

УДК 533.666.2: 629.7

## ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ КРУГЛОГО ПАРАШЮТА ПО ТРАЕКТОРИИ В ВИДЕ СПИРАЛИ НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ

С.В. ЖУРИН, С.В. ЛЕОНОВ, Ю.Г. МЕХОНОШИН

Статья представлена доктором технических наук, профессором Ципенко В.Г.

Статья посвящена обработке и анализу траекторных параметров и видеозаписи, полученных во время лётного эксперимента при пуске метеороакеты ММР-06, с целью определения основных параметров движения круглого парашюта на дозвуковой скорости в диапазоне высот от 0 км до 40 км. Анализ данных показал, что траектория движения ПС представляет собою спираль, «растянутую» ветром в горизонтальном направлении и возмущённую случайными факторами нестационарного обтекания парашюта. По экспериментальным данным получены зависимости основных параметров движения ПС. В литературе по парашютной тематике встречается только качественный анализ спиралевидных траекторий движения круглых парашютов. В данной статье получены количественные характеристики этого процесса.

**Ключевые слова:** парашют, зондирование атмосферы, профиль ветра по высоте, движение по спирали, аэродинамические характеристики парашюта.

Условные сокращения и обозначения

ПС – парашютная система;

СО – система отсчёта;

СРЗА – сеть ракетного зондирования атмосферы;

$a_{зв}$  – скорость звука в среде, м/с;

$c_{п}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления парашюта;

$D_{в}$  – диаметр витка спирали траектории ПС, м;

$D_{п}$  – диаметр купола парашюта, м;

$F_{п}$  – площадь поверхности купола парашюта, м<sup>2</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – высота, м;

$h_{в}$  – шаг витка спирали траектории ПС, м;

$k_{п}$  – коэффициент конструктивной проницаемости;

$l_{зв}$  – длина звена, м;

$l_{ст}$  – длина строп, м;

$m_{г}$  – масса груза, кг;

$m_{ПС}$  – масса парашютной системы, кг;

$n = \frac{Q}{(m_{ПС} + m_{г})g}$  – перегрузка;

$Q$  – сила сопротивления парашюта, Н;

$\vec{V}$  – вектор скорости движения груза относительно неподвижной СО, м/с;

$\vec{V}_{сн}$  – вертикальная составляющая вектора  $\vec{V}$ , м/с;

$\vec{V}_{г}$  – горизонтальная составляющая вектора  $\vec{V}$ , м/с;

$\vec{V}_{тр}$  – вектор скорости движения груза относительно СО, связанной с осью спирали траектории ПС, м/с;  $\vec{V}_{в}$  – горизонтальная составляющая вектора  $\vec{V}_{тр}$ , м/с;

$\vec{V}_{к}$  – вектор скорости движения купола относительно СО, связанной с осью спирали траектории ПС, м/с;

$\vec{V}_{вк}$  – горизонтальная составляющая вектора  $\vec{V}_{к}$ , м/с;

$T_b$  – период обращения ПС по одному витку спирали траектории, м/с;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$Re = \frac{\rho \cdot V_k \cdot D_{\Pi}}{\mu}$  – число Рейнольдса;

$M = \frac{V_k}{a_{эв}}$  – число Маха;

$Ne = \frac{\rho F_{\Pi}^2}{m_{\Gamma}^3}$  – число Ньютона;

$\alpha$  – балансировочный угол атаки ПС, °;

$\beta$  – угол между вектором скорости купола  $\vec{V}_k$  и вертикалью, °;

$\gamma$  – угол между продольной осью ПС и вертикальной осью спирали траектории, °.

## Введение

Одним из способов исследования атмосферы Земли на высотах от 30 км до 100 км является регистрация её параметров при помощи ракетных зондов, которые доставляются на такую высоту специальными метеорокетами. Качество работы измерительной аппаратуры существенно зависит от условий обтекания зонда, скорости и плотности воздуха, углов атаки.

Во время лётного эксперимента ММР-06 7 октября 2011 г. ракетный зонд оснащался, кроме аппаратуры регистрации параметров атмосферы, бортовой навигационной системой GPS и видеокамерой, которая вела съёмку работы ПС. Данная работа посвящена обработке и анализу траекторных параметров и видеозаписи, полученных во время лётного эксперимента, с целью определения основных параметров движения круглого парашюта на дозвуковой скорости в диапазоне высот от 0 км до 40 км.

