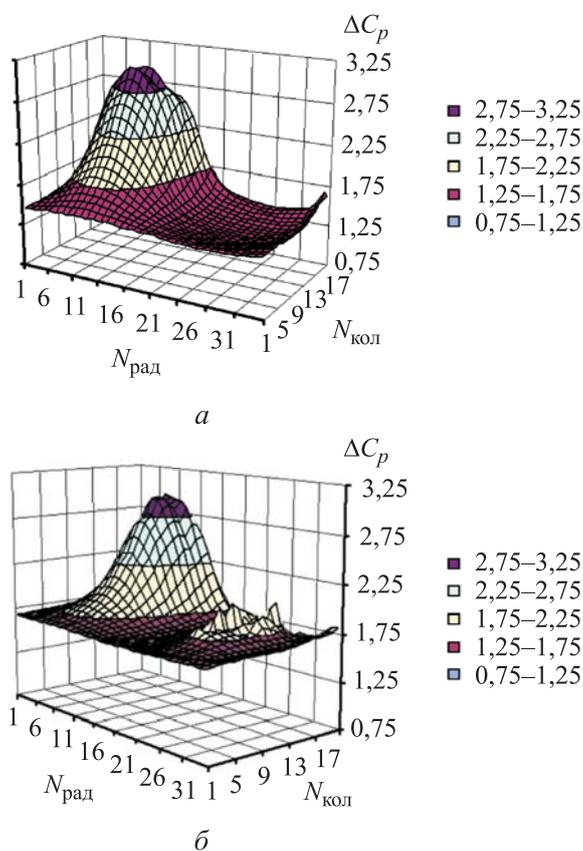


Рис. 4. Развертки безразмерного коэффициента перепада давления по поверхности купола парашюта ($N_{\text{рад}}$, $N_{\text{кол}}$ — номера радиальных и кольцевых лент):
а — в трехкупольной связке при $\varphi = 35^\circ$; *б* — изолированного при $\alpha = 25^\circ$

Если сравнить развертки, представленные на рис. 4, *а* и *б*, то видно их удовлетворительное соответствие. Отсюда можно сделать вывод, что в данном случае условия обтекания отдельных куполов в МКС, благодаря интерференции между ними, соответствуют условиям обтекания

изолированного купола на углах атаки примерно на 10° меньших, чем геометрический угол установки в системе.

Появление «языковидной» зоны на развертках коэффициента перепада давления свидетельствует о наличии достаточно мощных вихрей, сходящих с боковых кромок куполов. Величина разряжения в данном случае характеризует циркуляцию (интенсивность) этих вихрей. При одинаковых углах установки куполов (изолированных и в связке) в МКС появляется деформация концевых вихрей, вызванная аэродинамической интерференцией. Это приводит к тому, что их циркуляция уменьшается, соответственно уменьшается и сопротивление системы.

Итоговый график этих исследований — зависимость коэффициента C_x продольной силы МКС от суммарной относительной длины \bar{l}_Σ подвеса и числа куполов n в системе — представлен на рис. 5. Заметна тенденция к сближению между кривыми при существенном увеличении суммарной длины подвеса. Такой характер кривых объясняется тем, что с увеличением \bar{l}_Σ возрастает расстояние между соседними куполами и условия обтекания купола в МКС приближаются к условиям обтекания изолированного парашюта.

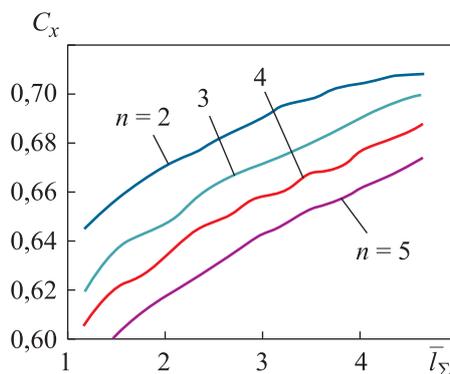


Рис. 5. Зависимость коэффициента продольной силы МКС от суммарной относительной длины подвеса

Кривые, отражающие изменение коэффициента продольной силы, почти параллельны и проходят ниже при увеличении числа куполов в системе, что обусловлено увеличением деформации вихревых жгутов, сходящих с боковых кромок куполов. Расстояние между соседними кривыми изменения коэффициента C_x составляет около $-0,02$ при добавлении следующего парашюта. Общее изменение коэффициента C_x при изменении суммарной относительной длины подвеса от 2 до 5 составляет около $0,05$. Это подтверждает относительно слабое

изменение сопротивления МКС при изменении относительной длины подвеса (в разумных пределах). Из приведенных графиков следует, что с уменьшением длины подвеса и увеличением числа парашютов в связке интерференционное взаимовлияние куполов возрастает.

Кроме того, анализ этих зависимостей коэффициента C_x для связок парашютов показывает, что при натурном моделировании МКС необходимо обеспечить подобие по следующим геометрическим факторам: форме (конструкции) купола, его конструктивной проницаемости и суммарной длине подвеса.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента k_i интерференции парашютной системы от изменения установочных углов куполов в связке при фиксированной длине подвеса.

