

УДК 533.666.2: 629.7

П. И. ИВАНОВ

Херсонский национальный технический университет, Украина

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП ПРОЦЕССА НАПОЛНЕНИЯ ПАРАШЮТОВ БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЕЙ

В работе рассматривается подготовительный этап – один из важнейших этапов процесса наполнения парашютов больших площадей основного класса. Приводятся и обосновываются причины, заставляющие разработчиков парашютов больших площадей проводить детальные исследования подготовительного этапа. Приводятся некоторые экспериментальные факты по результатам летных испытаний парашютов основного класса площадей 500–1500 м². Выявлен ряд существенных факторов, которые могут быть возможными причинами замедления или ускорения процесса наполнения парашютов на подготовительном этапе. Приведены некоторые безразмерные эмпирические зависимости, характеризующие динамику процесса наполнения куполов больших площадей на подготовительном этапе.

Ключевые слова: парашюты больших площадей, основной класс, подготовительный этап, процесс наполнения.

Введение

В последнее время парашюты больших площадей (500–1500 м²) начинают находить все большее и большее применение при десантировании тяжелых грузов и боевой техники, спасении отработанных ракетных топливных блоков, ступеней ракетополетов, спасении возвращаемых спускаемых аппаратов, командных модулей космических аппаратов.

Как показывают результаты летных испытаний, процесс наполнения парашюта большой площади четко разделяется на три этапа: подготовительный, основной, заключительный, подробно описанные в работе [1].

Подготовительным называется этап, начинающийся с момента полного вытягивания купола и строп на всю длину и заканчивающийся моментом, когда купол в своей профильной проекции в первый раз примет геометрию «полусфера-усеченный конус» [1, 2]. Длительность подготовительного этапа обычно составляет 0,1–0,2 от общего безразмерного времени наполнения купола парашюта (если его принять за единицу). Далее начинается протекать основной этап, в процессе которого в профильной проекции купола геометрия «полусфера-усеченный конус» последовательно преобразуется в полусферическую (или полуэллипсоидную) за счет постепенного исчезновения конической части. Завершается процесс наполнения заключительным этапом, сущность которого состоит в переполнении купола вследствие большой динамики его раскрытия и затухающих колебаний полностью наполненного ку-

пола около его положения равновесия.

В данной работе подробно рассматривается только подготовительный этап процесса наполнения.

Постановка задачи

Цель настоящей работы – обсуждение результатов экспериментальных исследований подготовительного этапа процесса наполнения парашютных систем больших площадей, что связано с важной теоретической и практической задачей изучения динамики процесса раскрытия и построения в перспективе его математической модели. Последние исследования и публикации, на которые опирается автор данной статьи, представлены в работах [1–4].

Основная часть

Подготовительный этап наиболее хорошо прослеживается у парашютов основного класса больших площадей с малой величиной удельной массовой нагрузки на парашют. Чем больше площадь купола парашюта и меньше величина удельной массовой нагрузки, тем более ярко выражен подготовительный этап.

Установлено экспериментально, что в ряде случаев именно подготовительный этап может стать причиной длительного наполнения или даже ненаполнения купола парашюта большой площади.

Сильные флаговые колебания (флаттер) вершины купола большой амплитуды на подготови-

тельном этапе могут приводить к контактам вершины с элементами поверхности и ожигать купол в зоне его полюсной части, разрушать основу и силовую каркас купола.

Здесь необходимо отметить, что парашюты, изготовленные из материалов с большим относительным удлинением, в ряде случаев, лучше переносят флаттер, чем парашюты, изготовленные из материалов с малым относительным удлинением.

Динамика процесса наполнения, характер изменения нагрузки, величина максимальной (аэродинамической) нагрузки и причины ее неустойчивости на основном этапе наполнения существенно зависят от характера протекания подготовительного этапа и геометрии (формы) кромки входного сечения купола парашюта к моменту завершения подготовительного этапа [1].

Все это заставляет концентрировать внимание на проведении тщательных исследований подготовительного этапа парашютов больших площадей.

Наблюдения за входным ортогональным к оси парашюта сечением купола в момент начала подготовительного этапа, показали следующее.