## Описание ПС

Для торможения в атмосфере головной части метеоракеты ММР-06 используется парашютная система СС-9635-64. Купол парашюта представляет собой плоский круг в раскрытое диаметром  $D_{\Pi} = 5,16$  м. Площадь парашюта  $F_{\Pi} = 20$  м<sup>2</sup>. Парашют содержит 24 стропы длиной  $l_{ст} = 5,16$  м. Груз крепится к парашюту с помощью стального тросового звена длиной  $l_{зв} = 1,49$  м.

Общая масса ПС составляет  $m_{ПС} \approx 1,9$  кг.

Головная часть ракеты ММР-06 является грузом ПС и представляет собой коническую конструкцию массой  $m_{\Gamma} \approx 10,5$  кг.

## Траектория полёта ПС

Пуск метеоракеты ММР-06 произведён 7 октября 2011 г. со станции СРЗА М-202 ФГБУ «ЦАО» в Волгоградской области. Время старта 16 ч 57 мин. Координаты точки старта: С 48,930187; В 45,779607.

После старта маршевый двигатель ракеты работает 9 с. После его выключения ракета движется по баллистической траектории. На восходящей ветви траектории на высоте 57 км происходит отделение головной части от ракеты и ввод в действие ПС. Парашют наполняется при движении головной части на восходящей ветви траектории.

Основные траекторные параметры ПС в зависимости от времени представлены на рис. 1. Основные изменения параметров движения происходят на первых сотнях секунд полёта, поэтому для удобства анализа на оси абсцисс сделан разрыв с интервалом от 400 с по 3900 с полёта. На рисунке приведены пять кривых, соответствующих: высоте  $H$ , вертикальной составляющей вектора скорости  $V_{сн}$ , числу  $Re$ , числу  $M$  и перегрузке  $n$ .

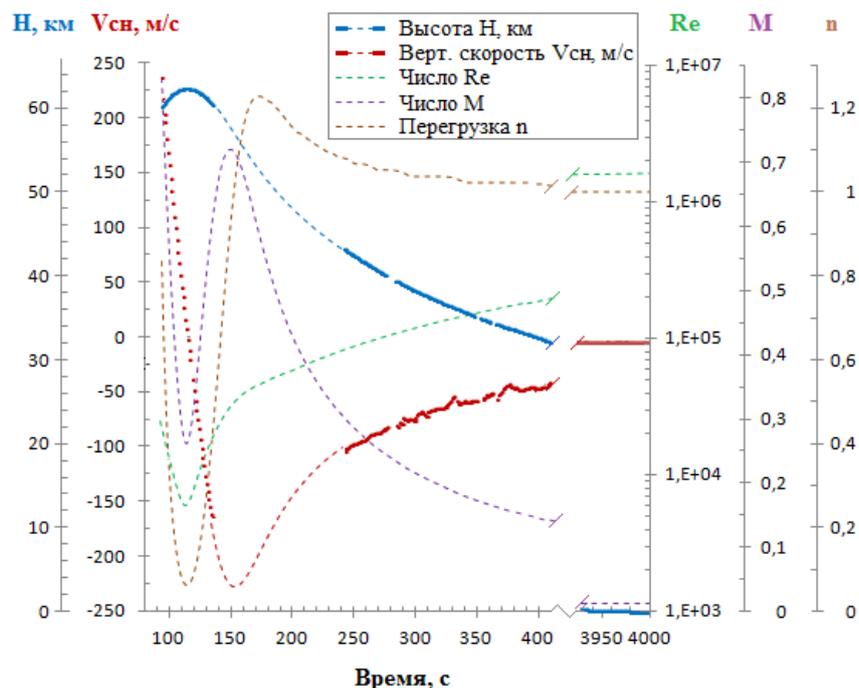


Рис. 1. Основные траекторные параметры ПС

Значения высоты и скорости, обозначенные точками, получены при помощи системы GPS. Там, где произошёл сбой бортовой системы GPS, пунктиром показаны расчётные значения. Кривые  $Re$ ,  $M$  и  $n$  построены полностью по результатам расчёта. Во время движения по траектории число  $Re$  изменяется на два порядка, от  $10^4$  до  $1,5 \cdot 10^6$ .

