

УДК 629.7.027

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН

## РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СПАСЕНИЯ СПУСКАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается динамическое взаимодействие надувного средства спасения в виде двухмассовой системы, пневматически связанных между собой твердых тел, снабженной пневмоупругим основанием с нелинейным источником энергии. Описан эффект прыгающего движения двухмассовой системы тел с пневмоупругим основанием при динамическом взаимодействии с экраном. Исследована устойчивость движения рассматриваемой динамической системы. *Пневмоупругое основание; двухмассовая система; нелинейный источник энергии; отбор воздуха; средство спасения*

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что все спускаемые автоматические космические аппараты, которые используются при исследовании планет Солнечной системы, построены на традиционном поступательном принципе движения и поэтому имеют ограниченный радиус действия, вызванный низкой проходимостью аппарата по сильно пересеченной поверхности. Даже советские луноходы и американский марсоход, преодолевшие в общей сложности расстояние в несколько десятков километров, смогли детально исследовать лишь незначительные площади Луны и Марса. NASA решило изменить существующее положение вещей и профинансировать разработку так называемого «прыгающего» робота для Марса. Робот получил название «Frogbots», и его разработку ведет Калифорнийский технологический университет. За счет довольно сложной и оригинальной системы пружин робот сможет подпрыгивать вверх и в сторону (под углом 45 градусов). Приземлившись, в течение нескольких минут устройство восстанавливает свое первоначальное положение и вновь приводится в готовность к новому прыжку. В условиях земной гравитации высота «прыжка» составит 2,4 м, а на Марсе, где сила притяжения в три раза меньше, — до 7,2 м. Масса робота — 1,3 кг. Если разработка завершится успешно (пока создан только действующий макет), то NASA планирует отправить «Frogbots» на красную планету уже в 2006 г.

В процессе работы над перспективными средствами спасения авторами был обнаружен новый физический эффект авторегулирования давления в подкупольной полости

незамкнутых мягких оболочек при динамическом взаимодействии с экраном, что явилось основой для создания нового научного направления — пневмоупругости (рис. 1).

Пневмоупругость описывает изменение упругих свойств пневмокаркасных конструкций, изменяющих свою конфигурацию при динамическом нагружении вблизи экрана. Эффект авторегулирования давления в подкупольной полости мягких оболочек из анизотропного материала сопровождается ступенчатым изменением устойчивости формы оболочки при изменении давления во внутренних полостях как пневмокаркаса, так и в подкупольной полости при обжатии пневмооснования [1, 2].

В рамках научного направления авторами разработан численный алгоритм расчета упругой деформации конусообразных многополостных анизотропных мягких оболочек [3]. В процессе проведения исследований было показано, что эффект авторегулирования наблюдается и в сферообразных оболочках [4]. Использование в средствах спасения спускаемых объектов пневмоупругого основания, спроектированного с учетом выявленного физического эффекта авторегулирования давления, позволяет в 2–3 раза повысить эффективность надувного средства спасения (пневмоамортизатора) [5].

Проблема мягкой посадки спускаемых объектов на неподготовленные площадки приземления при ветровом сносе усложняется необходимостью учета режима контактного взаимодействия движущихся мягких надувных оболочек с подстилающей поверхностью произвольной формы. Контактное вза-



