

УДК 533.6.013.42:518.12

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОУПРУГИХ СИСТЕМ СПАСЕНИЯ ПРИ ПОСАДКЕ СПУСКАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Исследуется посадка спускаемых объектов, снабженных пневмоупругими системами спасения. Строится обобщенная математическая модель посадки рассматриваемого объекта и проводятся параметрические исследования посадочных характеристик. Дается оценка устойчивости динамических процессов, происходящих при посадке спускаемого объекта с пневмоупругой системой спасения. *Пневмоупругая система; посадка; спускаемый объект; упругая характеристика; экран; пневмоамортизатор*

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрение работы пневмоупругих систем спасения (ПУС) показало, что посадка спускаемого объекта (СО) с такой системой спасения является сложным физическим процессом (рис. 1). Математическая модель посадки объекта с ПУС должна в полной мере описывать все явления, происходящие при больших деформациях упругих элементов конструкции как с рабочим телом (газовоздушной смесью), так и с движущимся объектом.

Экспериментальные сбросы твердых тел, снабженных рассматриваемой системой спасения в виде незамкнутой пневмокаркасной мягкой оболочки, на копровом стенде показали, что при динамическом взаимодействии с экраном в таких оболочках наблюдается эффект авторегулирования давления в подкупольной полости, который реализуется следующим образом. На прямом ходе обжатия происходит интенсивный рост давления в полостях каркасированной оболочки. При этом в подкупольной полости мягкой оболочки при замыкании ее площадкой приземления давление растет только до критической величины $P_n = P_{кр}$. При достижении давлением критической величины пневмокаркас теряет устойчивость формы, нижняя кромка его поднимается, перепуская сжатое в подкупольной полости рабочее тело в атмосферу. При снижении давления в подкупольной полости ниже критической величины нижняя кромка каркасированной оболочки опускается, закрывая зазор, что вызывает опять рост давления и т. д. Заметим, что описанный автоколебательный процесс происходит непрерывно на протяже-

нии всего прямого, а частично и обратного хода обжатия ПУС. Благодаря такой схеме работы ПУС и удается обеспечить постоянство давления в подкупольной полости конусообразной пневмоупругой системы спасения.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСАДКИ СПУСКАЕМОГО ОБЪЕКТА

Модельные испытания пневмоупругих систем спасения показали, что деформация конусообразного ПУС при обжатии происходит в основном за счет деформирования и поворота верхней части ПУС, близкой к месту закрепления на корпусе СО, которая имеет сравнительно небольшую массу и момент инерции (рис. 2, а).

Представим ПУС в виде конструкции, состоящей из жесткой конусообразной части и пружинного элемента. Предположим, что упругая характеристика пружинного элемента $F_y(H_a, P_n)$ связана со статической характеристикой реального амортизатора $F = F(H_a, P_n)$ выражением $F_y = F + (P_n - P)(S_n - S)$, где $F(H_a, P_n)$ — внешняя сила, действующая на жесткую часть ПУС.

Уравнения движения СО с ПУС имеют вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{y} &= -Mg + (P_n - P_a)S_n + F(P, P_n); \\ m\ddot{h} &= -mg - F_y + \\ &\quad + (P_n - P_a)(S_n - S) + F_k; \quad (1) \\ \dot{P}_n &= -\chi \frac{P_n(Q + \dot{W}_n)}{W_n}, \end{aligned}$$

