

УДК 533.666.2: 629.7

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ КРОМКИ КУПОЛА КРУГЛОГО ПАРАШЮТА

С.В. ЖУРИН, А.Л. ПОЛОВНЕВ

Статья представлена доктором технических наук Петровым Н.К.

Статья посвящена обработке и анализу видеозаписи работы парашюта, полученной во время летного эксперимента при пуске метеоракеты ММР-06 с целью определения основных характеристик колебательного процесса кромки купола во время движения на дозвуковой скорости в диапазоне высот от 42,2 км до 34,2 км. Анализ данных показал, что процесс колебаний кромки купола носит случайный характер. В результате частотного анализа выявлена собственная частота колебаний конструкции 2,4 Гц, которая определяется жесткостью капроновых строп.

Ключевые слова: парашют, пульсации купола парашюта, жесткость конструкции парашюта.

ВВЕДЕНИЕ

В литературе по парашютной тематике встречаются теоретический анализ и результаты экспериментальных исследований аэроупругих пульсаций куполов [1 – 3], поперечных и продольных колебаний строп и соединительных звеньев под действием набегающего потока [4]. Большинство экспериментальных исследований проводились на модельных парашютах в лабораторных условиях. В данной статье приводятся результаты летного эксперимента.

В летном эксперименте ММР-06 7 октября 2011 года проводилась видеосъемка работы парашюта. Конструкция парашютной системы и постановка эксперимента описана в работах [5, 6]. На видеозаписи хорошо заметны колебания кромки купола парашюта. Целью данной работы является исследование закономерностей этого колебательного процесса.

АНАЛИЗ ВИДЕОЗАПИСИ

Покадровый анализ видеозаписи позволяет получить количественные оценки колебательного процесса кромки купола. На рис. 1 показаны зависимости безразмерного видимого радиуса купола от времени по трем угловым направлениям. Слева от графиков показана схема с выбранными направлениями, в которых программным способом измеряются радиусы купола на каждом кадре видеозаписи. Значения радиусов r обезразмерены на средние значения R_{cp} на всем исследуемом временном диапазоне. Анализ колебательного процесса кромки купола начинается с момента прекращения углового движения груза относительно купола и заканчивается моментом окончания видеозаписи. Исследуемый временной диапазон составляет 115 с. За это время параметры движения парашютной системы (ПС) [7] изменяются следующим образом: высота падает с 42,2 км до 34,2 км, скорость уменьшается с 89 м/с до 48 м/с, число Рейнольдса Re возрастает от $8 \cdot 10^4$ до $1,5 \cdot 10^5$. Из графиков рис. 1 видно, что колебания кромки купола носят случайный характер. Амплитуда колебаний видимого местного радиуса купола по трем выбранным направлениям составляет 5 % – 6 %.

На графиках рис. 1 можно заметить периодическое резкое понижение значения радиуса. Примерные характеристики этих выпадков: период 6 с ÷ 10 с, амплитуда 5 % ÷ 10 %, продолжительность 1,5 с ÷ 2 с. Периодическое уменьшение видимого радиуса в рассматриваемых направлениях объясняется деформацией купола при движении под углом атаки к набегающему потоку и угловым движением ПС относительно своей продольной оси [6]. При движении ПС под углом атаки кромка купола, направленная навстречу набегающему

потоку, поджимается так, что видимый радиус купола в этом месте уменьшается. Деформация купола по трем выбранным направлениям происходит последовательно. На графиках рис. 1 наклонными серыми линиями схематично связаны выпадения значений местного радиуса за соответствующие периоды обращения. По деформациям купола достаточно точно отслеживается период продольного вращения ПС, он составляет примерно $6 \text{ с} \div 10 \text{ с}$, что совпадает с результатами анализа засветки купола солнцем [6].