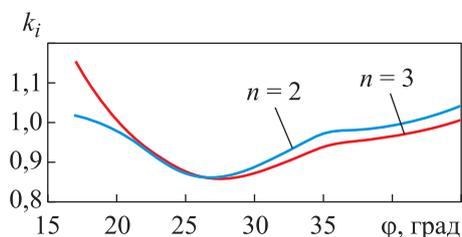


Рис. 6. Зависимость коэффициента интерференции между куполами от угла установки при разном числе парашютов в связке

В ходе проведенного численного моделирования установлено, что степень влияния парашютов связки друг на друга существенно зависит от расстояния между куполами, как и в предыдущем случае.

При объединении парашютов в многокупольную систему их сопротивление стремится к минимуму. Это вызвано тем, что парашюты в системе стремятся занять устойчивое положение, соответствующее их второму балансирующему углу ($\varphi \approx 27^\circ$). На рис. 6 видно, что это наиболее устойчивое состояние для парашютов системы. Следовательно, оптимальную суммарную длину подвеса для парашютов в связке необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить положение купола в системе, соответствующее их балансирующему углу для одиночного парашюта.

Необходимо отметить, что балансирующий угол $\approx 27^\circ$ соответствует куполам в связке, пошитым из ткани с большой воздушной проницаемостью и/или имеющим удлиненную нижнюю кромку, а также большую суммарную длину подвеса. Для статически неустойчивых парашютов с короткой длиной подвеса балансирующий угол куполов в связке значительно больше (рис. 7). В полете правый купол этой системы имел тенденцию к потере формы. Однако и в этом случае купола заняли устойчивое положение, соответствующее минимуму сопротивления системы.



Рис. 7. Взаимное положение двух статически неустойчивых парашютов

Если парашюты существенно статически неустойчивы, то их угол развала в системе может составлять около 120° при балансировочном угле одиночного парашюта около $30^\circ \dots 40^\circ$, что объясняется значительной циркуляцией вихрей, сходящих с боковых кромок куполов. Если парашюты статически неустойчивы в равной степени и имеют сопоставимую площадь, то связка в полете будет симметричной. В несимметричной системе более устойчивый купол всегда стремится уменьшить угол установки. В правильно сконструированной связке парашютов купола в равновесном состоянии должны держаться достаточно кучно — это увеличивает коэффициент сопротивления системы.

Динамически неустойчивые парашюты в связке обычно не могут найти свое балансировочное положение в потоке, что может приводить к вращению всей системы. При любой попытке заневоливания куполов статически и динамически неустойчивых парашютов в связках возникает самопроизвольное вращение всей системы. Это объясняется наличием вихрей высокой интенсивности, сходящих с боковых кромок куполов. Сильное взаимовлияние таких вихрей может приводить к складыванию отдельных куполов в связках, так как установочный угол парашюта в системе существенно больше балансировочного угла одиночного парашюта и близок к углу начала складывания.

Связки из обычных парашютов с рифлением. Установка рифов на паруса улучшает остойчивость парусника и сводит к минимуму риск повреждения парусов при сильном ветре. Примерно так же установка шнура рифления по нижней кромке купола улучшает устойчивость парашютного купола и значительно снижает риск его повреждения на больших скоростях ввода. Кроме того, применение обычных парашютов с рифлением позволяет существенно улучшить равномерность наполнения парашютов в связке.

После пуска 5 июля 2023 г. Европейское космическое агентство прекратило эксплуатацию ракеты-носителя (РН) «Ариан-5». Тем не менее парашютная система возвращения ускорителей этой ракеты заслуживает особого внимания.

Стабилизация ускорителей при падении после отделения от РН осуществляется за счет их вращения вокруг продольной оси. Многокупольные парашютные системы наиболее устойчивы к закрутке строп, поэтому в качестве тормозного блока системы спасения ускорителя РН «Ариан-5» использовалась связка из трех парашютов. Купола этих парашютов имели раскройную площадь $91,6 \text{ м}^2$ и четыре пояса рифления, расположенные не только на нижней кромке, но и выше, что было применено впервые. Многоступенчатое рифление обеспечивало плавное увеличение нагрузок при раскрытии куполов.

Фотография этой системы с весовым макетом ВМ-5 во время летных испытаний представлена на рис. 8. Результаты сбросов пока-

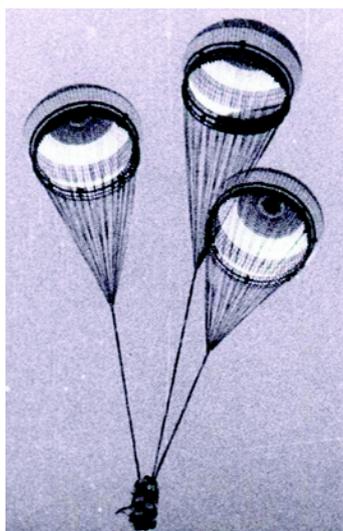


Рис. 8. Летные испытания тормозного блока РН «Ариан-5»

зали, что такие тормозные парашюты обладают ранее неизвестной аэродинамической особенностью — их коэффициент сопротивления ниже расчетного для куполов с рифлением по нижней кромке.

При многоступенчатом рифлении купола пояса рифления разнесены по его высоте, что существенно изменяет характеристики обтекания парашютов за счет специальной формы нижней части купола. Данные, полученные в результате численного моделирования таких куполов, представляют особый интерес. Поэтому на основе разработанного программного обеспечения были проведены исследования аэродинамики таких связок для проверки его работоспособности и сравнения результатов

расчетов с экспериментальными данными.