### Движение ПС по спирали

На графике рис. 2 показана зависимость горизонтальной составляющей скорости от высоты. Данные получены с помощью бортовой системы GPS. Характер зависимости носит крайне немонотонный и периодический характер. Красной линией показан график осредняющего полинома 10-й степени. Средние значения горизонтальной скорости ПС описывают профиль скорости ветра по высоте во время эксперимента.

При анализе рис. 2 можно сделать вывод, что траектория движения ПС формируется под воздействием хаотичных возмущений. Тем не менее в совокупности полученных экспериментальных кинематических параметров содержится информация о характере движения ПС. Дальнейший анализ экспериментальных данных показывает, что траектория ПС представляет собою *спираль* [3], растянутую в направлении ветра и возмущённую случайными факторами нестационарного обтекания.

На рис. 3 схематично показан участок траектории ПС в виде одного витка спирали, по которому движется груз. Без влияния ветра и случайных факторов нестационарного обтекания спираль траектории имеет вертикальную ось. Купол парашюта расположен ближе к оси спирали, чем груз. Продольная ось ПС с вертикальной осью спирали составляет угол  $\gamma$ . Геометрическими характеристиками траектории являются диаметр  $D_v$  и шаг  $h_v$  витка.

Во время видеосъёмки купола парашюта в полёте (16:59 – 17:04 7 октября 2011 г.) угол солнца составлял примерно  $13^\circ$  [4]. На видеозаписи хорошо видна периодическая засветка внутренней поверхности купола Солнцем (рис. 3, 4).

