

Вертикальная скорость снижения экраноплана с шасси на воздушной подушке

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрен процесс вертикального движения центра масс (ЦМ) экраноплана (ЭП) с шасси на воздушной подушке (ШВП) при снижении после подскока или преодоления препятствия с использованием динамической подушки. Предложены математическая модель процесса, а также формулы для определения времени, высоты и скорости в момент, когда главный вектор сил, действующих на ЭП, становится равным нулю, что приводит к постоянству вертикальной скорости. Проведен расчет параметров вертикального снижения проектируемого легкого ЭП для заданной высоты преодолеваемого препятствия и различных полетных масс.

Ключевые слова: экраноплан, воздушная подушка, вертикальная скорость, зависимость скорости снижения от времени, высота снижения, равенство веса и подъемной силы.

Введение

Разработкой и исследованиями летательных аппаратов (ЛА) с ШВП занимаются ведущие фирмы ряда стран мира (в России – ЦАГИ, СибНИА; в США – «Белл», «Боинг», «Локхид», НАСА; в Германии – «Дорнье»), в том числе и Украины (ОКБ им. О. К. Антонова и СКБ Харьковского авиационного института). Конструкторов эта тематика привлекает тем, что позволяет создать ЛА, способный производить взлет и посадку на площадке с любой прочностью поверхности (болото, вода, лед, битый лед на воде), а это позволяет осуществить транспортные задачи даже в тех условиях, когда применение других ЛА невозможно. Разновидностью этих аппаратов являются экранопланы с шасси на воздушной подушке.

Решения, принимаемые при разработке ШВП, зависят в основном от динамики движения ЛА на этапах взлета и посадки. В работе [1] приведен ряд специфических проблем, возникающих при создании ЛА с ШВП. Одной из них, имеющей прямое отношение к разработке ШВП, является обеспечение амортизационных свойств, «при которых динамическая нагруженность ЛА и обжатие гибкого ограждения ВП не превышают допустимых уровней ...».

Вопросы определения силы посадочного удара рассмотрены в работе [2], где описан процесс обжатия гибкого ограждения от момента касания с посадочной поверхностью до полного торможения ЛА в вертикальном направлении. Приведенные формулы позволяют вычислить вертикальные перемещения и скорости колебания, изменения давления ВП и усилия на ШВП. Для работы с ними не обходимо либо задаться вертикальной скоростью снижения ЛА в момент касания (что является субъективной оценкой и возможно при богатом опыте работы с подобными ЛА), либо определить ее исходя из закономерностей процесса снижения. Последний момент в указанной работе не рассмотрен.

Известны формулы [3, 4] для снижения парашютных систем, однако они учитывают множество параметров, не свойственных снижению ЭП.

Постановка задачи

Учитывая приведенные выше факты, для определения объективной величины посадочной скорости ЭП необходимо рассмотреть процесс его снижения до касания с посадочной поверхностью, формализовать его и осуществить проверку на конкретном примере.

Процесс снижения

ЭП, истратив горизонтальную скорость движения на набор высоты при преодолении препятствия, проваливается затем вниз почти вертикально. В момент зависания в конце преодоления препятствия горизонтальная и вертикальная скорости равны нулю. В процессе парашютирования на ЭП действуют две внешние силы: гравитация G , под действием которой начинается снижение, и аэродинамическая сила, направленная вверх (подъемная сила Y), растущая по мере увеличения вертикальной скорости снижения $V_y(t)$. Во время снижения ЭП может наступить равновесие сил Y и G . Вследствие этого изменится характер движения: оно станет равномерным. Это возможно в том случае, если время достижения постоянной скорости меньше времени достижения поверхности Земли. До того движение все время будет неравномерным.

Формализация процесса

Главный вектор внешних сил выглядит следующим образом:

$$\Phi = Y - G, \quad (1)$$

где Φ – главный вектор внешних сил;

Y – аэродинамическая сила;

G – вес ЭП.

Каждая из сил характеризуется своими параметрами:

$$Y = (c_y \times S_{ЭП} \times \rho / 2) \times V_y(t)^2,$$

$$G = M \times g,$$

$$\Phi = M \times a,$$

где c_y – безразмерный коэффициент;

$S_{ЭП}$ – площадь горизонтальной проекции ЭП;

ρ – плотность воздуха;

$V_y(t)$ – скорость вертикального движения;

M – масса ЭП;

g – ускорение свободного падения;

a – ускорение вертикального движения, вызванного силой Φ .