Изменение с течением времени коэффициента C_{xa} продольной силы, измеренного при сертификационных летных испытаниях трехкупольной парашютной системы тормозного блока, представлено на рис. 9. Основные параметры, связанные с рифлением купола, приведены в табл. 1. Разрифление происходило в порядке возрастания номеров i . Пятая ступень рифления, которая представляла собой ленту-стяжку по передней кромке купола, не разрывалась.

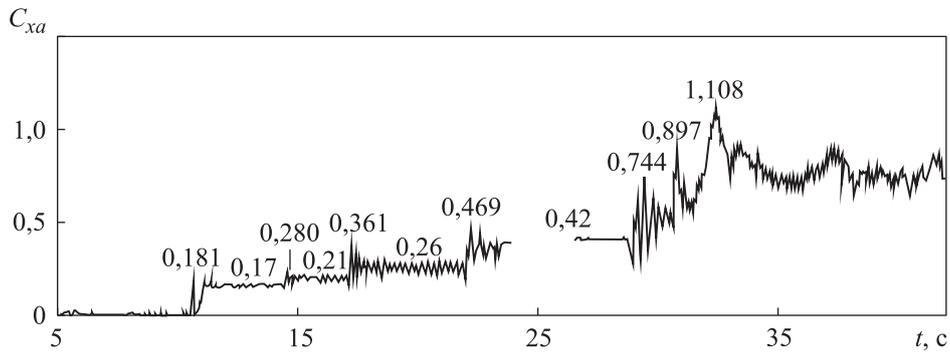


Рис. 9. Изменение со временем коэффициента продольной силы C_{xa} трехкупольной парашютной системы тормозного блока ускорителей РН «Ариан-5» (график использован с разрешения Р.А. Андронova)

Таблица 1

Основные геометрические параметры куполов с рифлением

Номер фазы рифления i	Параметр рифления \bar{D}_R	Диаметр рифления D_R , м	Длина шнура рифления l_R , м	Высота от нижней кромки купола до пояса рифления h , м	Относительная высота пояса рифления \bar{h}_i	Рассчитанный коэффициент продольной силы одиночного парашюта C_{xp}
1	0,24	2,64	8,3	0,35	0,064	0,135
2	0,34	3,74	11,7	0,63	0,115	0,165
3	0,41	4,51	14,2	0,91	0,165	0,25
4	0,46	5,06	15,9	1,19	0,216	0,32
5	0,68	7,70	24,2	≈ 0	0	0,68

Примечание. Здесь $\bar{D}_R = \frac{D_R}{D_0} = \frac{l_R}{\pi D_0}$; $\bar{h}_i = \frac{2h}{D_0}$.

Однако следует отметить, что в эксперименте такой порядок работы системы был не всегда. Соответствующие расчетные схемы наполненной формы купола тормозного парашюта РН «Ариан-5» при различных фазах рифления приведены на рис. 10.

Параметр рифления куполов системы и осредненные данные по коэффициенту сопротивления связки, которые были получены экспериментально и рассчитаны при численном моделировании, указаны в табл. 2. Видно удовлетворительное согласование данных численного моделирования и результатов летного эксперимента.

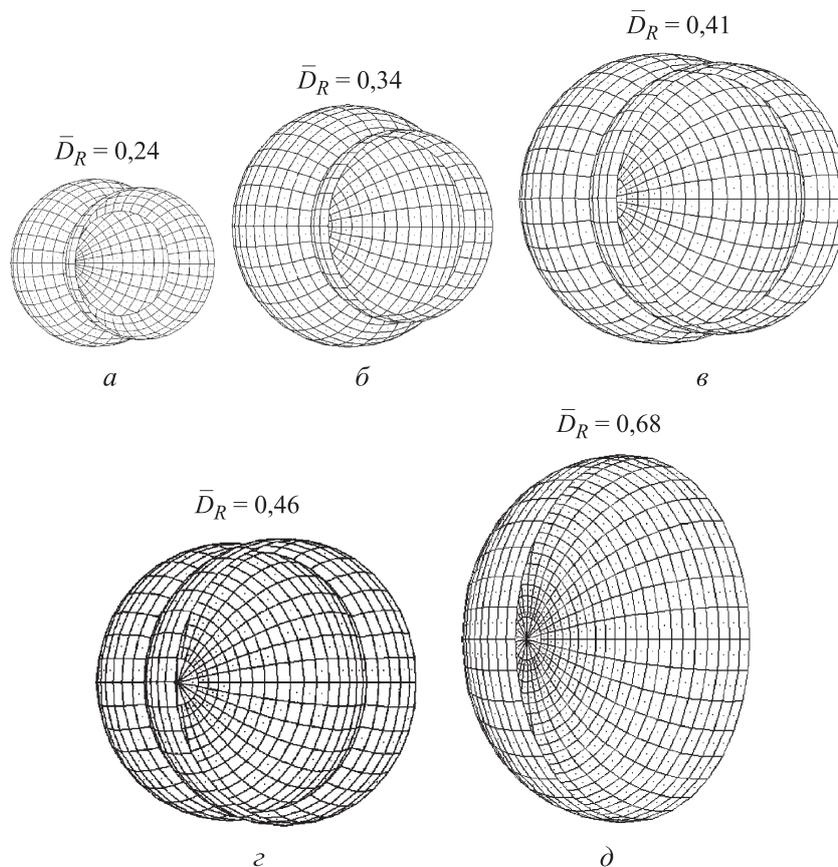


Рис. 10. Расчетные схемы наполненной формы купола тормозного парашюта РН «Ариан-5» при фазе рифления $i = 1$ (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д)

Таблица 2

Результаты летного эксперимента и численного моделирования параметров куполов с рифлением

Номер фазы рифления i	Параметр рифления \bar{D}_R	Расчетный коэффициент сопротивления одиночного парашюта C_{xp}	Коэффициент сопротивления связки	
			экспериментальный C_{xR}	расчетный C_{xRp}
1	0,24	0,135	0,17	0,15
2	0,34	0,165	0,21	0,16
3	0,41	0,26	0,26	0,27
4	0,46	0,33	0,42	0,35
5	0,68	0,68	0,75	0,72

Распространение вихревых следов для одиночного рифованного купола и аналогичных куполов в составе МКС приведено на рис. 11 и 12 при $\bar{D}_R = 0,41$ и $0,46$ соответственно.