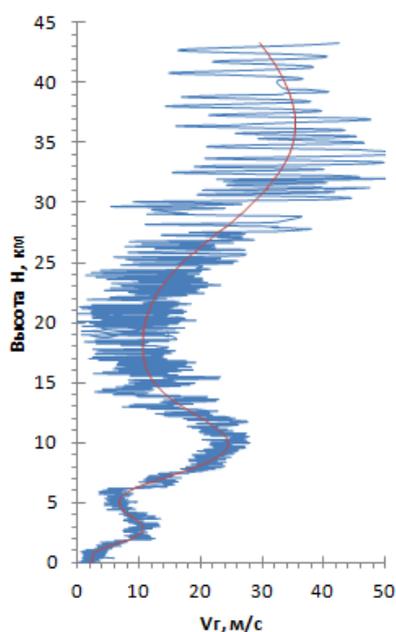


Рис. 2. Профиль горизонтальной скорости ПС по высоте

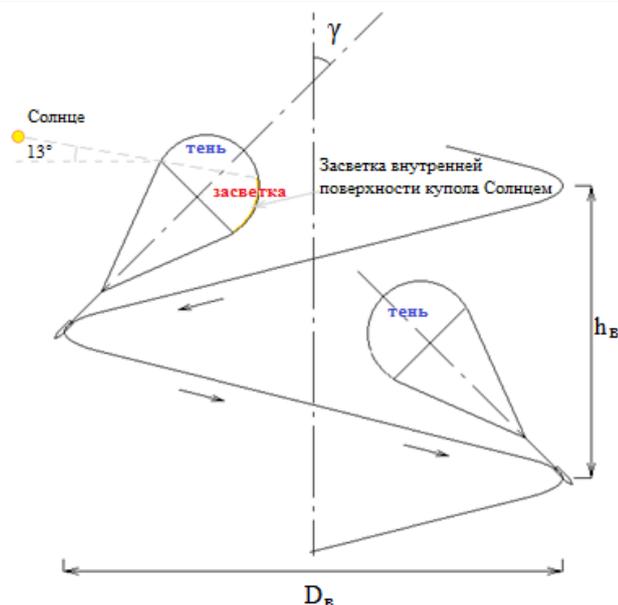


Рис. 3. Движение ПС по спирали

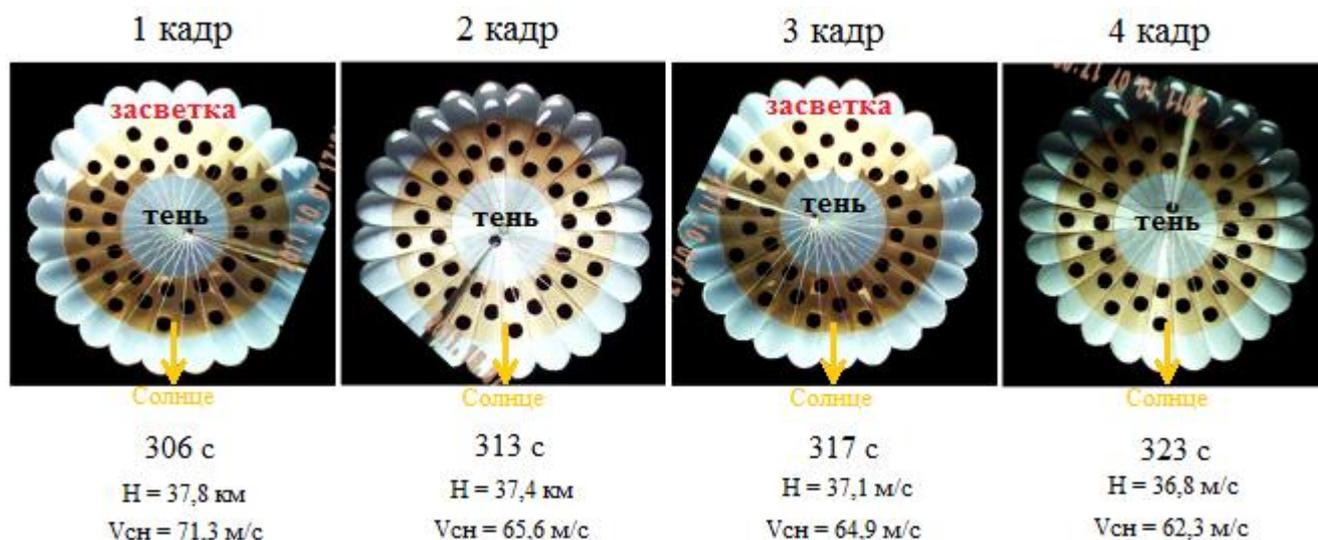


Рис. 4. Четыре кадра видеозаписи, соответствующие предельным углам отклонения оси ПС от направления на Солнце на участке траектории с 306 с по 323 с

На рис. 4 показаны четыре кадра видеозаписи, соответствующие моментам времени максимальных угловых отклонений оси ПС от направления на Солнце на участке траектории с 306 с по 323 с. На первом и третьем кадре показаны моменты максимальной засветки внутренней поверхности купола. На втором и четвертом кадре показана противоположная фаза – внутренняя поверхность купола в тени. Из-за смещения оси видеокamеры изображение купола «обрезано». За время с 306 с по 323 с ПС совершает 1,5 витка по траектории. Период обращения по витку составляет  $T_B = 10 \div 11$  с. Если предположить, что ПС совершает маятниковые колебания, то его длина будет около 30 м. Продольная длина исследуемой ПС не более 7 м. Выявленное несоответствие показывает, что исследуемая ПС совершает более сложное пространственное движение, чем математический маятник, т.е. движется по спирали.

По геометрическому месту положения тени от кромки купола на первом и третьем кадре рис. 4 можно оценить угол  $\gamma$  отклонения продольной оси ПС от вертикали. Если предположить, что купол парашюта имеет форму полусферы, то угол  $\gamma = 40 \div 50^\circ$ .

Проекция на горизонтальную плоскость части траектории движения ПС с 301 с по 323 с приведена на рис. 5. Оси означают направления по сторонам света. Начало координат и масштаб по осям выбраны для удобства представления данного участка траектории. Под действием ветра на этом участке траектории ПС движется с запада на восток. Между каждой точкой на кривой проходит 1 с полёта. Форма кривой и характер распределения точек на ней соответствуют движению объекта по возмущённой спирали, растянутой по направлению ветра. Сгущение точек означает уменьшение поступательной скорости, из скорости ветра вычитается скорость движения по витку спирали. Разрежение точек означает увеличение поступательной скорости, к скорости ветра добавляется скорость по витку спирали. На рис. 5 характерный размер витка спирали достигает 50 м. Красные точки соответствуют кадрам видеосъёмки на рис. 4. Жёлтой стрелкой показано направление на Солнце в текущее время [3]. В момент начала увеличения поступательной скорости парашют так ориентирован к Солнцу, что происходит максимальная засветка нижней поверхности купола (кадр 1 и кадр 3).