где M и m — масса СО и пневмоупругой системы; S — площадь днища СО; S_n — пло-

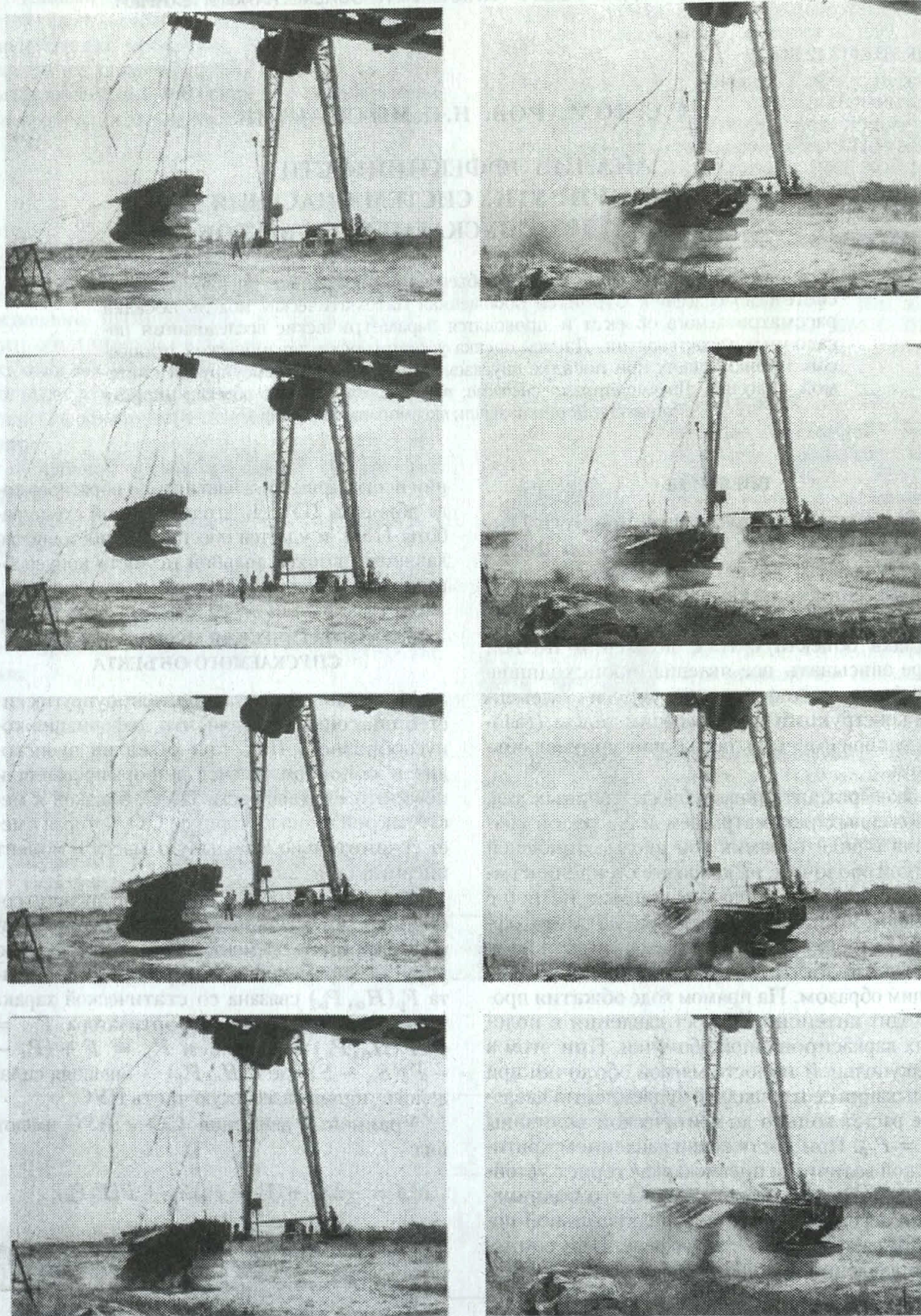


Рис. 1. Кинограмма посадки спускаемого объекта с пневмоупругой системой спасения

шадь, ограниченная нижней кромкой конусообразной части ПУС; y — расстояние от дна СО до площадки приземления; h — зазор между нижней кромкой ПУС и экраном; $H_a = y - h$ — высота пневмоупругой системы спасения; $W_n = Sy + (S_n - S)h + W_0$ — объем подкупольной полости конусообразной ПУС; $Q = \mu h \Pi \left(\frac{2\chi}{\chi-1} \left| \frac{P_n}{\rho_n} - \frac{P_a}{\rho_a} \right| \right)^{1/2}$ — объемный расход газа из подкупольной полости ПУС; χ — показатель политропы; μ — коэффициент истечения газа из щелевого сопла; Π — периметр нижней кромки ПУС; ρ_n, ρ_a — плотности воздуха, соответственно в подкупольной полости и в окружающей среде; $\rho_n = \rho_a (P_n/P_a)^{1/\chi}$; F_k — сила контактного взаимодействия ПУС с посадочной поверхностью (при решении задачи принимается абсолютно неупругое взаимодействие, т. е. скорость ПУС \dot{h} мгновенно гасится при контакте).