Начиная с момента появления кромки купола из упаковки, форма контура кромки входного сечения купола большой площади практически всегда представляет собой хаотически перемещающуюся многосвязную область с разрезами, что объясняется концентрацией большого количества материала кромки, собранного в гофр, на относительно малой площади, рис. 1.



Рис. 1. Формообразование контура кромки входного сечения купола парашюта большой площади на подготовительном этапе

Набегающий на купол поток воздуха проникает в эти открытые, свободные, не занятые кромкой области, последовательно заполняя часть пространства под куполом, образуя некоторый первичный газовый объем непосредственно у кромки купола.

С течением времени происходит последовательное слияние мелких областей в более крупные, которые, в свою очередь, также стремятся объединиться друг с другом.

В результате, начиная с некоторого момента, начинает превалировать по площади над всеми другими более мелкими областями одна, более крупная область, размеры которой непрерывно возрастают за

счет поглощения ею других, более мелких областей, рис. 1.

Этот факт уже дает достаточное представление о том, как можно построить математическую модель формирования контура кромки входного сечения купола парашюта большой площади на подготовительном этапе процесса наполнения.

Наблюдения за динамикой поведения полностью вытянутых из упаковки на полную длину и напряженно деформированных под воздействием скоростного напора купола и строп парашюта показывают, что купол и стропы флагируют в результате непрерывного вихревого отрыва потока с их поверхности, рис. 2.

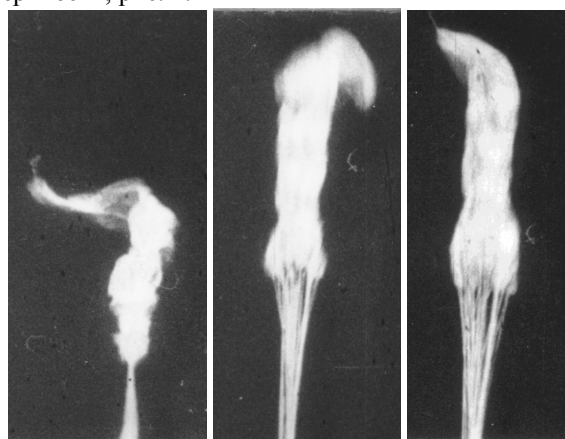


Рис. 2. Флагирование вершины купола большого парашюта на подготовительном этапе

Это приводит к существенным продольным и поперечным деформациям, вызывающим волновые процессы в стропах и самом куполе, что в определенный момент времени приподнимает кромку купола, способствуя образованию входного отверстия достаточной площади и зарождению относительно большого первичного газового объема (ПГО) непосредственно у кромки купола.

Сегодня пока еще нельзя однозначно ответить на вопрос, что является причиной, а что следствием поднятия кромки в начальный момент: вихреобразование у кромки купола или же колебания строп.

По одной из версий подготовительный этап начинается с момента, когда суммарная амплитуда пакета бегущих в стропах (от коуша к кромке) волн, приподнимет кромку и возникнут благоприятные условия для зарождения у кромки купола первичного газового объема, начинающего свое продвижение от кромки к полюсу под действием скоростного напора набегающего потока.

ПГО, продвигаясь под куполом от кромки к полюсу, удерживает в приоткрытом состоянии часть кромки купола, что позволяет непрерывно подпитывать ПГО, рис. 3.

Далее, продвигаясь под куполом от кромки к полюсу, ПГО непрерывно теряет свою массу и энергию как под воздействием сопротивления трения внутренней поверхности купола, так и из-за наличия проницаемости купола.