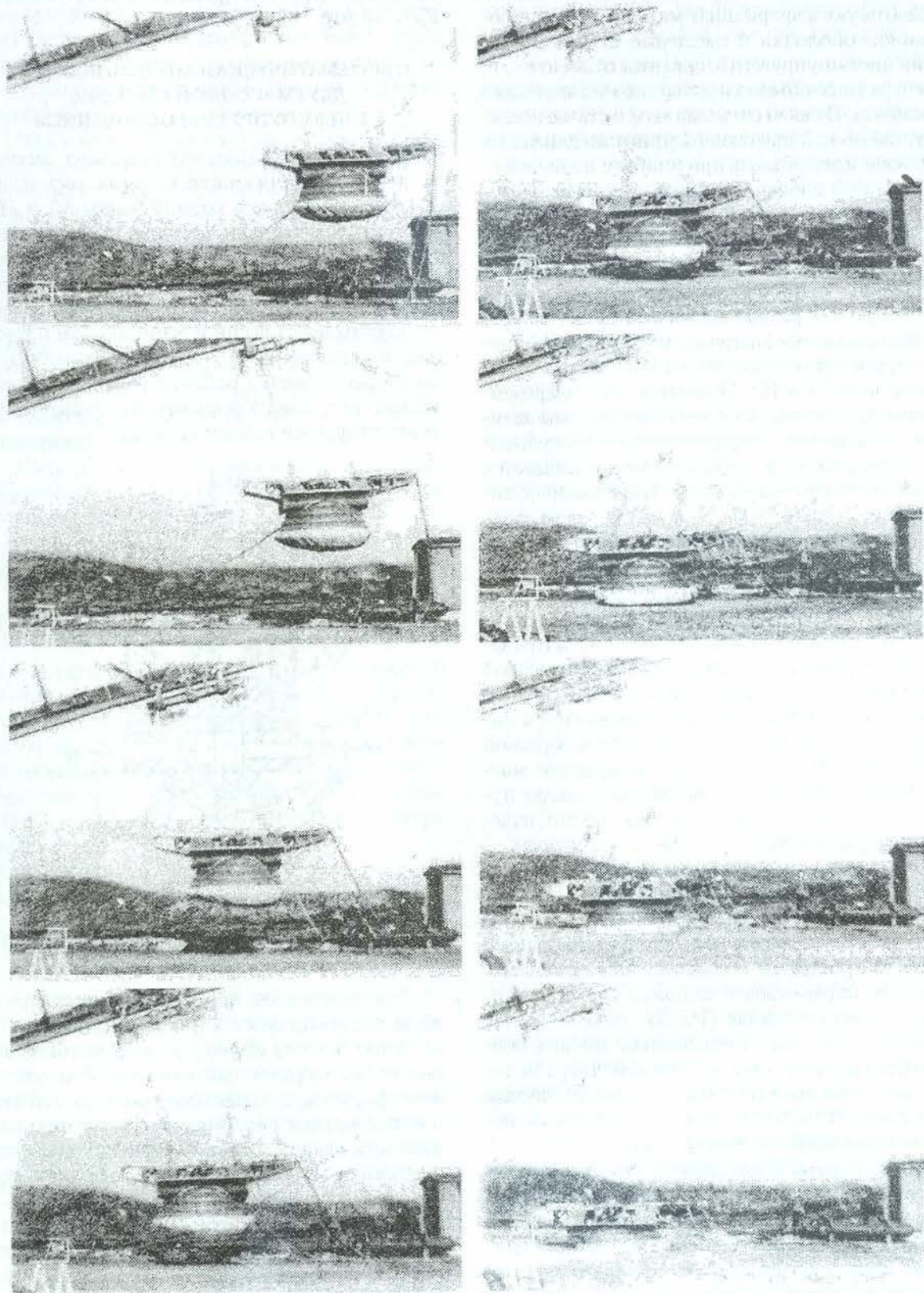


Рис. 1. Кинограмма посадки спускаемого объекта с надувным средством спасения

Уфимский государственный университет  
Институт физико-математических наук  
ЖИЛЕТОВ



имеет оболочку с экраном вызывает сдвиговую деформацию мягкой деформированной оболочки и смещение центра давления пневмоупругого основания относительно центра масс объекта и развитие пикирующего момента. В связи со сказанным в статье исследуется новый прыгающий принцип движения спускаемого объекта при пробеге по неподготовленной площадке приземления. Использование данного принципа позволит существенно расширить радиус применения и повысить «проходимость» спускаемых объектов.

Взаимодействие закрепленных на твердом теле сферообразных мягких оболочек с экраном, циклически нагружаемых в верхней точке траектории внешней силой, рассматривалось в работе [6]. Показано, что энергоемкость рассматриваемой пневмосистемы зависит от величины наддува внутренней полости и пневмокаркаса, а отскок системы задается импульсом внешней силы. Напряженное состояние мягких оболочек определяется только скоростью приземления тела.