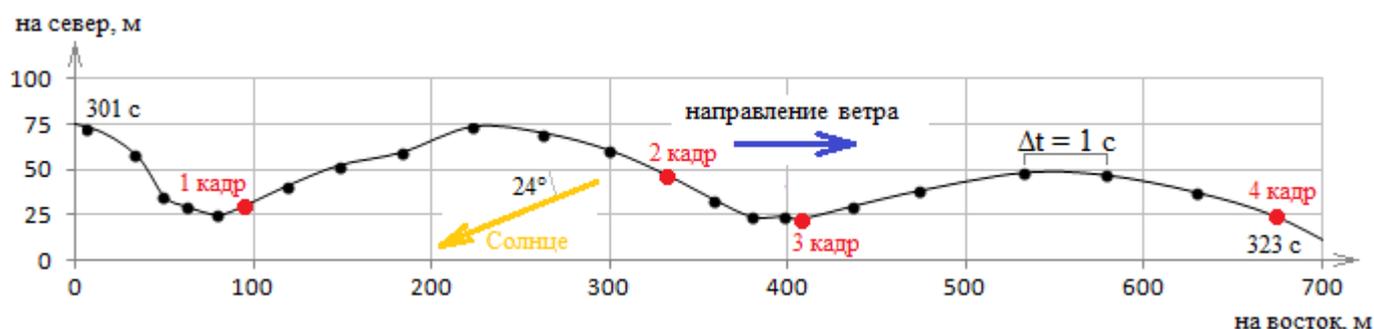


Рис. 5. Участок траектории с 301 с по 323 с, вид сверху

Машинная обработка [5] экспериментальных траекторных данных (рис. 2) осложняется значительными возмущениями от случайных факторов обтекания парашюта и сбоями при работе бортовой системы GPS. Горизонтальная составляющая скорости движения по каждому витку  $V_v$  спирали и период обращения  $T_v$  получены «вручную» последовательным анализом всей траектории. Результаты показаны на рис. 6 в виде графиков зависимостей  $V_v$  и  $T_v$  от высоты. На каждой кривой отмечено пять опорных точек для высот 0, 10, 20, 30 и 40 км. В окрестности каждой точки найдено среднеквадратичное отклонение результатов ручной обработки от среднего. Эти значения показаны в виде планок погрешности. На высоте 40 км скорость движения по витку  $V_v$  составляет примерно 12 м/с. С уменьшением высоты скорость  $V_v$  монотонно падает до значения 1,5 м/с у поверхности Земли. Период обращения по витку  $T_v$  на высотах от 0 км до 10 км составляет  $18 \div 20$  с, на высотах от 20 км до 40 км  $T_v = 10 \div 12$  с. На представленных экспериментальных данных (рис. 6) основываются дальнейшие рассуждения.

Изменения геометрических параметров спирали траектории  $D_v$  и  $h_v$  в зависимости от высоты показаны на графике рис. 7. Диаметр витка  $D_v$  находим из длины окружности, полученной при перемножении скорости  $V_v$  на период  $T_v$ . Погрешность  $D_v$  определяется как корень из суммы квадратов погрешностей  $V_v$  и  $T_v$  [5]. На высотах  $30 \div 40$  км диаметр витка составляет  $40 \div 45$  м, ниже  $D_v$  уменьшается, достигая  $\approx 10$  м у поверхности Земли. Значение шага спирали  $h_v$  определяется как произведение вертикальной скорости  $V_{ch}$  на период  $T_v$ . Погрешность определяется аналогично как для  $D_v$ . На высоте 40 км шаг витка достигает 950 м. Такие большие значения объясняются большой вертикальной скоростью  $V_{ch}$  (рис. 1). С уменьшением высоты  $h_v$  также монотонно уменьшается, достигая значений менее 100 м у Земли.