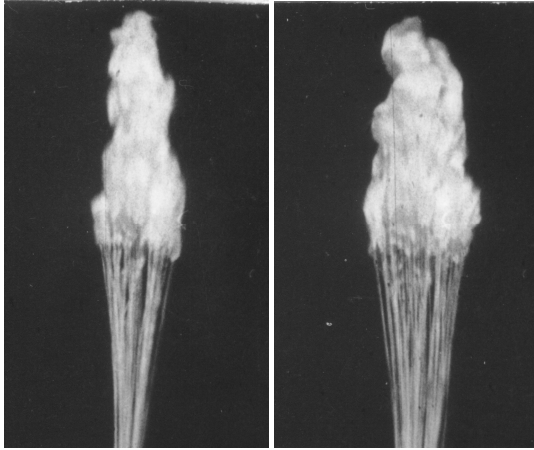


Рис. 3. Динамика продвижения ПГО к полюсу купола

У полностью вытянутого из упаковки (на всю длину) купола парашюта большой площади достаточно длинный путь от кромки к полюсу, который необходимо преодолеть первичному газовому объему, возникающему у кромки купола от пакета волн со стороны строп, приоткрывающих кромку, а значит и тем больше возможные потери массы и кинетической энергии ПГО.

Чем меньше радиус ПГО, тем меньше вероятность того, что ПГО достигнет полюса, непрерывно удерживая приоткрытой кромку и, меньше вероятность, что начнется основной этап процесса наполнения. В процессе продвижения ПГО, из-за большой длины купола, может возникнуть перемишка схлопнувшейся ткани купола между кромкой и ПГО, что прекращает подпитку массой воздуха ПГО, и он, теряя свою массу и энергию, прекращает свое существование, так и не достигнув полюса.

А это означает, что подготовительный этап наполнения прекратился, а основной – так и не начался. Процесс зарождения ПГО начинается сначала.

Может пройти две, три и более попыток реализации подготовительных этапов, – попыток зарождения ПГО и продвижения его к полюсу (количество таких попыток возрастает с увеличением площади купола).

Когда, наконец, последняя из попыток окажется удачной и ПГО достаточного размера достигнет полюса, организовав канал непрерывной доставки воздуха от кромки к полюсу купола, поддерживаемого в натянутом, открытом для потока воздуха со стороны кромки состоянии, то этим завершается подготовительный этап процесса наполнения.

В этом состоянии уже начинает прослеживаться профильная геометрия купола типа: «полусфера–усеченный конус», и этот момент уже считается началом основного этапа процесса наполнения парашюта, рис. 4 (фото 2).



Рис. 4. Завершение подготовительного этапа

Как видим, время полного наполнения парашюта существенно зависит от времени протекания подготовительного этапа (от числа безуспешных попыток его реализации) и является случайной величиной, имеющей свой закон распределения и степень рассеивания (дисперсию). Очевидно, что степень рассеивания времени наполнения тем больше, чем больше радиус (площадь) парашюта и чем меньше амплитуда и частота бегущих в стропках волн, способствующих зарождению ПГО.

Все же летные экспериментальные исследования показали, что подготовительный этап процесса наполнения купола протекает не совсем случайным образом, а по определенным законам, скрытым иногда за шумом множества мелких массовых случайных явлений, которые маскируют тренд детерминированного процесса и могут влиять на длительность протекания подготовительного этапа. Это позволяет надеяться в перспективе на возможность построения его математической модели.

С точки зрения идеального наполнения купола большой площади, на подготовительном этапе необходимо, чтобы ПГО достаточно большого объема зарождался со строго определенной частотой (зависящей от радиуса купола) и непрерывно шли друг за другом на относительно небольшом расстоянии друг от друга, рис. 3.

В этом случае входное отверстие купола будет принудительно поддерживаться приоткрытым, и будет обеспечен доступ воздуха к первому, теряющему большую часть своей кинетической энергии ПГО, а следующий за ним ПГО будет подпитываться его своей кинетической энергией и массой (в случае их слияния). В этом случае следует ожидать относи-

тельно небольшое, вполне приемлемое время на-
полнения купола на подготовительном этапе.

Что еще кроме пакета волн, генерируемых
стропами, может приподнимать кромку, способст-
вующая зарождению ПГО?

Очевидно, что это могут быть неслучайные
процессы появления и непрерывного изменения уг-
ла атаки потока перед кромкой купола вследствие
непрерывного изменения траекторного угла систе-
мы объект-парашют (в случае сбрасывания системы
из горизонтально летящего ЛА).

Это могут быть и случайные процессы появле-
ния горизонтальной составляющей скорости потока,
растаскивающей кромку, вследствие погружения
объекта в более плотные слои атмосферы с различ-
ной степенью турбулентности.