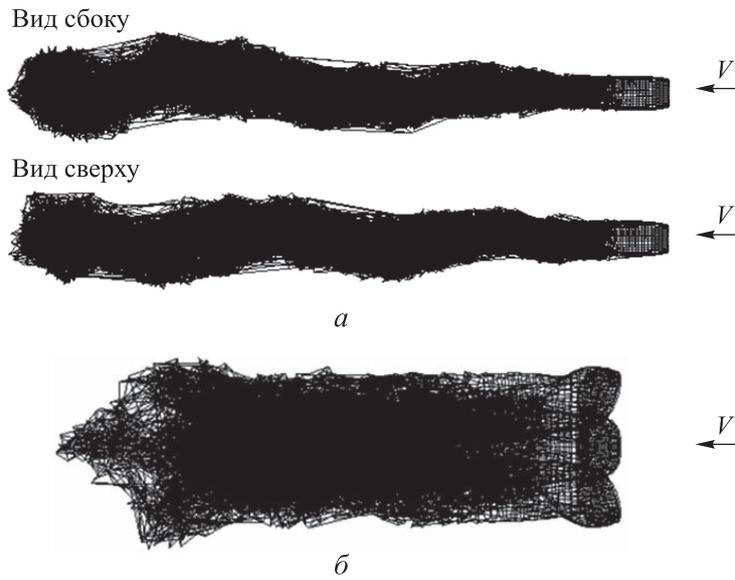


Рис. 11. Распространение вихревого следа за рифованными парашютами с $\bar{D}_R = 0,41$:
 a — одиночным; $б$ — в составе МКС

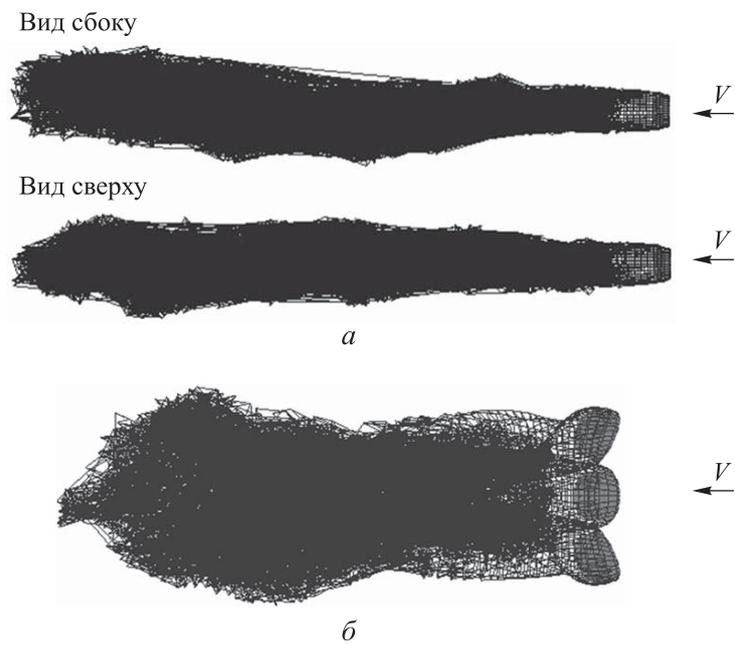


Рис. 12. Распространение вихревого следа за рифованными парашютами с $\bar{D}_R = 0,46$:
 a — одиночным; $б$ — в составе МКС

В обоих случаях для одиночного купола (рис. 11, *a* и 12, *a*) распространение следов неравномерно, при $\bar{D}_R = 0,41$ вихревой след имеет частоту и амплитуду колебаний выше, чем при $\bar{D}_R = 0,46$. Анализ развития следов показывает динамическую неустойчивость куполов, что отмечено также при проведении летных экспериментов одиночных парашютов.

Для связок поведение вихревых следов иное. При $\bar{D}_R = 0,41$ (рис. 11, *б*) вихревой след за связкой равномерный. При $\bar{D}_R = 0,46$ (рис. 12, *б*) видна более сложная спиралевидная структура следа, амплитуда колебаний в котором возрастает. Это свидетельствует о низкой динамической устойчивости связки. Такое поведение при разрифлении парашютов отмечалось в летном эксперименте.

Изменение коэффициентов продольной силы для отдельных куполов с $\bar{D}_R = 0,41$ и $0,46$ и для МКС по безразмерному времени счета τ показано на рис. 13 и 14.