Динамическое взаимодействие двухмассовой системы твердых тел, снабженной пневмоупругим основанием с нелинейным источником энергии вблизи экрана, рассматривалось в работе [7]. Введение двухмассовой системы предполагает двухэтапный подвод энергии к пневмоупругому основанию в виде мягкой пневмокаркасной сферообразной оболочки. На первом этапе нагружение мягкой сферообразной оболочки происходит путем обжатия ее энергией свободного падения двухмассовой системы, а на втором — происходит дожатие оболочки от нелинейного источника энергии, вводимого в работу в момент максимального обжатия оболочки на первом этапе нагружения. В данной работе проведены исследования газодинамических параметров и напряженно-деформированного состояния (НДС) сферообразных каркасированных трехслойных мягких оболочек, закрепленных на нижнем твердом теле двухмассовой системы, при динамическом взаимодействии системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана.

Результаты исследования динамики взаимодействия двухмассовой пневмоупругой системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана в условиях земного притяжения показали, что система совершает устойчивое и мягкое приземление с перегрузкой не более  $N_y = 10$  ед, а затем поступательное прыгающее движение с высотой отскоков порядка 3–5 м, при общей массе системы, равной

120 кг, и скоростях приземления  $V_y = 7$  м/с,  $V_x = 10$  м/с.

#### 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСАДКИ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ПНЕВМОУПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

В качестве объекта исследования рассматривается динамическая система, состоящая из двух твердых тел разной массы  $M_1$  и  $M_2$ , способных перемещаться друг относительно друга на общей оси. Нижнее твердое тело  $M_2$  снабжено пневмоупругим основанием, а верхнее твердое тело  $M_1$  кинематически связано с нижним через штангу длиной  $l_{шт}$  и приводится в движение от нелинейного источника энергии, причем рабочая (межпоршневая) камера последнего формируется указанными выше твердыми телами (рис. 2).

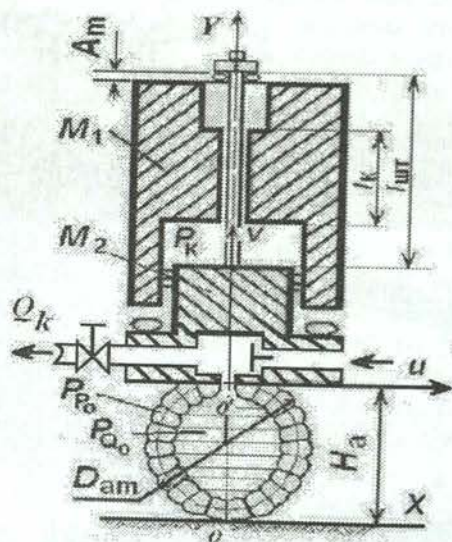


Рис. 2. Системы координат, принятые при построении модели

Пневмоупругое основание выполнено в виде сферообразных каркасированных трехслойных мягких оболочек, закрепленных на одном из твердых тел системы. Упругие и демпфирующие характеристики рассматриваемых мягких оболочек регулируются давлениями наддува секционирующих полостей среднего слоя  $P_{р0}$  и внутренней полости  $P_{в0}$  сферообразной оболочки. В начальный момент свободного полета двухмассовой системы мягкая сферообразная оболочка, закрепленная на нижнем теле, под действием начального распределения давлений находится в равновесном напряженно-деформированном состоянии.

При контактном взаимодействии с экраном мягкая оболочка сильно деформируется,



переходя в новое динамическое напряженно-деформированное состояние, и сжимает воздух, расположенный внутри нее. Далее, через отсечные клапаны часть сжатого воздуха перепускается из внутренней полости сферообразной оболочки в аккумулятор.

Наполнение аккумулятора начинается при контактном взаимодействии пневмоупругого основания с экраном и заканчивается после отрыва нижней кромки сферообразной оболочки от экрана. При этом рабочее тело, заключенное в основании, сжимается и аккумуляруется, таким образом обеспечивая продувку и подачу топливовоздушной смеси в межпоршневую камеру. Кроме того, при контактном взаимодействии с экраном системы твердых тел  $M_1$  и  $M_2$  с пневмоупругим основанием происходит сжатие рабочего тела в межпоршневой камере.