Это могут быть и случайные процессы появле-
ния колебаний объекта на траектории, что способст-
вует генерированию волн в стропах в направлении
от объекта к куполу.

Таким образом, случайность в процессе рас-
крытия приобретает значительный вес, что и объяс-
няется большими разбросами времени наполнения
больших парашютов.

С увеличением количества, а, следовательно, и
массы строп у куполов больших площадей увеличи-
вается их инерционность, возрастает взаимодейст-
вие их путем трения, что гасит большую часть энер-
гии волновых процессов в стропах, ухудшая усло-
вия возникновения ПГО у кромки, а значит, и усло-
вия протекания подготовительного этапа наполне-
ния купола в целом.

Анализ кинограмм процесса протекания подго-
товительного этапа у парашютов больших площадей
позволил разложить процесс на ряд характерных
составляющих, оказывающих существенное влияние
на характер протекания подготовительного этапа:

–флаттер (флагирующие колебания) купола и
строп;

–характер зарождения первичного газового
объема у кромки под куполом и его динамика про-
движения к полюсу;

–структура волновых процессов (волнообразо-
вание на поверхностях строп и купола, амплитуда и
частота бегущих волн, скорость их распростране-
ния);

–динамика развития наполняемой и не напол-
ненной частей купола по времени; флаттер невы-
полненной части купола и влияние его на продви-
жение ПГО к полюсу.

Флаттер (флагирование) купола и строп оказы-
вает существенное влияние на зарождение ПГО у
кромки под куполом парашюта. Флаттер строп
(включая длинноволновые колебания строп малой
амплитуды), как показывает анализ кинограмм, мо-

гут являться причиной зарождения ПГО у кромки
купола и способствовать процессу протекания под-
готовительного этапа (процессу продвижения ПГО к
полюсу купола).

Колебания строп могут быть генерированы ко-
лебаниями точки подвески парашюта к объекту (т.е.
колебаниями самого объекта), а также нужно учи-
тывать собственные упругие колебания строп под
действием скоростного напора набегающего потока
(аналогия – растряхивание парашютистом строп
запасного парашюта с целью улучшения его напол-
нения при введении его в действие при отказе ос-
новного парашюта).

Вихреобразование и характер течения у кромки
купола могут являться дополнительным (а иногда и
основным) источником зарождения ПГО и способ-
ствовать его продвижению к полюсу, обеспечивая,
таким образом, нормальное протекание подготови-
тельного этапа.

Как уже отмечалось выше, центральным мо-
ментом в процессе реализации подготовительного
этапа является зарождение ПГО у кромки купола и
динамика его продвижения к полюсу. Появление
ПГО может быть следствием упругих колебаний
строп парашюта под воздействием скоростного на-
пора набегающего потока. В процессе упругих ко-
лебаний происходит расщепление строп на группы,
причем в одной из них (меньшей по объему) возни-
кает длинная волна в направлении от коуша к кром-
ке, которая в момент достижения ею кромки может
приподнять кромку, способствуя зарождению ПГО
под воздействием набегающего потока.

Далее, динамика продвижения ПГО к полюсу
может быть существенно различной.

Либо ПГО начнет увеличиваться в размерах,
интенсивно продвигаясь вперед, и достигнет полюса
(рис. 3, 4), либо наоборот, незначительно сместив-
шись от кромки, прекратит свое существование. В
последнем случае необходим новый волновой им-
пульс со стороны строп для того, чтобы вновь поя-
вился ПГО в районе кромки и начался подготови-
тельный этап.

Анализ кинограмм показал, что на механизм
зарождения и движение ПГО может оказывать
структура волновых процессов на поверхности
строп и купола: волнообразование, амплитуда и час-
тота бегущих поверхностных волн, скорость их рас-
пространения, волновой спектр. Волны, накладыва-
ясь, могут усиливать друг друга, способствуя интен-
сивному продвижению к полюсу ПГО и, наоборот,
складываясь противоположного знака амплитудами,
ослабляют друг друга и уничтожают ПГО, ухудшая
процесс протекания подготовительного этапа. При
этом можно проследить волны определенных ам-
плитуд и частот, интенсифицирующие нормальное

протекание подготовительного этапа и, наоборот, блокирующие его. Появление тех или иных волн зависит от скорости набегающего потока, радиуса купола, его жесткостных и упругих характеристик, воздухопроницаемости основы, специфики обтекания кромки входного сечения купола, турбулентности потока перед входным сечением купола.