Разделив (1) на M и обозначив $b = (c_y \times S_{ЭП} \times \rho) / (2 \times M)$, получим простое уравнение движения снижения

$$b \times V_y(t)^2 - g - a(t) = 0. \quad (2)$$

В данном уравнении неизвестными величинами являются: $V_y(t)$, $a(t)$ и t , искомой величиной – $V_y(t)$ в момент касания поверхности Земли. В связи с непостоянным характером ускорения $a(t)$ задачу будем решать численным методом. Для этого разобьем начальную высоту H_0 на столь малые отрезки, что в пределах каждого из них движение можно считать равноускоренным:

$$\delta = \frac{H_0}{n}, \quad (3)$$

где δ – величина отрезка;

n – общее количество отрезков.

Пройденный путь

$$S_i = \delta \times i, \quad (4)$$

где i – количество пройденных отрезков, $0 \leq i \leq n$.

Положим, что ЭП проходит i – й отрезок с ускорением a_{i-1} и только в конце i -го отрезка ускорение скачком становится равным a_i . Тогда ускорение можно выразить согласно (2) в виде

$$a_i = b \times V_{y_i}^2 - g,$$

а время, затраченное на прохождение отрезка δ :

$$t_i = \frac{V_{y_i} - V_{y_{i-1}}}{a_{i-1}}. \quad (5)$$

То же самое время можно представить в следующем виде:

$$t_i = \frac{2 \times \delta}{V_{y_i} + V_{y_{i-1}}}. \quad (6)$$

Приравняв правые части выражений (5) и (6) и проведя необходимые преобразования, получим

$$Vy_i = \sqrt{Vy_{i-1}^2 + 2 \times \delta \times a_{i-1}}. \quad (7)$$

При подлете к поверхности земли начинает расти коэффициент c_y , что скажется на падении величины ускорения a_i . Отразим в выражении (5) этот рост, введя вместо величины b величину $k_j \times b$, и получим

$$a_i = g - k_j \times b \times Vy_i^2, \quad (8)$$

где k_j – коэффициент, учитывающий влияние близости земли;

j – порядковый индекс элемента вектора k , который представляет собой набор коэффициентов k_j , зависящих от расстояния до посадочной поверхности и отражающих степень влияния ее на увеличение подъемной силы.

Теперь можно составить программу определения скорости снижения в момент касания земли.

Пример расчета

Выбираем из [5] величины $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8066 \text{ м/с}^2$; из [6] - величину $c_y = 1,18$. В ТТТ на проектирование ЭП берем величину $H_0 = 5 \text{ м}$. Из проектировочного расчета ЭП задаемся величинами $b_{САХ} = 3 \text{ м}$, $M = 550 \text{ кг}$ и $S_{ЭП} = 19,41 \text{ м}^2$; $n = 200$; $i = 0 \dots n$; $a_0 = g$; $s_0 = 0$; $t_0 = 0$; $Vy_0 = 0$.

Вводим в программу начальную информацию: указанные величины выше и массив коэффициентов, учитывающих влияние близости земли.

По формуле (3) определяем величину отрезка δ .

По формуле (7) вычисляем скорость Vy_i для первого и последующих отрезков.

По формуле (8) находим ускорение a_i в конце первого и последующих отрезков.

По формуле (4) определяем пройденный путь S_i .

При достижении равенства $i = n$ расчет завершается и строятся графики параметров снижения Vy_i , a_i , t_i , T_i в функции S_i (рис. 1). Все они выглядят вполне ожидаемо, особенно график t . Нахождение начального отрезка

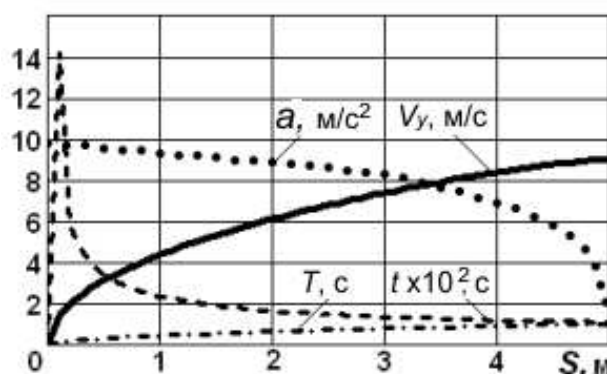


Рис. 1. Характерные зависимости параметров снижения

требуется гораздо больше времени из-за инерции ЭП, чем на остальные. При достижении постоянной скорости график пошел бы параллельно абсциссе.