Сила давления, развиваемая в межпоршневой камере, с одной стороны, тормозит движение верхнего тела  $M_1$ , а с другой — обжимает через нижнее твердое тело  $M_2$  пневмоупругое основание или пневмоамортизатор (ПА).

Деформация ПА сопровождается ростом давления  $P_P$  в пневмокаркасе и во внутренней полости  $P_Q$  пневмоупругого основания и возникновением реакции в заделке мягкой оболочки ПА на нижнем теле  $M_2$  и подъемной силы на нижней поверхности тела  $M_2$ , которые тормозят его движение. При этом возможны различные сочетания взаимного перемещения и скоростей движения как отдельно каждого из твердых тел  $M_1$  и  $M_2$ , так и центра масс системы  $H_{цм}$  в целом.

В момент зануления разности скоростей взаимодействующих тел системы происходит воспламенение топливовоздушной смеси. При воспламенении смеси давление в межпоршневой камере начинает интенсивно расти, что ведет, с одной стороны, к увеличению степени обжатия пневмоамортизатора, а с другой — к разгону верхнего твердого тела  $M_1$ . Рассматриваемая система требует тщательного согласования пневможесткостей двух последовательно расположенных полостей (межпоршневой камеры и пневмоамортизатора), в которых происходит непрерывное изменение объема.

По мере расширения рабочего тела сила упругости пневмоамортизатора начинает превосходить силу давления отработанных газов на нижнее твердое тело, и оно начинает двигаться вверх, стремясь догнать верхнее тело  $M_1$ . Но, так как верхнее тело  $M_1$  имеет большую массу, оно движется быстрее и в конеч-

ном итоге при достижении штангой рабочего хода пульсатора  $L$ , заданного фиксатором, начинает тянуть за собой всю систему в целом.

Исследование НДС проведено для мягких сферообразных оболочек, входящих в состав пневмоупругого основания системы, причем наружный и внутренний слой этих оболочек образованы стенками торообразных поверхностей, расположенных по образующей сферы и соединенных между собой мягкими коническими мембранами. Мембраны выполнены из анизотропного материала, а их внутренняя полость образует средний, воздушный слой.

При построении математической модели динамического взаимодействия двухмассовой пневмосистемы с нелинейным источником энергии вблизи экрана использовались две системы координат: подвижная система, связанная с нижним твердым телом  $O'uv$ , и неподвижная система  $Oxy$ , связанная с экраном (рис. 2).

Уравнения движения колеблющейся двухмассовой системы запишутся в виде:

$$\begin{aligned}\ddot{\bar{R}}_1 &= \frac{1}{M_1}(\bar{F}_E + \bar{F}_B) + \bar{g}; \\ \ddot{\bar{R}}_2 &= \frac{1}{M_2}(\bar{F}_P + \bar{F}_C - \bar{F}_E - \bar{F}_B) + \bar{g}; \\ \ddot{\bar{r}} &= \frac{1}{\sigma}(\nabla T + \bar{P} + \bar{F}_G); \\ \dot{P}_i &= \frac{\gamma P_i}{\rho_i W_i} \left( \sum_k Q_{ik} - \rho_i \dot{W}_i \right),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $M_1$  — масса верхнего тела;  $M_2$  — масса нижнего тела;  $\sigma$  — поверхностная плотность материала пневмооснования;  $\bar{R}_1$ ,  $\bar{R}_2$  — радиусы-векторы положения центров масс тел;  $\bar{F}_E$  — сила, развиваемая нелинейным пульсатором;  $\bar{F}_B$  — сила взаимодействия с амортизаторами;  $\bar{r}$  — радиус-вектор, описывающий поверхность пневмооснования;  $P_i$ ,  $\rho_i$  — давление и плотность газа в  $i$ -м отсеке пневмооснования;  $Q_{ik}$  — массовый расход воздуха из  $i$ -й полости пневмооснования объема  $W_i$  в  $k$ -ю полость;  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $F_C$  — силы реакции пневмооснования;  $T$  — тензор мембранных усилий;  $p$  — плотность поверхностной нагрузки от сил давления;  $F_G$  — силы воздействия окружающих тел;  $F_P$  — поверхностные силы и момент силы давления газа на твердое тело;  $W_i$  — объем  $i$ -й полости пневмооснования;  $g$  — ускорение свободного падения.