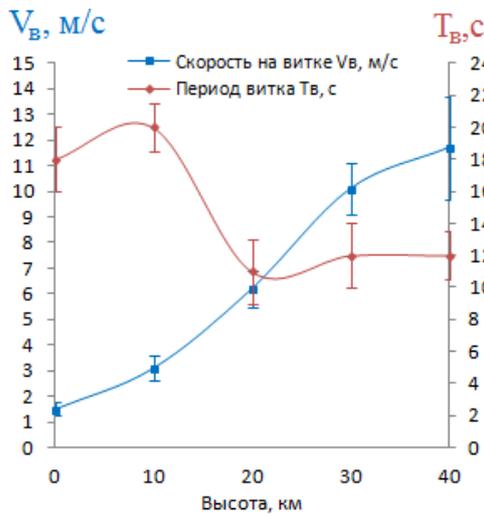


Рис. 6. Зависимость скорости на витке и периода витка от высоты

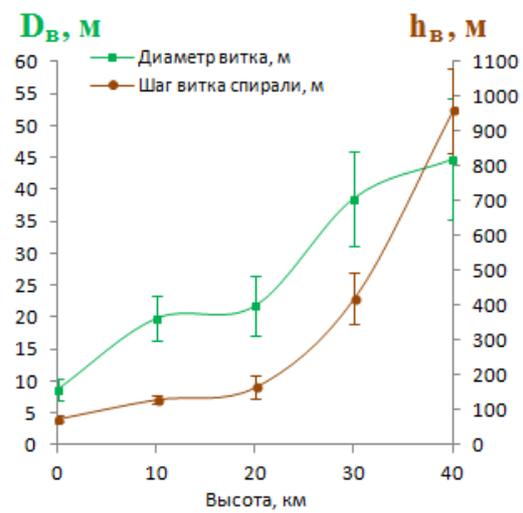


Рис. 7. Зависимость диаметра витка и шага витка от высоты

Спираль по которой движется ПС схематично показана на рис. 8 слева. Обозначена ось спирали, которая при отсутствии ветра представляет собой вертикальную прямую. Также обозначены диаметр  $D_B$  и шаг витка  $h_B$  спирали. На рисунке справа схематично показана ПС, движущаяся вокруг оси спирали с угловой скоростью  $\vec{\omega}$ . Продольная ось ПС при этом с осью спирали образуют угол  $\gamma$ . Синими векторами  $\vec{V}_{gp}$  и  $\vec{V}_k$  обозначены скорости груза и купола парашюта соответственно. Скорости  $\vec{V}_{gp}$  и  $\vec{V}_k$  рассматриваются в СО, связанной с осью спирали. Горизонтальная составляющая скорости купола  $\vec{V}_{вк}$  меньше, чем горизонтальная составляющая скорости груза  $\vec{V}_g$ , т.к. купол парашюта расположен ближе к оси спирали, чем груз. Вертикальные составляющие скоростей купола парашюта и груза равны ( $\vec{V}_{сн}$ ). Угол  $\alpha$  между вектором набегающей скорости на купол парашюта  $\vec{V}_k$  и продольной осью ПС является балансировочным углом атаки.  $\beta$  – угол между вектором набегающей скорости на купол парашюта  $\vec{V}_k$  и вертикалью.

Зависимость углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  от числа Рейнольдса  $Re$  показана на рис. 9. Угол  $\gamma$  определяется из соотношения центростремительного ускорения при движении по спирали и ускорения свободного падения

$$\frac{2V_B^2}{D_B g} = tg\gamma. \quad (1)$$

Угол  $\beta$  определяется соотношением горизонтальной и вертикальной компонент скорости купола

$$\frac{V_{вк}}{V_{сн}} = \frac{V_B}{V_{сн}} \left( 1 - 2 \frac{l_{ср} + l_{зв}}{D_B} \sin\gamma \right) = tg\beta. \quad (2)$$

Угол  $\alpha$  определяется из задачи в стереометрической постановке

$$\cos\beta \cos\gamma = \cos\alpha. \quad (3)$$

На графиках для каждой точки показаны планки погрешностей. Погрешности косвенных измерений углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  получены из погрешностей  $V_B$ ,  $D_B$  (рис. 6,7) и  $V_{сн}$  по правилам [5], учитывающим тригонометрические функциональные зависимости (1)-(3).