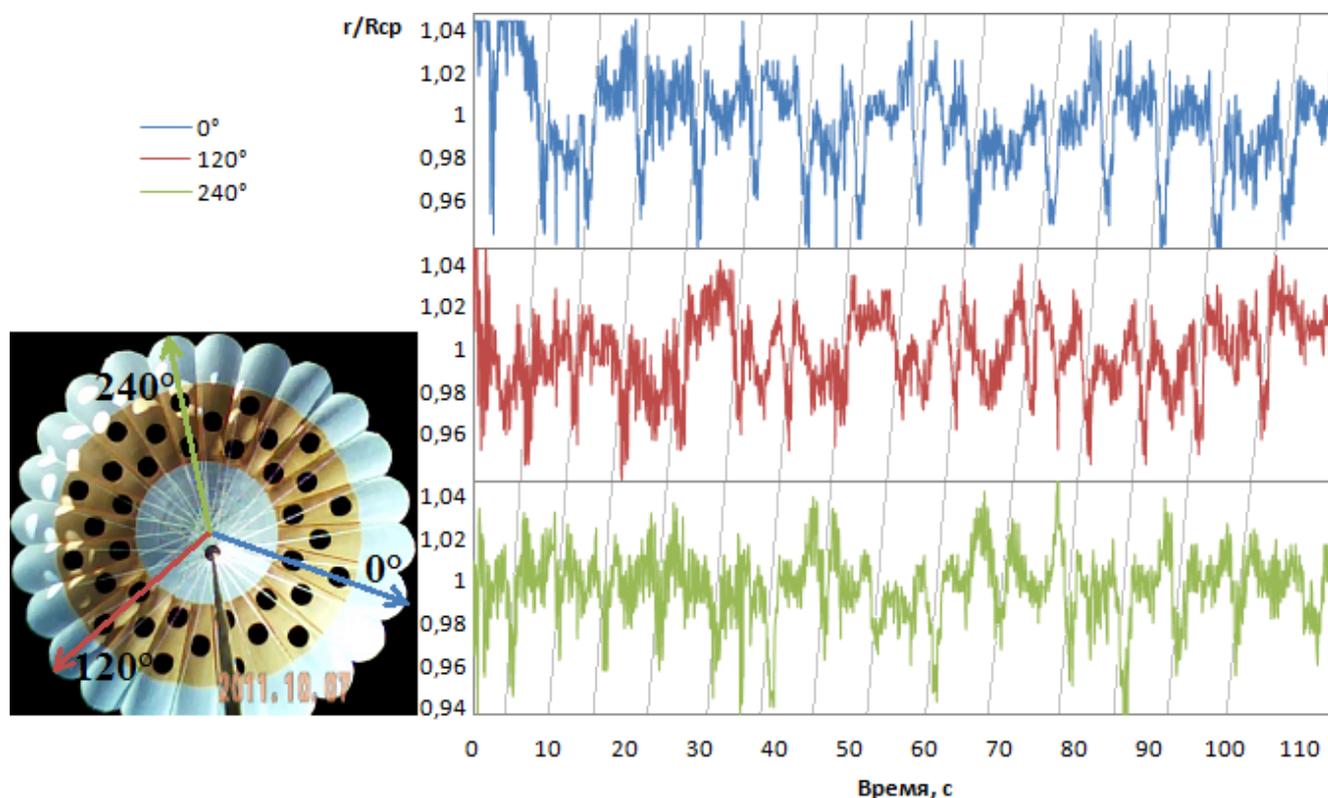


Рис. 1. Колебания кромки купола

По результатам измерения видимого радиуса купола проведен частотный анализ с целью оценки спектральной плотности случайных колебаний [8]. В некоторых местах исходной видеозаписи имеются потери кадров, поэтому сначала проведена интерполяция исходных данных кубическим сплайном на равномерный шаг по времени с частотой дискретизации 30 Гц. Оценка спектральной плотности осуществляется со следующими параметрами: число усреднений 42, длина порции 10 с, перекрытие соседних порций 75 %, взвешивание сигнала по времени окном Хеннинга, временной интервал анализа от 0 с до 112,5 с. Относительная случайная ошибка полученной оценки спектральной плотности 0,24, что составляет погрешность оценки $\pm 4 \text{ дБ}$ с доверительной вероятностью 95 %.

Полученная оценка спектральной плотности показана в виде графика на рис. 2. Графики для направлений 120° и 240° практически совпадают. Отличие от них значений для направления 0° вызвано погрешностями за счет того, что правая сторона купола на рис. 1 во время съемки иногда выходила за пределы видимости видеокамеры.