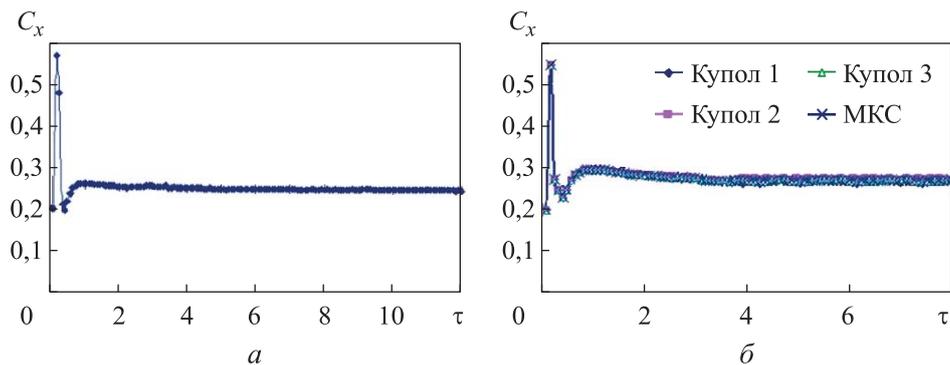


Рис. 13. Коэффициент продольной силы одиночного парашюта (*a*) и аналогичных куполов в составе МКС суммарно и по отдельности (*б*) при $\bar{D}_R = 0,41$

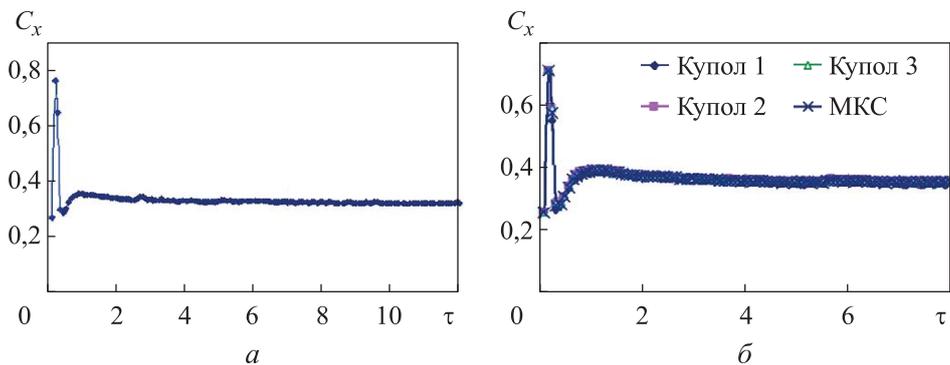


Рис. 14. Коэффициент продольной силы одиночного парашюта (*a*) и аналогичных куполов в составе МКС суммарно и по отдельности (*б*) при $\bar{D}_R = 0,46$

Графики для МКС (рис. 13, б и 14, б) сливаются, так как все купола одинаковы, в качестве относительной площади была выбрана раскройная площадь одиночного парашюта и суммарная для всей системы. Видно равномерное изменение коэффициентов, что свидетельствует о толстом пограничном слое вокруг куполов. Наличие толстого пограничного слоя с равномерным распространением завихренностей объясняет уменьшение сопротивления для таких куполов по сравнению с сопротивлением куполов, рифованных по нижней кромке. Для купола с $\bar{D}_R = 0,46$ на графиках наблюдаются незначительные всплески, что свидетельствует о несколько меньшей устойчивости такого парашюта (как одиночного, так и в составе связки), чем у парашюта с $\bar{D}_R = 0,41$. Это подтверждается и результатами дальнейших исследований.

Развертки распределенного перепада давления для одиночного рифованного купола и аналогичных куполов в составе МКС изображены на рис. 15 и 16 соответственно при $\bar{D}_R = 0,41$ и $0,46$. Виды представлены со стороны полюса купола. Купола имели резко выраженные верхнюю и нижнюю выполненную части, что привело к двойной «волне» разряжения на этих диаграммах. Повышение распределенного перепада давления наблюдается в районах, близких к нижней кромке и миделеву сечению верхней части купола.

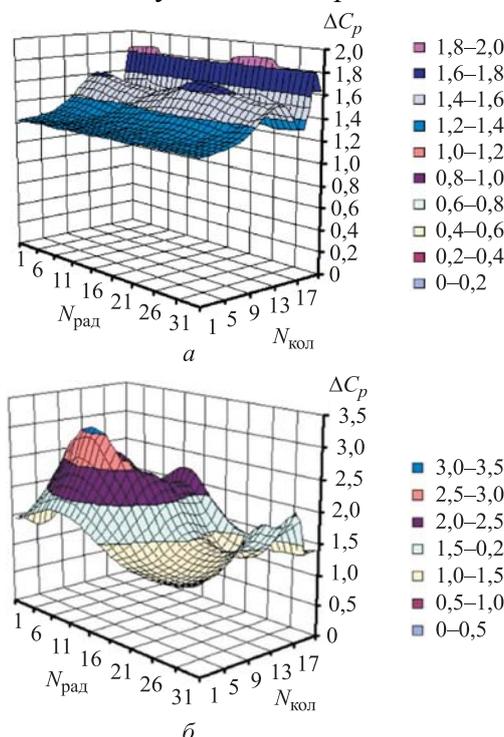


Рис. 15. Развертки распределенного перепада давления для одиночного рифованного купола (а) и аналогичного одного купола в составе МКС (б) при $\bar{D}_R = 0,41$