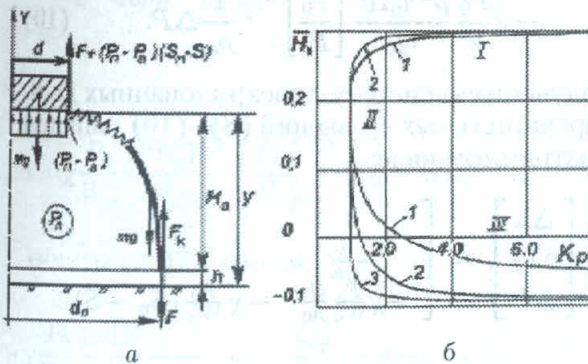


Рис. 2. К построению математической модели посадки объекта с пневмоупругой системой спасения: а — система координат и схема сил, действующих на спускаемый объект; б — упругие характеристики рассматриваемых ПУС (кривые 1, 2, 3)

Численное исследование нелинейной системы (1) проведем с помощью метода Рунге-Кутты. Примем следующие начальные условия: $y(0) = H_{a0}$; $\dot{y}(0) = -V_{y0}$; $h(0) = 0$; $\dot{h}(0) = 0$; $P_n(0) = P_a$. В качестве упругих характеристик ПУС $F(H_a, P_n)$ использованы аппроксимированные зависимости, полученные в [1] путем идентификации результатов экспериментальных исследований натуральных образцов, которые приведены на рис. 2, б. Видно, что форма упругой характеристики определяется конструктивной схемой ПУС. Варианты 1–3 получены для пневмоконструкций с разными углами раскрытия конуса $\bar{d} = d_n/d$, где d_n — диаметр нижней кромки конусообразной части ПУС; d — диаметр основания спускаемого объекта.

$$K_p = \frac{E}{P_n - P_a} = C_1 + \frac{C_2}{\bar{H}_a - \bar{H}_{a0}} + \frac{C_3}{\bar{H}_a - \bar{H}_1} \quad (2)$$

$$\text{Отсюда найдем } K_{p \min} \text{ при } \bar{H}_a = \bar{H}_{кр} = \frac{C_2 \bar{H}_1 + C_3 \bar{H}_{a0} - \sqrt{-C_2 C_3 (\bar{H}_{a0} - \bar{H}_1)}}{C_2 + C_3}$$

Известно, что идеальным является амортизатор, который обеспечивает постоянную перегрузку, равную $Ny_{пр}$ на всем ходе обжата. Минимальная высота амортизатора при этом равна

$$H_{\min} = \frac{V_{y0}^2}{2g Ny_{пр}} \quad (3)$$

Полагая $Ny_{пр} = (P_{ид} - P_a)S_n/Mg - 1$, найдем $P_{ид}$ и коэффициент упругости, соответствующие идеальному амортизатору:

$$P_{ид} = \frac{V_{y0}^2}{2S_n H_{a0}} + \frac{Mg}{S_n} + P_a, \quad (4)$$

$$E_{ид} = K_{p \min} (P_{ид} - P_a).$$

Коэффициент упругости реального амортизатора, равный $E = DE_{ид}$ ($D > 1$), подбирается с помощью коэффициента пропорциональности D таким, чтобы рабочий ход пневмоупругой системы спасения составлял 90–95% его начальной высоты. На рис. 3 показано, что коэффициент пропорциональности, отвечающий указанным условиям, равен $D = 3$. При меньших D существует опасность жесткого удара (при $D = 2$ и $y = 0$ скорость $V_{y0} > 0$), а при больших D не используется значительная часть высоты ПУС (при $D = 4$ и $V_{y0} = 0$, высота $y > 0,2H_{a0}^*$).