Анализ кинограмм процесса наполнения куполов парашютов площадью 500 и 1000 м² показал, что формирование звездообразности контура кромки входного сечения к моменту окончания подготовительного этапа, что определяет всю дальнейшую динамику развития процесса на основном этапе наполнения, зависит от характера развития выполняемой и невыполняемой частей купола во времени, а также от флаттера невыполненной части и ее влияния на продвижение ПГО к полюсу.

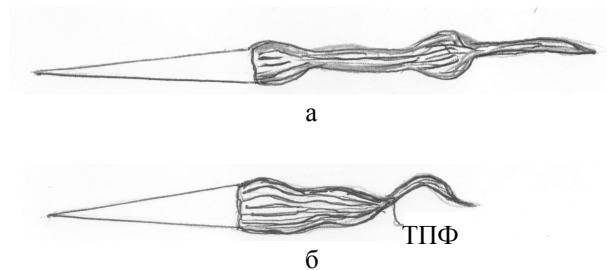


Рис. 5. Характерные крайние случаи процесса протекания подготовительного этапа

На рис.5 представлены два характерных крайних случая.

Для случая а), когда процесс (подготовительный этап) проходит в виде последовательных дискретных бегущих волн, движущихся от кромки к полюсу так, что между ними образуется значительный интервал (более 0,2 от безразмерного радиуса купола), а полюсная невыполненная часть не совершает энергичных колебаний, процесс проходит плавно, форма контура входного сечения явно звездообразная, время протекания основного этапа процесса наполнения при этом существенно возрастает, аэродинамическая нагрузка на парашют на основном этапе относительно невелика.

В случае б), когда процесс (подготовительный этап) проходит интенсивно в виде непрерывно расширяющегося ПГО у кромки, одновременно смещающегося к полюсу, а полюсная невыполненная часть совершает энергичные колебания относительно точки основания переднего фронта (ТПФ) прямой волны, форма контура входного сечения значительно близка к кругу, время протекания основного этапа процесса наполнения при этом существенно уменьшается, аэродинамическая нагрузка на парашют существенно возрастает.

Все остальные случаи, реализуемые на подго-

товительном этапе процесса наполнения, могут представлять собой среднее между случаями а) и б).

Из сказанного выше следует, что в настоящее время требуют детального исследования и остаются до конца невыясненными следующие вопросы:

- особенности флаговых колебаний парашюта на подготовительном этапе;
- механизм вихреобразования и характер течения у кромки купола;
- механизм образования длинных волн с большой амплитудой в расщепленных пучках строп и механизм расщепления строп на пучки;
- диапазоны длин и частот волн на поверхности купола как интенсифицирующие, так и подавляющие процесс зарождения и продвижения ПГО к полюсу; механизм их образования.

Детальное изучение этих вопросов позволит понять механизм протекания подготовительного этапа, построить его математическую модель, исследовать ее, получить новые выводные знания о нем и научиться им управлять, а, следовательно, управлять основными аэродинамическими характеристиками парашюта и на основном этапе процесса наполнения.

По результатам обработки летного эксперимента для парашюта площадью 1000 м² удалось получить приближенные эмпирические зависимости для:

- безразмерного радиуса ПГО:

$$\bar{r} = \frac{r}{S_0} = 0,05 + 0,13 \frac{t}{t_{\pi}};$$

- безразмерной длины наполняемой части купола:

$$\bar{h} = \frac{h}{S_0} = 0,15 + 0,7 \frac{t}{t_{\pi}};$$

- средней скорости распространения ПГО:

$$V = 0,35V_0,$$

где r – радиус выполненной части купола (входного сечения) на подготовительном этапе;

S_0 – радиус купола в раскрое;

t – время текущее;

t_{π} – время протекания подготовительного этапа;

h – длина выполненной части купола на подготовительном этапе;

V_0 – скорость груза в момент начала наполнения.