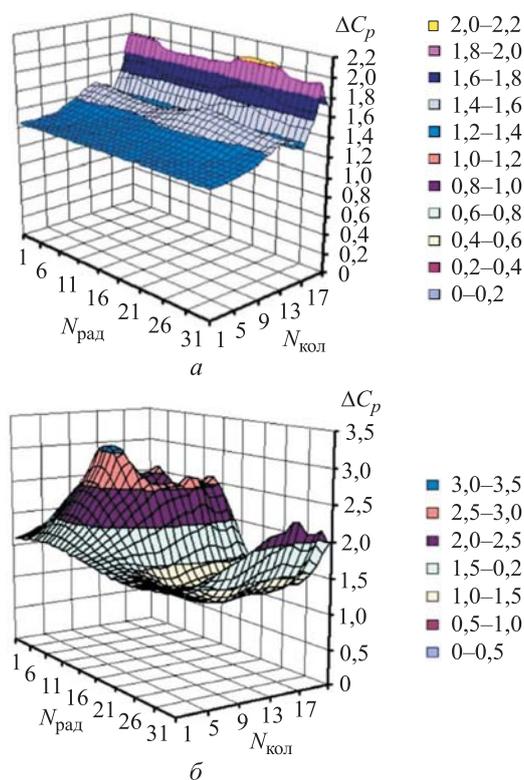


Рис. 16. Развертки распределенного перепада давления для одиночного рифованного купола (а) и аналогичного одного купола в составе МКС (б) при $\bar{D}_R = 0,46$

В обоих случаях, и при $\bar{D}_R = 0,41$, и при $\bar{D}_R = 0,46$, для одиночного купола развертки распределенного перепада давления довольно равномерны. При этом на серединной поверхности купола видны характерные всплески разряжения, означающие его невысокую динамической устойчивость, что и было зафиксировано также при летном эксперименте. Необходимо отметить, что для одиночного купола с $\bar{D}_R = 0,46$ (рис. 16, а) наблюдается максимальный перепад давления (желтый всплеск) и развитая зона высокого разряжения (розовая зона) в районе нижней кромки купола, что определяет его неустойчивое поведение в потоке.

Для купола в составе МКС также в обоих случаях (рис. 15, б и 16, б) наблюдается характерная «языковидная» зона с максимальным перепадом давления. Появление этой зоны указывает на увеличение разряжения в районе миделева сечения верхней части купола, где вихревая пелена наиболее близко приближается к поверхности расчетной схемы купола. При этом на передней части купола наблюдается характерный «провал», который определяет зону повышения перепада давления и объясняет возможный подгиб этой части купола.

Появление «языковидной» зоны на диаграммах для МКС свидетельствует о наличии достаточно сильных вихрей, сходящих с боковых кромок куполов, и объясняет повышение устойчивости куполов в составе связки, что было отмечено ранее. Величина разряжения характеризует циркуляцию этих вихрей. Следует отметить, что общая площадь зоны максимального разряжения уменьшается по сравнению с аналогичным параметром купола без рифления. Это означает, что уменьшается интенсивность вихрей, сходящих с боковых кромок рифованного купола. Для купола с $\bar{D}_R = 0,41$ (см. рис. 15, б) снова наблюдается более равномерное распределение разряжения в передней части диаграммы (нет красных пиков), что в данном случае частично объясняет феномен равномерного вихревого следа за МКС с такими парашютами. Для купола с $\bar{D}_R = 0,46$ (см. рис. 16, б) наблюдается более развитая бордовая зона с красными пиками, с высоким перепадом давления в районе нижней кромки, что определяет неустойчивое поведение парашюта в потоке как одиночного, так и в составе связки.

В представленном примере сработало основное правило аэродинамического проектирования куполов: область, ближайшая к входной кромке купола, определяет аэродинамику всей системы. Несмотря на относительно слабое проявление этого правила для одиночного купола с $\bar{D}_R = 0,41$ при осевом обтекании, в случае МКС получили «эффект умножения (взмаха бабочки)» — заметное улучшение устойчивости обтекания связки.

Этот эффект имеет простое объяснение. Для куполов в связке с $\bar{D}_R = 0,41$ наложение следов произошло в противофазе, что привело к равномерному следу. Для куполов в связке с $\bar{D}_R = 0,46$ при развитии следов произошло «совпадение» фаз колебаний, что привело к возникновению резонансных явлений. Отсюда следует, что необходимы дальнейшие более подробные исследования колебаний в вихревом следе за парашютами.

Предложенная методика численного моделирования отрывных течений с куполов парашютов позволила получить удовлетворительные расчетные значения коэффициентов сопротивления для парашютов с параметрами рифления $\bar{D}_R = 0,68; 0,46$ и $0,41$, погрешность при этом составила до 12 % (для четвертой фазы рифления). Для первой и второй фазы рифления погрешность составила 20 и 34 % соответственно. Это обусловлено тем, что в данной методике не учитывались некоторые особенности обтекания рифованных куполов с малыми параметрами рифления ($\bar{D}_R \leq 0,34$), прежде всего отрывы с верхней части купола, что было учтено в ходе дальнейших исследований.

Ранее при проведении исследований рифованных парашютов из сплошной ткани в аэродинамической трубе было установлено, что

коэффициент сопротивления остается практически постоянным для рифованных куполов с \bar{D}_R до 0,4...0,5 [6]. Приведенные результаты численного моделирования подтверждают этот вывод, что свидетельствует о достаточной достоверности расчета основных аэродинамических характеристик МКС по предложенной методике численного моделирования отрывных течений с куполов.