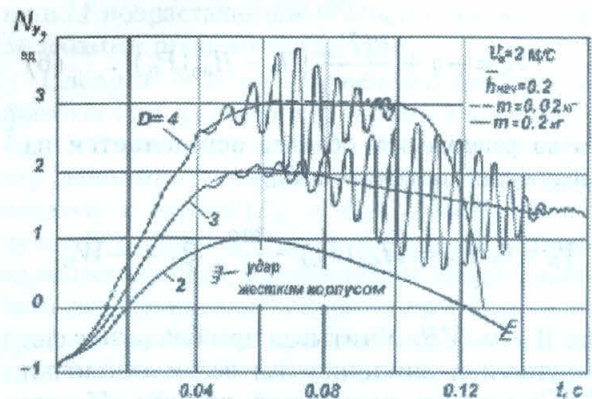


Рис. 3. Переходные характеристики посадки спускаемого объекта

2. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ПОСАДКЕ СПУСКАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Исследуем систему (1) на асимптотическую устойчивость. Предположим, что $M \gg m$, $H \gg h$ (обычно это выполняется). В этом случае можно независимо рассмотреть движение объекта относительно опорной поверхности и колебание пневмоупругой системы спасения относительно некоторого условного положения равновесия $h = h_0$. При этом скорость движения объекта и равновесное положение h_0 меняются со временем, однако при $M \gg m$ это изменение практически не сказывается на движении системы за время, равное периоду колебаний ПУС. Полагая скорость объекта $V_y = \text{const}$, отбросим первое уравнение системы (1), а для оставшихся уравнений найдем точку условного равновесия пневмоупругой системы спасения

$$\begin{aligned} \dot{h} &= V_h = 0, \\ \dot{V}_h &= -g + F(H_a, P_n)/m, \\ \dot{P}_n &= -\chi \frac{P_n}{W_n} (Q + \dot{W}_n), \end{aligned} \quad (5)$$

где V_h — скорость изменения воздушного зазора.

Положим, что упругая сила, действующая на объект со стороны пневмоупругой системы спасения, может быть представлена в виде

$$F = -k(P_n) [H_a - H_{a0}(P_n)],$$

где $H_{a0}(P_n)$ — равновесная высота ПУС, которая определяется из решения стационарной задачи формообразования (рис. 2, б).

Подставим значение F во второе уравнение системы (5)

$$\dot{V}_h = -g + \frac{k(P_n)}{m} [H_a - H_{a0}(P_n)]. \quad (6)$$

Точка равновесия объекта определяется из следующих соотношений:

$$V_h = 0, \quad H_a = H_{a0}(P_n) - \frac{mg}{k}, \quad Q_0 = -\dot{W}_n,$$

где $\dot{W}_n = VS$. Учитывая преобладание сил упругости и давления над весом оболочки ПУС, в точке равновесия примем $H_a = H_{a0}(P_n)$. Отсюда выражаем P_n через обратную к $H_{a0}(P_n)$ функцию $P_n = H_{a0}^{-1} = P_0$, где

$\rho_n = \rho_0(H_a)$. Воздушный зазор при равновесном положении объекта равен

$$h_0 = \frac{Q_0}{\mu \Pi \sqrt{\frac{2\chi}{\chi-1} \left| \frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P_a}{\rho_a} \right|}} \approx \frac{-V_{y_0} S}{\mu \Pi \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_0 - P_a|}}. \quad (7)$$

Линеаризовав систему уравнений (1) при следующих предположениях: $H_a = y - h = y - h_0 - \Delta h = H_{a0} - \Delta h$, $H_{a0} \approx H_{a0}(P_0) + \frac{dH_{a0}}{dP_n} \Delta P$ — и учитывая, что $Q = Q_0 + \Delta Q$, $\dot{W}_n = SV + (S_n - S)V_h$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta h &= \Delta V_h; \\ \frac{d}{dt} \Delta V_n &= -\frac{k}{m} \Delta h + Q_0 \Delta V_h - \frac{k}{m} \frac{dH_{a0}}{dP_n} \Delta P; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta P &= -\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{Q_0}{h_0} \Delta h - \chi \frac{P_0}{W_n} (S_n - S) \Delta V_h - \\ &\quad - \chi \frac{P_0}{V} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} \frac{1}{\rho_a} \Delta P. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученную систему линеаризованных дифференциальных уравнений (8)–(10) запишем в матричном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta V_h \\ \Delta P \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & 0 & 0 \\ -\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{Q_0}{h_0} & -\chi \frac{P_0}{W_n} (S_n - S) & -\chi \frac{P_0}{V} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0 \rho_0} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta V_h \\ \Delta P \end{bmatrix} \rightarrow \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k}{m} \frac{dH_{a0}}{dP_n} \\ -\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0 \rho_0} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta V_h \\ \Delta P \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

Характеристическое уравнение системы

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 1, \\ a_1 &= \chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0 \rho_a} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi}, \\ a_2 &= \frac{k}{m} - \chi \frac{P_0}{W_n} (S_n - S) \frac{k}{m} \frac{dH_{a0}}{dP_n}, \\ a_3 &= -\frac{k}{m} \frac{dH_{a0}}{dP_n} \chi \frac{P_0}{W_n} \frac{Q_0}{h_0} + \frac{k}{m} a_1. \end{aligned}$$