Для всех кривых значения спектральной плотности имеют два ярко выраженных максимума при значениях частоты $0 \text{ Гц} \div 0,3 \text{ Гц}$ и $2,4 \text{ Гц}$. Первый максимум можно объяснить периодическими изменениями видимого радиуса купола при угловом движении ПС относительно своей продольной оси с частотой $0,1 \text{ Гц} \div 0,17 \text{ Гц}$ [6]. Второй максимум вызван проявлением собственной частоты конструкции ПС при взаимодействии ее с набегающим потоком.

Основной вклад в определение собственной частоты конструкции парашюта вносит система строп. Они изготовлены из шнура ШКП-60 [5], механические свойства которого показаны на графике рис. 3 в виде зависимости нагрузки от деформации [9, 10].

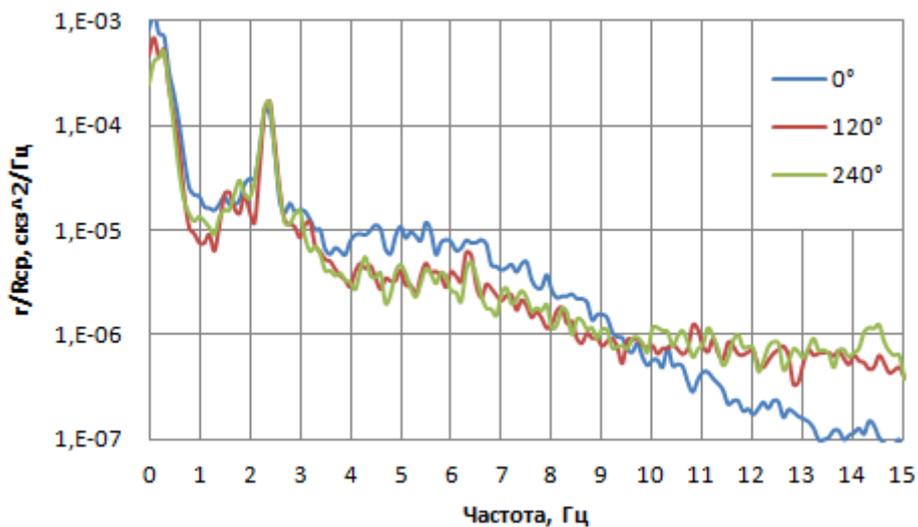


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности от частоты; оценка собственной частоты конструкции