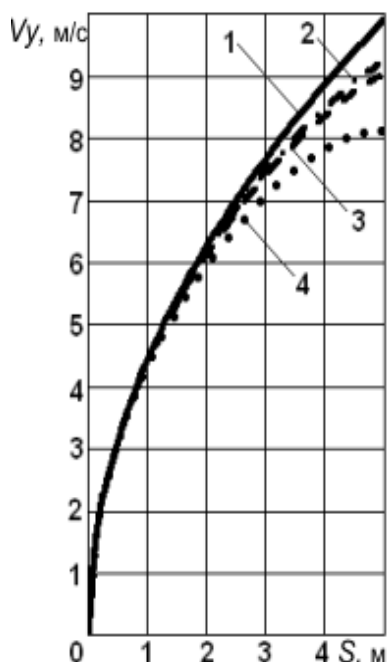


Рис. 2. Скорости снижения: 1 – свободное падение ЭП; 2 – $M = 750$ кг; 3 – $M = 550$ кг; 4 – $M = 250$ кг

Математическая модель учитывает влияние эффекта близости земли на определяемые параметры.

В целях сравнения скорости снижения для масс ЭП величиной 750, 550, 250 кг были построены соответствующие графики. В качестве координаты отклонения использовали график падения в безвоздушном пространстве. Как видно (рисунок 2), скорость снижения растет до самой земли, но с уменьшением массы при той же площади проекции все больше сказывается торможение воздуха и ЭП сильнее отклоняется от скорости свободного падения.

Условием установившейся скорости падения является равенство нулю ускорения a_i , т. е.,

согласно (2) $V_{y_{const}} = \sqrt{\frac{g}{b}}$. Для приведенного

примера она равна $V_{y_{const}} = 19,611 \text{ м/с}^2$. Таким образом, снижаясь с высоты 5 м, ЭП не успевает набрать такую скорость.

Выводы

Полученная математическая модель процесса снижения ЭП позволяет определить скорость встречи гибкого ограждения ШВП с посадочной поверхностью.

Список литературы

1. Захарченко, Ю. А. Выбор проектных параметров шасси на воздушной подушке для самолетов безаэродромного базирования [Текст] / Ю. А. Захарченко, В. Ф. Брагазин, Ю. Ю. Мерзликин // Общероссийский научно-технический журнал «ПОЛЕТ». Машиностроение, 2008. - № 2, – С. 13 – 20.
2. Люшнин, В. П. Оборудование и транспорт на воздушной подушке с баллонным ограждением / В. П. Люшнин, В. Е. Гайдачук, Л. А. Мальков. – Х.: ФЛП Лысенко И. Б., 2012. – 231 с.
3. Динамика движения парашютных систем [Текст] / А. И. Антоненко, О. В. Рысев, Ф. Ф. Фатыхов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 152 с.
4. Шевляков, Ю. А. Динамика парашютных систем [Текст] / Ю. А. Шевляков, В. Н. Тищенко, В. А. Темненко. – К.; О.: Вища школа, Головное изд-во, 1985. – 160 с.
5. ГОСТ 4401 – 81. АТМОСФЕРА СТАНДАРТНАЯ. Параметры [Текст]. – Взамен ГОСТ 4401 – 73; введ. 1982 – 07 – 01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 179 с.

6. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Коэффициенты местных сопротивлений и сопротивления трения [Текст] / И. Е. Идельчик. – М. - Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 463 с.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Тюрев В. В., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 31.10.2014

Вертикальна швидкість зниження екраноплана з шасі на повітряній подушці

Розглянуто процес вертикального руху центру мас (ЦМ) екраноплану (ЕП) з шасі на повітряній подушці (ШВП) при зниженні після підскоку або подолання перешкоди з використанням динамічної подушки. Запропоновано математичну модель процесу, а також формули для визначення часу, висоти і швидкості в момент, коли головний вектор сил, що діють на ЕП, дорівнює нулю, що приводить до постійності вертикальної швидкості. Виконано розрахунок параметрів вертикального зниження проектного легкого ЕП для заданої висоти подоланої перешкоди і різних польотних мас.

Ключові слова: екраноплан, повітряна подушка, вертикальна швидкість, залежність швидкості зниження від часу, висота зниження, рівність ваги і піднімальної сили.

Rate of climb of decline of air-craft-in-ground-effect with an undercarriage on an air pillow

The process of vertical motion of centre-of-mass (ЦМ) of air-craft-in-ground-effect (ЭП) is considered with an undercarriage on an air pillow (ШВП) at a decline after jumping or overcoming of obstacle with the use of dynamic pillow. Offer mathematical model of process, and also formulas for determination of time, height and speed in moment when the main vector of forces operating on ЭП becomes equal to the zero, that results in constancy of rate of climb. The calculation of parameters of vertical decline of the designed lung of ЭП is conducted for the decision height of the overcame obstacle and the different flight masses.

Keywords: air-craft-in-ground-effect, air pillow, rate of climb, dependence of speed of decline on time, height of decline, equality of weight and carrying capacity.