Заключение. Ранее, в статье [8], автором предложена методология аэродинамического проектирования МКС, основанная на совместной реализации методов расчета надежности парашютных систем и методов механики сплошных сред: численных методов моделирования формообразования парашютов и аэродинамики отрывных течений. На основе выбранных численных методик был разработан комплекс компьютерных программ. Указанное программное обеспечение имеет модульное построение, что позволило довольно легко сформировать специализированный автоматизированный инструмент для анализа нестационарной отрывной аэродинамики МКС.

Первоначально были проведены расчеты аэродинамических характеристик связок парашютов на этапе конечного спуска с числом куполов от 2 до 5. Анализ расчетных данных позволил получить суммарные аэродинамические характеристики таких систем, а также распределение перепада давления по отдельным куполам связки. На основании этого было оценено влияние изменения угла установки, а также суммарной длины звеньев и несущих строп парашютов на аэродинамические характеристики систем.

В результате численных расчетов получены картины изменения вихревых следов за парашютами в связках, что позволило провести анализ обтекания таких систем. Было выявлено, что повышение устойчивости парашютов в составе связки объясняется появлением стабилизирующих вихрей высокой интенсивности, сходящих с боковых кромок куполов.

Полученные результаты показали, что при натурном моделировании парашютных связок необходимо обеспечить подобие по следующим геометрическим факторам: форме купола, его конструктивной проницаемости и суммарной длине подвеса.

Для проверки работоспособности программного инструмента при расчете аэродинамических характеристик парашютов с высоким расположением пояса рифления проведено численное моделирование течений около связки тормозного блока системы возвращения ускорителя РН «Ариан-5».

Анализ распределения безразмерного перепада давления по рифованным куполам показал уменьшение циркуляции вихрей, сходящих с боковых кромок, по сравнению с циркуляцией при использовании парашютов без рифления. Это объясняет особые аэродинамические

свойства МКС с рифлением парашютов, например, относительно слабое уменьшение сопротивления рифованных куполов при их работе в составе системы.

Кроме того, впервые обнаружены резонансные явления в следе за такими парашютами. Одиночные парашюты с $\bar{D}_R = 0,41$ и $0,46$ показали развитие следа с заметной амплитудой колебаний, но разной частотой, причем купол с $\bar{D}_R = 0,41$ проявил себя хуже. В связке куполов с $\bar{D}_R = 0,41$ развитие следов происходило в противофазе, что привело к выравниванию следа за системой и повышению ее устойчивости при спуске. В связке парашютов с $\bar{D}_R = 0,46$ при развитии следов произошло «совпадение» фаз колебаний, что привело к возникновению резонансных явлений в следе и к колебаниям системы при спуске.

На основании полученных результатов и с учетом данных известных экспериментов, ранее проведенных в аэродинамических трубах авторами работ [5, 6], можно сформулировать следующие выводы.

1. Для парашютов из сплошной ткани значение коэффициента сопротивления уменьшается с увеличением числа нерифованных куполов в связке; для рифованных куполов до параметра рифления $0,5$ значение этого коэффициента остается практически постоянным и повышается с увеличением числа куполов в связке, рифованных до параметра рифления $0,3$ или $0,2$, что объясняется существенным проявлением «экранного эффекта» с преобладающим влиянием размаха, особенно для нерифованных куполов.

2. Для парашютов с высокой конструктивной проницаемостью с увеличением их числа в связке коэффициент сопротивления незначительно уменьшается, при этом процентное уменьшение коэффициента сопротивления за счет рифления остается практически постоянным. Это объясняется ослаблением «экранного эффекта» из-за относительно малой интенсивности вихрей, сходящих с боковых кромок, для таких куполов.

3. Суммарная длина подвеса, близкая к $l_\Sigma = D_P \sqrt{n}$, и угол установки купола в системе влияют на изменения суммарного коэффициента сопротивления в пределах $10...12\%$ (приведенные значения получены без учета возможных нарушений геометрической схемы системы).

4. Статическая устойчивость куполов из сплошной ткани достигает максимума при параметре рифления $0,3$, а также при объединении трех куполов в связку, что объясняется наиболее благоприятным взаимодействием вихревых следов (деформация стабилизирующих боковых вихрей минимальная).

5. Статическая устойчивость парашютов с высокой конструктивной проницаемостью достигает максимума при параметре рифления примерно 0,5 из-за относительно слабой интенсивности вихрей, сходящих с боковых кромок, для таких куполов (общий след за системой более равномерный).

6. Статическая устойчивость всех типов парашютных куполов повышается с увеличением длины соединительных звеньев благодаря уменьшению деформации стабилизирующих боковых вихрей.

7. Более устойчивые конфигурации связок имеют меньшие коэффициенты продольной силы, и тенденция к складыванию у них проявляется при меньшем угле атаки в силу особенностей взаимодействия вихрей отдельных куполов в следе.

8. Результаты исследований одиночного парашюта (прежде всего данные по второму балансировочному углу) могут быть использованы для предварительного определения аэродинамических характеристик связок.

9. Целесообразно использовать отдельные сборки/подсистемы по два-три купола с оптимальной длиной подвеса для построения МКС с большим количеством куполов. При этом для обеспечения заданной надежности по функционированию необходимо реализовывать системы с наименьшим количеством куполов: до четырех — для людских систем, до девяти — для грузовых.