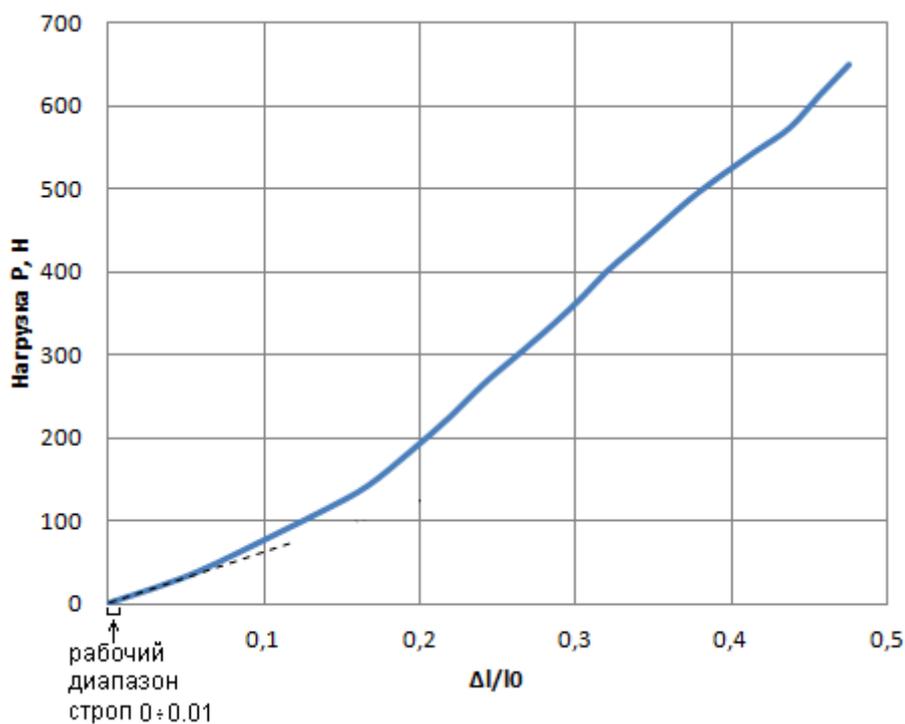


Рис. 3. Зависимость нагрузки от деформации для капронового шнура ШКП-60

Масса груза (головная часть, вертлюг и тросовое звено) $m_{\Gamma} = 10,9 \text{ кг}$. Парашют содержит 24 стропы длиной 5,16 м и массой $m_{ст} = 10 \text{ г}$ каждая [5]. На каждую стропу приходится статическая нагрузка в 4,3 Н. Деформация при такой нагрузке составляет не более одного процента ($\Delta l/l_0 \leq 0,01$). В этом диапазоне зависимость напряжения от деформации можно принять линейной с коэффициентом пропорциональности равным производной при $\Delta l/l_0 \rightarrow 0$ (на рис. 3 показана пунктиром). Жесткость каждой стропы $k \approx 120 \text{ Н/м}$. Собственная частота колебаний конструкции из $n = 24$ строп вычисляется по формуле [4, 11]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n \cdot k}{m_r + \frac{1}{3} n \cdot m_{ст}}},$$

и составляет 2,6 Гц. Отличие от собственной частоты, полученной в результате частотного анализа (рис. 2), менее 10 %. Отличие может быть обусловлено отсутствием учета жесткости купола, погрешностью определения массы груза, технологическими допусками при изготовлении парашюта.

ВЫВОДЫ

Процесс колебаний кромки купола носит случайный характер.

Частотный анализ выявил собственную частоту 2,4 Гц.

Собственная частота определяется, в первую очередь, жесткостью системы капроновых строп. Отличие оценки собственной частоты по жесткости конструкции от значения, полученного в результате частотного анализа, составляет не более 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носарев И.М. Аэродинамические исследования парашютов при различных углах атаки // Труды ЦАГИ. 1976. Вып. 1735. – 41 с.
2. Рахматулин Х.А., Рысев О.В. Исследования автоколебаний купола парашюта. Парашюты и проницаемые тела // Научные труды НИИ механики МГУ. 1975. № 35. – С. 36 – 51.
3. Roberts B.W. Axi-Symmetric, Self-Excited Oscillations in Parachutes. - AIAA Paper, No. 73-452, 11 p, 1973.
4. Stevens G.W.H. A Theory of Vibration in Parachutes. – Journal of Aircraft, vol. 9, No 1, 1972.
5. Журин С.В., Гвоздев Ю.Н., Лыков А.Д. Обработка и анализ данных натурального эксперимента по определению траекторных характеристик круглого парашюта на больших высотах // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 65 – 70.
6. Журин С.В., Леонов С.В., Мехоношин Ю.Г. Обработка и анализ данных натурального эксперимента по определению характеристик движения круглого парашюта по траектории в виде спирали на больших высотах // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 71 – 78.
7. ГОСТ 21452-88 Системы парашютные. Термины и определения. – М.: Изд. стандартов. 1988. – 16 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. – М.: Мир. 1989. 402 с.
9. Справочник № 27149-10 Диаграммы растяжения технических лент и шнуров. – М.: НИИ парашютостроения. 2010. – 46 с.
10. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. – М.: Физматлит. 2009. – 576 с.
11. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М.: Машгиз. 1957. – 338 с.

FREQUENCY ANALYSIS OF VIBRATIONS OF THE ROUND PARACHUTE EDGE

Zhurin S.V., Polovnev A.L.

The article is addressed to the analysis of the videos obtained during flight experiment at the launch of meteo-rocket MMP-06 in order to determine main characteristics of the oscillatory process the edges of the canopy at subsonic speeds at altitudes from 42,2 km to 34.2 km. Data analysis demonstrated that the oscillations of the edge of the canopy has a random character. The structure frequency of 2.4 Hz was identified from the analysis to be determined by the nylon sling stiffness.

Key words: parachute, parachute canopy ripple, rigidity parachute.