При полёте ПС с высоты 40 км до поверхности Земли число  $Re$  увеличивается на порядок, с  $10^5$  до  $1,5 \cdot 10^6$ . Угол атаки  $\alpha$  при этом монотонно уменьшается. В диапазоне  $Re = 10^5 \div 1 \cdot 10^6$  угол атаки уменьшается с  $33^\circ$  до  $25^\circ$ . В относительно нешироком диапазоне  $Re = 1 \cdot 10^6 \div 1,5 \cdot 10^6$  (рис. 9) наблюдается резкое падение угла атаки  $\alpha$  с  $25^\circ$  до  $18^\circ$ . Углы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  связаны соотношением (3).

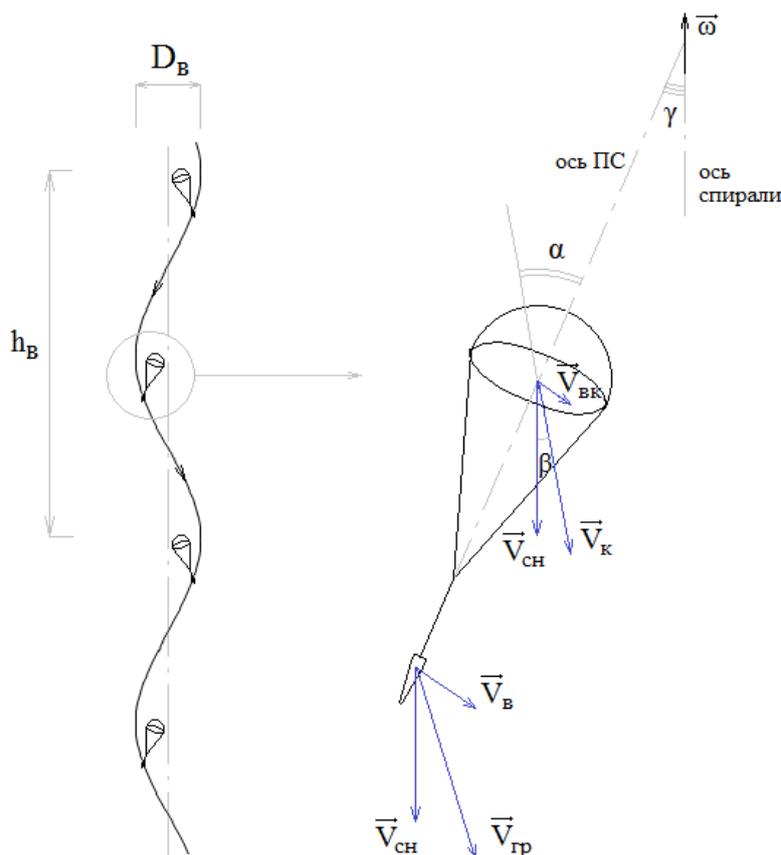


Рис. 8. Схема, поясняющая введение углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

Зависимость балансировочного угла атаки от  $Re$  в приведенном диапазоне можно объяснить изменением структуры течения при изменении соотношения между силами вязкости и инерции в потоке. Особенно заметные изменения происходят в диапазоне  $Re = 1 \cdot 10^6 \div 1,5 \cdot 10^6$ .

Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления парашюта на балансировочном угле атаки  $c_p$  от числа Рейнольдса  $Re$  показана на рис. 10. Относительная погрешность определения  $c_p$  достигает 25%. В исследуемом диапазоне  $Re = 1 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^6$  значения  $c_p$  лежат в пределах  $0,5 \div 0,6$ .

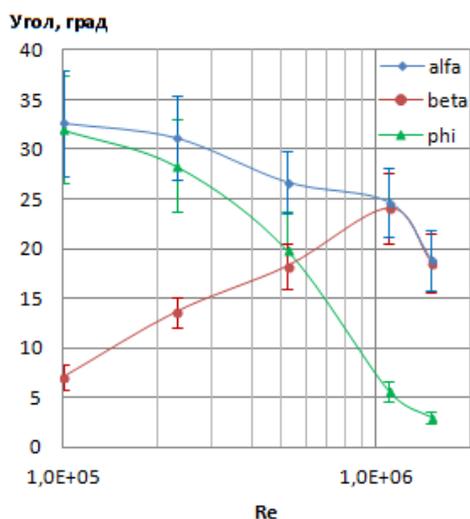


Рис. 9. Зависимость углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  от числа Рейнольдса  $Re$