Система (1) асимптотически устойчива при выполнении следующих условий (критерий Рауса–Гурвица):

$$1^\circ \quad a_0 = 1 > 0;$$

$$2^\circ a_1 > 0;$$

$$3^\circ \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$

$$4^\circ \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix} = a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3) > 0.$$

Из условий 4° и 3° следует $a_3 > 0$, т. е.

$$\frac{k}{m} \left[-\frac{dH_{a0}}{dP_n} \chi \frac{P_0}{W_n} \frac{Q_0}{h_0} + \chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0 \rho_a} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} \right] > 0.$$

Следует отметить, что в областях I, II упругой характеристики (рис. 2, б) $dH_{a0}/dP_n < 0$, $k > 0$, а в области III $dH_{a0}/dP_n > 0$, $k < 0$, поэтому всегда $k(dH_{a0}/dP_n) < 0$. Тогда условие 3° преобразуется к виду

$$\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 h_0^2 \Pi^2}{Q_0 \rho_a} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} (S_n - S) - \frac{Q_0}{h_0} > 0 \quad (13)$$

или

$$\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 h_0^3 \Pi^2}{Q_0^2 \rho_a} \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} (S_n - S) > 1.$$

Учитывая (7), имеем

$$\chi \frac{P_0}{W_n} \frac{\mu^2 \Pi^2}{\rho_a Q_0^2} \frac{Q_0^3}{\mu^3 \Pi^3} \left[\sqrt{\frac{2\chi}{\chi-1} \left| \frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P_a}{\rho_a} \right|} \right]^3 \times \left[\frac{P_0}{P_a} \right]^{1/\chi} (S_n - S) > 1.$$

$$Q_0 > \frac{W_n \rho_a}{P_0 \chi} \frac{\mu \Pi}{(S_n - S)} \left[\frac{2\chi}{\chi-1} \left| \frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P_a}{\rho_a} \right| \right]^{3/2} \times \left[\frac{P_a}{P_0} \right]^{1/\chi} = Q_k. \quad (14)$$

Условие (14) аналогично условию устойчивости вертикальных колебаний аппарата на воздушной подушке [2].

Следует отметить, что в процессе торможения скорость вертикального движения спускаемого объекта уменьшается (что соответствует уменьшению Q_0) и, начиная с некоторого момента, условие (14) перестает выполняться, при этом колебания становятся неустойчивыми.

Преобразуем условие 4°

$$-k \frac{dH_{a0}}{dP_n} \chi \frac{P_0}{W_n} \frac{Q_0}{h_0} + k \frac{Q_0 Q_0}{Q_k h_0 (S_n - S)} > 0$$

или

$$k \left[-\frac{dH_{a0}}{dP_n} + \frac{Q_0}{Q_k} \frac{W_n}{(S_n - S) P_0 \chi} \right] > 0. \quad (15)$$

Условие (14) всегда выполняется на участках упругой характеристики I, II (рис. 2, б), а на участке III существует некоторая точка, где это условие перестает выполняться.

Выведенные критерии (14)–(15) позволяют оценить границу области устойчивости равновесия спускаемого объекта с пневмоупругой системой спасения при малых возмущениях из положения статического равновесия, когда правомочна линеаризация системы уравнений посадки (5).

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки посадочных характеристик спускаемых объектов с пневмоупругой системой спасения в реальных условиях проведем численные исследования посадки СО с пневмоупругой системой спасения.

Исследования проведены для следующих значений исходных параметров: $d_k = 0,42$ м, $d_o = 0,65$ м, $H_{a0} = 0,2$ м. Изменение массы ПУС m приводит к изменению частоты колебаний и величины декремента затухания (раскачки). При этом огибающая пиков колебаний при $\bar{h}_{нач} = 0$ меняется незначительно (рис. 4, б, в). На рис. 4, а–в представлены зависимости перегрузки $N_y = \ddot{y}/g$ и зазора $\bar{h} = h/H_{a0}$ (H_{a0} – высота ПУС при $P_n = P_a$) от времени при $m = 0,02$ кг в виде огибающих пиков высокочастотных колебаний. Масса объекта варьировалась в диапазоне $M = 5 \dots 32$ кг. Видно, что при большей массе объекта M возрастание или убывание амплитуды колебаний происходит быстрее.