Первое и второе уравнения системы (1) описывают колебательное движение рассма-



триваемого объекта в неподвижной системе координат, третье уравнение – поступательное движение мягкой оболочки. Четвертое уравнение описывает закон изменения состояния рабочего тела в полостях мягкой трехслойной оболочки при динамическом взаимодействии с окружающей средой. Пневмоконструкция аппроксимируется распределенным в пространстве набором  $N \times m$  точек-узлов, в которых сосредоточена ее масса. Узлы связаны между собой упругими и демпфирующими силами – аналогами реальных усилий, развиваемых при обжатии рассматриваемой пневмоконструкции. Взаимодействие выделенных элементов между собой возникает при сильной деформации пневмоконструкции в зонах складкообразования, а также когда одна стенка мягкой оболочки касается другой.

Уравнения движения мягкой сферообразной каркасированной оболочки записываются в виде системы дифференциальных уравнений движения узлов сети:

$$\begin{aligned} m_{mj}(\ddot{u}_{mj} + \ddot{x}) + C_a(\dot{u}_{mj} + \dot{x}) + \\ + C_r(2\dot{u}_{mj} - \dot{u}_{m,j-1} - \dot{u}_{m,j+1}) = F_{u_{mj}}(u, v); \\ m_{mj}(\ddot{v}_{mj} + \ddot{y} + g) + C_a(\dot{v}_{mj} + \dot{y}) + \\ + C_r(2\dot{v}_{mj} - \dot{v}_{m,j-1} - \dot{v}_{m,j+1}) = F_{v_{mj}}(u, v), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\ddot{u}_{mj}$ ,  $\ddot{v}_{mj}$ ,  $\dot{u}_{mj}$ ,  $\dot{v}_{mj}$  – соответственно проекции ускорений и скоростей  $j$ -й точки  $m$ -го сечения ПК в системе координат  $O'uv$ ;  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  – проекции ускорения и скорости спускаемого объекта в системе координат  $Oxy$ , причем ось  $Oy$  совпадает по направлению с осью  $O'uv$ ;  $C_a$  – коэффициент демпфирования по абсолютной скорости точек,  $C_r$  – коэффициент демпфирования по скорости соседних точек каркаса друг относительно друга, который вводится для исключения высокочастотных осцилляций точек расчетной сетки (коэффициент диссипации энергии в тканом материале, из которого изготовлена оболочка);  $m_{mj}$  – масса выделенного элемента мягкой оболочки.

Проекции сил, действующих в узлах  $m$ ,  $j$ , в общем случае имеют вид

$$\begin{aligned} F_{\xi_{m,j}} = T_{\xi_{m,i-1,j}}^M + T_{\xi_{m,i,j}}^M + T_{\xi_{i,p-1,j}}^P + \\ + T_{\xi_{i,p,j}}^P + F_{\xi_{m,j}}^N + T_{\xi_{m,j}}^B, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\xi$  – обобщенная координата ( $\xi \Rightarrow u, v$ );  $T_{\xi_{m,i-1,j}}^M$ ,  $T_{\xi_{m,i,j}}^M$  – проекции результирующих меридиональных сил натяжения,

действующих на  $(m, j)$ -й узел со стороны  $(m, i-1)$ -го и  $(m, i)$ -го отрезков;  $T_{\xi_{i,p-1,j}}^P$ ,  $T_{\xi_{i,p,j}}^P$  – проекции широтных сил, действующих на  $(m, j)$ -й узел со стороны  $(m, i, p-1)$ -го и  $(m, i, p)$ -го широтных отрезков;  $F_{\xi_{m,j}}^N$  – нормальная сила при взаимодействии участка поверхности с  $j$ -м узлом с экраном;  $T_{\xi_{m,j}}^B$  – штрафующие силы при взаимном проникновении узлов и элементов пневмоконструкции.