Таким образом, в работе опробованы методология аэродинамического проектирования многокупольных парашютных систем и программное обеспечение, предложенные автором статьи. Полученные результаты можно использовать для оптимизации конфигураций связок на этапе конечного спуска и для подтверждения их заданных летно-технических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brown W.D. *Parachutes*. London, England: I. Pitman & Sons, Ltd., 1951, 250 p.
- [2] Лобанов Н.А. *Основы расчета и конструирования парашютов*. Москва, Машиностроение, 1965, 364 с.
- [3] Knacke T.W. *Parachute Recovery Systems Design Manual*. Santa Barbara, Para Publishing, 1992, 512 p.
- [4] Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. *Парашютные системы: проблемы и методы их решения*. Москва, Физматлит, 2009, 575 с.
- [5] Носарев И.М. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик трехкупольной парашютной системы. В кн.: *Парашюты и проницаемые тела. Сб. ст.* О.В. Рысев, М.П. Фалунин, ред. Москва, Изд-во МГУ, 1980, с. 105–114.
- [6] Braun J.F., Walcott W.B. *Wind tunnel study of parachute clustering*. Technical Documentary Report. ASD-TDR-63-159.
<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0402777.pdf>

- [7] Иванов П.И., Бериславский Н.Ю. Проблемные вопросы функционирования многокупольных парашютных систем. *Вестник МАИ*, 2020, т. 27, № 1, с. 43–52. DOI: 10.34759/vst-2020-1-43-52
- [8] Плосков С.Ю. Методика численного моделирования многокупольных парашютных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 10, с. 1–22. EDN FUCLRU
- [9] Плосков С.Ю. Принципы проектирования и обеспечения надежности парашютных систем зарубежных пилотируемых космических аппаратов. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2022, № 3 (142), с. 18–39.
- [10] Lee C.K., Lanza J., Buckley J. Apparatus and measuring angular position of parachute canopies. In: *13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. AIAA 95-1544-CP*. May 1995.

Статья поступила в редакцию 25.09.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Плосков С.Ю. Результаты численных исследований многокупольных парашютных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 11. EDN DLXQMY

Плосков Сергей Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат гранта Президента Российской Федерации 2005 г.
e-mail: ploskovsu@bmsu.ru

Results of the parachute cluster numerical research

© S.Yu. Ploskov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Methodology of the parachute cluster aerodynamic design envisages combined implementation of the reliability computation and continuum mechanics methods. The author developed a software package making it possible to study the influence of total length of the canopy suspension in a bundle, parachutes positioning angle in the system and their number on the aerodynamic characteristics of such systems. The paper analyzes flow features of a number of the parachute clusters assembled from the conventional parachutes with and without canopy ribbing. For the first time, it demonstrates the influence of resonance phenomena in the vortex wake on the parachute bundle stability based on the numerical simulation data. Results of the experimental work with parachute clusters in the wind tunnels in Russia and abroad are analyzed. The paper highlights the canopy features that should be taken into account in constructing parachute cluster systems with various configurations and purposes.

Keywords: *parachute, methodology of the parachute system aerodynamic design, parachute bundle, parachute cluster, numerical methods in computing the parachute systems, parachute system stability, selecting the parachute system design*

REFERENCES

- [1] Brown W.D. *Parachutes*. London, England, I. Pitman & Sons, Ltd., 1951, 250 p.
- [2] Lobanov N.A. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya parashyutov* [Fundamentals of calculation and design of the parachutes]. Moscow, Mashinostroenie, 1965, 364 p.
- [3] Knacke T.W. *Parachute Recovery Systems Design Manual*. Santa Barbara, Para Publishing, 1992, 512 p.
- [4] Lyalin V.V., Morozov V.I., Ponomarev A.T. *Parashyutnye sistemy: problemy i metody ikh resheniya* [Parachute systems: problems and methods for solving them]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 575 p.
- [5] Nosarev I.M. Eksperimentalnoe issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik trekhkupalnoy parashyutnoy sistemy [Experimental study of aerodynamic characteristics of the three-dome parachute system]. In: O.V. Rysev, M.P. Falunin, eds. *Parashyuty i pronitsaemye tela. Sbornik statei* [Parachutes and Permeable Bodies. Collection of papers]. Moscow, MSU Publ., 1980, pp. 105–114.
- [6] Braun J.F., Walcott W.B. *Wind tunnel study of parachute clustering*. Technical Documentary Report. ASD-TDR-63-159. <https://doi.org/apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0402777.pdf>
- [7] Ivanov P.I., Berislavsky N.Yu. Problemnye voprosy funktsionirovaniya mnogokupalnykh parashyutnykh sistem [Problematic issues of functioning of multi-dome parachute systems]. *Vestnik MAI – Aerospace MAI Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 43–52. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-43-52>
- [8] Ploskov S.Yu. Metodika chislennogo modelirovaniya mnogokupalnykh parashyutnykh sistem [Methodology of the parachute cluster numerical simulation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, issue 10. EDN FUCLRU
- [9] Ploskov S.Yu. Printsipy proektirovaniya i obespecheniya nadezhnosti parashyutnykh sistem pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov [Principles of designing and

ensuring reliability of parachute systems for foreign manned spacecraft]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (142), pp. 18–39.

- [10] Lee C.K., Lanza J., Buckley J. Apparatus and measuring angular position of parachute canopies. In: *13th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference*. AIAA 95-1544-CP. May 1995.

Ploskov S.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Laureate of the Grant of the President of the Russian Federation in 2005. e-mail: ploskovsu@bmstu.ru