Следует отметить, что более близким к физической реальности является случай с $\bar{h}_{нач} > 0$ (рис. 4, а), который соответствует росту давления в подкупольной полости при подходе к экрану ($P_n > P_a$) – эффект воздушной подушки. Однако для исследования асимптотической устойчивости более удобным для анализа является случай $\bar{h}_{нач} = 0$ (рис. 4, а, в), так как при этом колебания всегда имеют место в течение всего процесса торможения. Из рис. 4, в видно, что при $M = 5$ кг и $M = 10$ кг происходит затухание колебаний, возникших в начале процесса. Для

объекта массой $M = 15$ кг амплитуда колебаний сначала уменьшается, а затем возрастает. Это объясняется уменьшением вертикальной скорости посадки СО и расхода Q_0 , в связи с чем перестает выполняться критерий устойчивости (8). Кроме того, в конце процесса торможения перестает выполняться критерий устойчивости (9).

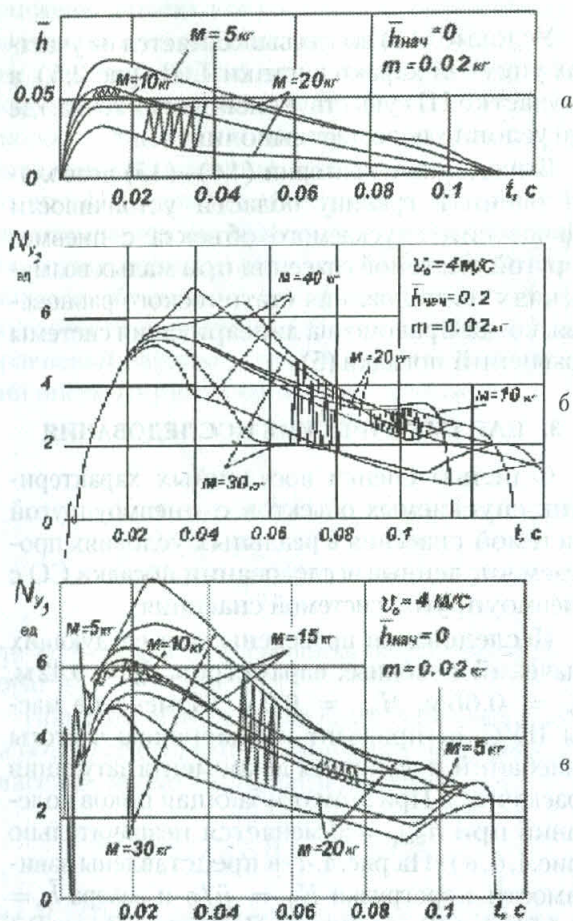


Рис. 4. Влияние массы спускаемого объекта на характер изменения воздушного зазора при $\bar{h}_{нач} = 0$ (а) и на уровень перегрузки при $\bar{h}_{нач} = 0,2$ (б) и при $\bar{h}_{нач} = 0$ (в)

Для объекта массой $M = 20$ кг происходит увеличение амплитуды колебаний с самого начала процесса, однако неограниченного возрастания амплитуды (что имело бы место в линейной системе дифференциальных уравнений) не происходит. На самом деле устанавливается некоторое значение амплитуды, которое зависит от средних значений скорости V_y , зазора h и других параметров и не зависит от начальных условий, масс объекта M и пневмоупругой системы спасения m , т.е. устанавливается режим автоколебаний с фиксированной амплитудой. Подобное явление наблюдалось при исследовании

вертикальных колебаний аппарата на воздушной подушке [2].

Средние значения воздушного зазора h после установления максимальных значений постепенно убывают до нуля (рис. 4, а). Таким образом, ПУС в процессе торможения работает как клапан, который перепускает воздух из подкупольной полости в атмосферу (перепуск воздуха происходит с переменным средним расходом $Q = |V| S$).

В конце процесса торможения происходит довольно резкое затухание колебаний, что объясняется вхождением нижней кромки ПУС в контакт с посадочной поверхностью ($\bar{h} = 0$, рис. 2, б), сопровождающимся диссипацией энергии. При последующем движении реализуется колебание объекта при замкнутом объеме подкупольной полости ПУС.

Следует отметить, что эффективность ПУС $\eta = H_{a, \min}^* / H_a = N_{y, \text{уд}} / N_{y, \text{ср. max}}$ в значительной степени зависит от вида зависимости $\bar{H}_a = (K_p)$ (рис. 2, б).