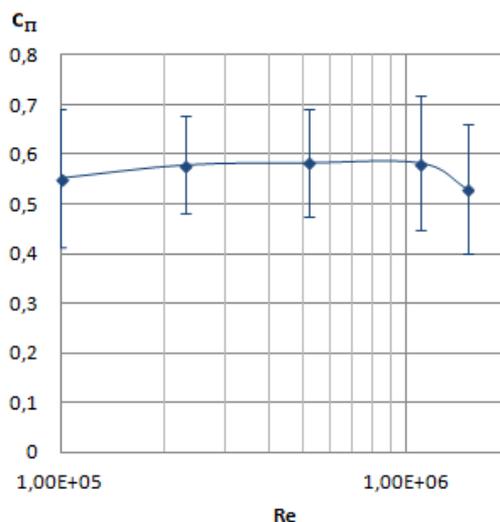


Рис. 10. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления парашюта на балансировочном угле атаки от числа Рейнольдса  $Re$

## Выводы

1. Проведён анализ данных лётного эксперимента при запуске метеоракеты MMP-06. В качестве экспериментальных данных взяты данные бортовой системы навигации GPS и видеозапись работы купола парашюта.

2. Анализ данных показал, что траектория движения ПС представляет собой спираль, «растянутую» ветром в горизонтальном направлении и возмущённую случайными факторами нестационарного обтекания парашюта.

3. По экспериментальным данным в диапазоне высот от 0 км до 40 км получены зависимости основных параметров движения ПС: диаметр и шаг витка спирали, вектора скоростей купола парашюта и груза, углы, характеризующие положение оси ПС относительно оси спирали и вектора скорости набегающего потока.

4. Получены зависимости балансировочного угла атаки и коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса в диапазоне  $Re = 1 \cdot 10^5 \div 1,5 \cdot 10^6$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов П.И. Лётные испытания парашютных систем. – Феодосия: Гранд-С, 2001.
2. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры.
3. Колесников Г.А. Парашюты: лекции по теории и конструкции парашютов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1959.
4. Виртуальный планетарий. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stellarium.org/>.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / пер. с англ. – М.: Мир, 1989.
6. Лабораторные занятия по физике: учеб. пособие / Гольдин Л.Л., Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др. / под ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.
7. ГОСТ 21452-88. Системы парашютные. Термины и определения.

## PROCESSING AND ANALYSIS OF FLIGH EXPERIMENT DATA FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF THE MOTION OF A ROUND PARACHUTE ON A SPIRAL TRAJECTORY AT HIGH ALTITUDES

Zhurin S.V., Leonov S.V., Mekhonoshin Yu.G.

The article is addressed to the analysis of the trajectory parameters and videos obtained during the flight experiment at the launch of meteo-rocket MMP-06 with the purpose to determine major parameters of motion of a round parachute at subsonic speeds in the range of altitudes from 0 to 40 km. The data analysis showed that the trajectory of the parachute represents spiral "stretched" by the wind in the horizontal direction and disturbed by random factors of a non-stationary flow around the parachute. The main parameters of the trajectory are obtained according to the experimental data. Only qualitative analysis of spiral motion paths for round parachutes may be found in the publications on parachute subjects. This article presents the quantitative characteristics of this process.

**Keywords:** parachute, atmospheric sounding, the wind profile in height, the spiral movement, the aerodynamic characteristics of a parachute.

## Сведения об авторах

**Журин Сергей Викторович**, 1981 г.р., окончил МФТИ (2004), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела аэрогазодинамики и теплообмена Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва, автор 26 научных работ, область научных интересов – проектирование космических возвращаемых аппаратов, конвективный теплообмен при движении в атмосфере с гиперзвуковыми скоростями, парашюты, мягкая парашютная посадка.

**Леонов Сергей Вячеславович**, 1978 г.р., окончил МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского (2001), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «НИИ парашютостроения», автор 11 научных работ, область научных интересов – парашютные системы, математическое моделирование.

**Мехоношин Юрий Геннадьевич**, 1951 г.р., окончил МАИ (1973), ведущий конструктор высотных парашютных систем для метеорокетов и других новых направлений их применения ОАО «НИИ парашютостроения», автор 10 научных работ, область научных интересов – парашютные системы, математическое моделирование.