REFERENCES

1. **Nosarev I.M.** Aehrodinamicheskie issledovaniya parashyutov pri razlichnikh uglakh ataki [Aerodynamic research parachutes at different angles of attack. Proceedings of CAHI] Moscow. Trudih CAGI. 1976. Vihpusk 1735. 41 p. (In Russian)
2. **Rakhmatulin Kh.A., Rihsev O.V.** Issledovaniya avtokolebaniyj kupola parashyuta. Parashyutih i pronicaemihe tela [Studies of oscillation parachute canopy. Parachutes and permeable bodies. Scientific Proceedings of the Institute of Mechanics, Moscow State University] Moscow. Nauchnihe Trudih NII mekhaniki MGU. 1975. № 35. PP. 36 – 51. (In Russian)
3. **Roberts B.W.** Axi-Symmetric, Self-Excited Oscillations in Parachutes. - AIAA Paper, No. 73-452, 11 p, 1973.
4. **Stevens G.W.H.** A Theory of Vibration in Parachutes. – Journal of Aircraft, vol. 9, No 1, 1972.
5. **Zhurin S.V., Gvozdev Yu.N., Lihkov A.D.** Obrabotka i analiz dannihkh naturnogo ehksperimenta po opredeleniyu traektornihkh kharakteristik kruglogo parashyuta na boljshikh vihsotakh [Data processing and analysis of natural experiment by definition of round parachute trajectory characteristics at high altitudes. Scientific Bulletin MSTUCA] Moscow. Nauchnihyj vestnik MGTU GA. 2015. № 211. PP. 65 – 70. (In Russian)
6. **Zhurin S.V., Leonov S.V., Mekhonoshin Yu.G.** Obrabotka i analiz dannihkh naturnogo ehksperimenta po opre-deleniyu kharakteristik dvizheniya kruglogo parashyuta po traektorii v vide spirali na boljshikh vihsotakh [Data processing and analysis of natural experiment by definition of round parachute characteristics along a spiral path at high altitudes. Scientific Bulletin MSTUCA] Moscow. Nauchnihyj vestnik MGTU GA. 2015. № 211. PP. 71 – 78. (In Russian)
7. GOST 21452-88 Sistemih parashyutnihe. Terminih i opredeleniya. [Systems parachute. Terms and Definitions] Moscow. Izd. standartov. 16 p. (In Russian)
8. **Bendat Dzh., Pirsol A.** Prikladnoyj analiz sluchajnihkh dannihkh [Applied analysis of random data]: Per. s angl. / Moscow. Mir. 1989. 402 p. (In Russian)
9. Spravochnik № 27149-10 Diagrammih rastyazheniya tekhnicheskikh lent i shnurov. [Reference № 27149-10 Stress-strain diagrams of technical tapes and cords] Moscow. NII parashyutostroe-niya. 2010. 47 p. (In Russian)
10. **Lyalin V.V., Morozov V.I., Ponomarev A.T.** Parashyutnihe sistemih. Problemih i metodih ikh resheniya [Parachute system. Problems and their solutions] Moscow. Fizmatlit. 2009. 576 p. (In Russian)
11. **Panovko Ya.G.** Osnovih prikladnoyj teorii uprugikh kolebaniyj. [Fundamentals of applied theory of elastic vibrations] Moscow. Mashgiz. 1957. 338 p. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Журин Сергей Викторович, 1981 г.р., окончил МФТИ (2004), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела аэрогазодинамики и теплообмена РКК "Энергия" им. С.П. Королева", автор 28 научных работ, область научных интересов – проектирование космических возвращаемых аппаратов, конвективный теплообмен при движении в атмосфере с гиперзвуковыми скоростями, парашюты, мягкая парашютная посадка, электронный адрес: zhur_serg@rambler.ru.

Половнев Антон Леонидович, 1976 г.р., окончил МГУЛ (1998), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела аэрогазодинамики и теплообмена РКК "Энергия" им. С.П. Королева", автор 20 научных работ, область научных интересов – проектирование космических пилотируемых модулей, акустика, частотный анализ случайных процессов, определение места пробоя гермооболочки КА по данным акустических измерений, электронный адрес: zhur_serg@rambler.ru.