Приведенные на рис. 4 зависимости полученные для ПУС с характеристикой $\bar{H}_{a0}(K_p)$, которая соответствует варианту 1 на рис. 2, б. Эффективность пневмоупругой системы спасения с упругой характеристикой по варианту 1 составляет $\eta = 0,67$. На рис. 5 представлены зависимости $N_y(\tau)$, $\bar{h}(\tau)$ и $\bar{H}_a(K_p)$ для ПУС с упругой характеристикой, имеющей участок с большей крутизной (вариант 2, рис. 2, б).

Видно, что в этом случае величина перегрузки равна $N_{y, \text{ср. max}} \approx 5$, что соответствует эффективности ПУС $\eta = 0,8$. Увеличение начальной скорости посадки V_{y0} приводит к возникновению автоколебаний ($V_{y0} = 6$ м/с) и увеличению их амплитуды ($V_{y0} = 7$ м/с). Отметим, что в конце процесса торможения спускаемого объекта колебания становятся неустойчивыми.

Для оценки влияния пневмоупругости ПУС на параметры процесса посадки СО рассмотрим движение объекта с ПУС, высота которого H_a определяется только статической характеристикой $\bar{H}_a = f(K_p)$.

Результаты исследования представлены на рис. 5 (пунктирные линии). Видно, что в этом случае процесс торможения происходит до момента времени $\tau_{кр}$, в который перепад давления достигает критического значения $K_{p, \text{кр}} = \min K_p$ (рис. 2, б). Этому значению K_p соответствует точка перехода верхней устойчивой ветви (режим I) упругой характеристики $\bar{H}_{a0}(K_p)$ в нижнюю статически неустойчивую ветвь (режим III), где $dH_a/dK_p \leq 0$. При последующем движении ($\tau > \tau_{кр}$) происхо-

дит резкое уменьшение высоты ПУС — потеря устойчивости (режим II), которое сопровождается раскрытием подкупольной полости, потерей давления в ней и свободным падением объекта.

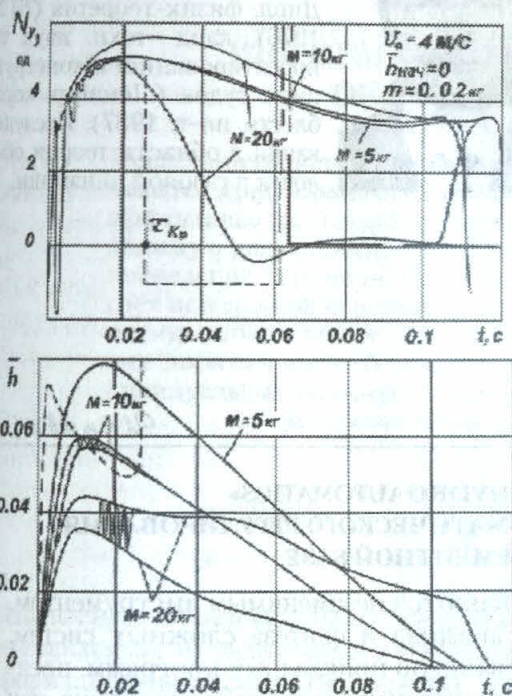


Рис. 5. Влияние пневмоупругости системы спасения на характер изменения уровня перегрузки (а) и на характер изменения воздушного зазора (б)

Характеристики обжатия ПУС приведены на рис. 5, б. Пунктиром обозначены статические, а сплошной линией — динамические характеристики. Таким образом, на прямом ходе обжатия ПУС реализуется бесконтактный колебательный режим работы амортизатора, причем степень обжатия ПУС зависит от величины начального давления в пневмокаркасе P_{P_0} , т. е. его вертикальной жесткости.

Остаточный объем, образуемый после обжатия ПУС на прямом ходе, оказывает значительное влияние на характер обратного хода ПУС. Дело в том, что оставшаяся после завершения прямого хода обжатия ПУС в подкупольной полости масса сжатого рабочего тела обладает определенной энергией, которая и формирует обратный ход (отскок) объекта. Эта энергия затрачивается на ускорение обратного хода объекта и на преодоление разряжения, которое развивается при этом в подкупольной полости. Обратный ход обжатия пневмоупругой системы спасения — наиболее неблагоприятный режим работы ПУС. Поэтому при эксплуатации СО с ПУС необходимо тщательно подбирать начальную вер-

тикальную жесткость пневмокаркаса с помощью P_{P_0} , чтобы свести к минимуму остаточный объем подкупольной полости пневмоупругой системы спасения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамическая модель процесса посадки СО с ПУС позволила выбрать направление совершенствования конструктивных схем пневмоупругих систем спасения спускаемых объектов. Оценка асимптотической устойчивости выявила существование двух критериев устойчивости. Согласно полученным критериям для данной ПУС, существуют предельные значения массы объекта M , скорости приземления V_{y_0} , при которых колебания с самого начала процесса торможения становятся неустойчивыми.