Формула для безразмерного радиуса, например, позволяет установить предельный по наполняемости

размер полюсного отверстия купола парашюта.

Экспериментально установлено [4], что предельная площадь полюсного отверстия должна быть вдвое меньше площади миделевого сечения купола в момент окончания подготовительного этапа. Из формулы для безразмерного радиуса при $t = t_{\text{п}}$ следует, что предельная величина площади полюсного отверстия для куполов площадью 500 и 1000 м² составляет порядка 10 м², что и подтверждается летным экспериментом.

Приведенного выше экспериментального материала, по мнению автора, уже достаточно для того, чтобы начать разработку математической модели процесса протекания подготовительного этапа парашютов больших площадей, используя как аналитические методы, так и статистические методы испытаний, основывающиеся на принципах компьютерного моделирования.

Выводы

1. Обоснована необходимость исследования подготовительного этапа процесса наполнения парашютов больших площадей.
2. Рассмотрен и подробно описан по материа-

лам летных испытаний подготовительный этап процесса наполнения купола, что открывает в дальнейшем перспективу построения математической модели подготовительного этапа процесса наполнения парашютов больших площадей.

Литература

1. Иванов, П. И. Летные испытания парашютных систем [Текст]: моногр. / П. И. Иванов. – Феодосия: «Гранд-С плюс», 2001. – 332 с.
2. Fu, Kuang-Hua. Theoretische Untersuchung zum Füllvorgang eines flexiblen Fallschirm-Last-Systems [Text] / Kuang-Hua Fu // Deutsche Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht. – Porz-Wahn: Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, 1975. – 122 s.
3. Исследование первой стадии наполнения парашюта [Текст]: отчет о НИР: №17330-80/ НИИ ПС; исполн. Л.В. Кузьмина. – М., 1980. – 150 с.
4. Летные экспериментальные исследования влияния основных факторов на наполняемость парашютов больших площадей [Текст]: отчет о НИР: №4822.34-82 / Феодосийский филиал НИИ Парашютостроения; исполн. П. И. Иванов. – Феодосия, 1982. – 150 с. – № ГР X 71450.

Поступила в редакцию 17.12.2013, рассмотрена на редколлегии 12.03.2014

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Г. С. Абрамов, Херсонский национальный технический университет, Херсон.

ПІДГОТОВЧИЙ ЕТАП ПРОЦЕСУ НАПОВНЕННЯ ПАРАШУТІВ ВЕЛИКИХ ПЛОЩИН

П. І. Іванов

У роботі розглядається підготовчий етап - один з найважливіших етапів процесу наповнення парашутів великих площин основного класу. Приводяться та обґрунтовуються причини, що примушують розроблювачів парашутів великих площ проводити детальні дослідження підготовчого етапу. Приводяться деякі експериментальні факти за результатами літних випробувань парашутів основного класу площин 500-1500 м². Виявлено ряд істотних факторів, які можуть бути можливими причинами уповільнення або прискорення процесу наповнення парашутів на підготовчому етапі. Приведено деякі безрозмірні емпіричні залежності, що характеризують динаміку процесу наповнення куполів великих площин на підготовчому етапі.

Ключові слова: парашути великих площин, основний клас, підготовчий етап, процес наповнення.

THE PREPARATORY PHASE OF FILLING PROCESS OF LARGE-AREA PARACHUTES

P. I. Ivanov

The preparatory phase is being examined in the work – it is one of the most important phases of filling process of large-area parachutes of the main class. The reasons that make the developers of large-area parachutes of the main class carry out detailed researches of the preparatory phase are being put and justified. Some experimental facts according to the results of flight tests of the main parachutes with the area 500-1500 m² are being referred. The line of material factors that can be probable reasons of the deceleration or the acceleration of filling process of parachutes in the preparatory phase has been revealed. Some dimensionless empirical dependence defining the dynamics of filling process of large-area canopies in the preparatory phase are given.

Key words: large-area parachutes, the main class, the preparatory phase, filling process.

Іванов Петр Иванович – д-р техн. наук, проф., Феодосийский факультет ХНТУ, г. Феодосия, Украина, e-mail: Ivanovpetr@rambler.ru.