Показано, что если критерий устойчивости (14) не выполняется, то возникают автоколебания с ограниченной амплитудой. Условие устойчивости перестает выполняться в конце процесса торможения после перехода рабочей точки на нижнюю ветвь упругой характеристики, однако при этом амплитуда колебаний чаще всего не успевает существенно увеличиться.

Исследования показали, что:

- наиболее эффективным типом ПУС для СО является пневмоупругое устройство, содержащее пневмокаркасную незамкнутую мягкую оболочку, использующее экранный эффект (воздушную подушку);
- отличительной особенностью работы ПУС в ходе вертикального движения спускаемого объекта является наличие колебаний пневмоконтрукции на всем пути обжатия относительно некоторого переменного положения равновесия, задаваемого статической формой упругой характеристики $H_a(K_p)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю. Формообразование конусообразных тортовых пневмоамортизаторов // Современные конструкции с применением мягких и гибких материалов. Владивосток: ДВГМА, 1992. С. 8–16.
2. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Житников В. П. Устойчивость вертикальной качки твердого тела с упругим пневмоопорным основанием // Динамическое уравнивание, колебания и устойчивость движения. Уфа: УАИ, 1985. С. 109–114.

ОБ АВТОРАХ



Комаров Сергей Сергеевич, ст. науч. сотр., руководитель СКБ авиационных устройств УГАТУ. Дипл. инж.-механик по авиационным двигателям (УАИ, 1967), д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1999). Исследования в области пневмоупругости транспортных систем.



Мискакhtин Николай Иванович, ст. науч. сотр. СКБ авиационных устройств УГАТУ. Дипл. физик-теоретик (БГУ, 1976), канд. техн. наук по проектированию и конструкциям судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1987). Исследования в области теории оболочек и газовой динамики.

Иновации

**ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ «HYDROAUTOMATICS»
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
НА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ**

Методы автоматизированного проектирования являются незаменимым инструментом, позволяя существенно увеличить эффективность анализа и синтеза сложных систем. Успешно используются множество разнообразных пакетов прикладных программ, предназначенных для проектирования непрерывных и дискретных систем регулирования, как то: Диспас, СИАМ, Vissim, Control System, Simulink и др. В этих пакетах, в основном, используется так называемый кибернетический метод, сущность которого заключается в информационном подходе к изучению систем, в рассмотрении их как устройств переработки информации. В качестве неделимых элементов здесь принимаются математические примитивы (типовые звенья). Такой подход позволяет рассматривать различные по конструкции, элементной базе и по составу системы с единых позиций. Однако в дальнейшем на стадии предконструкторского синтеза в относительно узких областях техники, например, гидроавтоматики, тепловых двигателей, лопаточных машин и пр., эти методы не позволяют обоснованно выбрать и рассчитать параметры технических устройств. Они могут служить лишь начальным этапом для последующего практического синтеза устройств.

Пакет, позволяющий преодолеть указанные трудности, разработан на кафедре прикладной гидромеханики УГАТУ (свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610764 от 21.05.2002).

Учебный вариант пакета HYDROAUTOMAT размещен в подкаталоге HYDROBEZRAZ каталога TOOLBOX системы MatLAB. Основными вычислительными объектами этого пакета являются следующие объекты (классы):

- родительские: @DR_ (Дроссель); @Vc_ (Объем постоянный); @Vv_ (Объем переменный); @Kz_ (Колебательное звено);
- дочерние: @DR_RE (Дроссель с учётом режима течения, числа Рейнольдса); @DR_REG (Дроссель регулируемый); @DR_NSHN (Дроссель с учётом насыщения); @DR_VC_DR (Постоянный объем между дросселями); @DR_VV_DR (Переменный объем между дросселями); @DR_VV_DR2 (Два переменных объема между дросселями); @DR2_VC_DR (Два постоянных объема между дросселями); @MS1 ... MS14_ (Комбинации масс и пружин).

Р.А. Сунарчин