Соотношение между натяжениями  $T_i$  и перемещениями узлов расчетной сетки задается в форме закона Гука  $T_i = E_i \varepsilon_i$ , где  $E_i$  – погонный модуль упругости сети.

Деформация элемента определяется из соотношения  $\varepsilon_i = 1 - l_{mj}/l_{mj_0}$ , где  $l_{mj_0}$  и  $l_{mj}$  – начальная и конечная длина  $i$ -го элемента сети. Конечная длина элемента определяется выражением

$$l_{mj}^2 = (u_{mj} - u_{mj+1})^2 + (v_{mj} - v_{mj+1})^2.$$

При описании граничных условий в областях крепления мягкой оболочки к нижнему твердому телу, а также при ее взаимодействии с экраном и контактирующими между собой участками мягкой оболочки вводятся локальная система координат  $O_1x'y'$ , в которой осуществляется проверка всех узлов расчетной сетки в радиальном сечении на непроникновение через каждый из элементов сети и характерный параметр  $\tilde{E}$ , ограничивающий расстояние, на которое узел может приблизиться к элементу сетки.

Условия непроникновения  $j$ -го узла сквозь отрезок при этом записываются в виде  $y'_i - \tilde{E} > 0$  при  $y'_i > \tilde{E}$  и  $y'_i - \tilde{E} < 0$  при  $y'_i < \tilde{E}$ , где  $y'_i$  – ордината узла в собственной системе координат элемента сетки.

При невыполнении этих условий на узел по нормали к элементу действует некоторая штрафующая сила  $T^B$ , равная

$$T^B = \begin{cases} A \left| \frac{y'_i - \tilde{E}}{2\tilde{E}} \right| & \text{при } y'_i < \tilde{E}; \\ 0 & \text{при } y'_i > \tilde{E}, \end{cases} \quad (4)$$

где величина  $\tilde{E}$  и коэффициент  $A$  подбираются из численного эксперимента таким образом, чтобы исключить случаи проникновения узла сквозь элемент сетки.

На мягкую каркасированную оболочку накладываются следующие граничные условия:



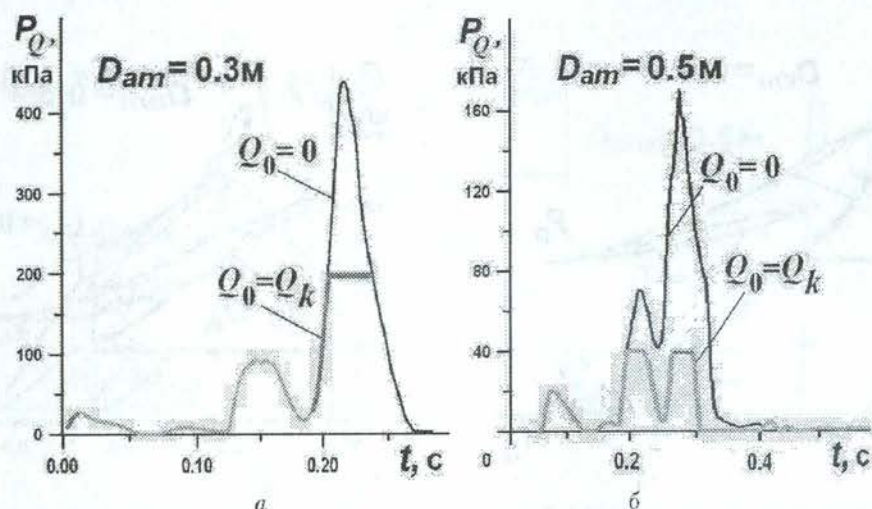


Рис. 3. Изменение давления во внутренней полости пневмооснования

• в местах крепления оболочки к нижнему твердому телу:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y_N = y_0; & \dot{y}_1 &= \dot{y}_N = V_{y0}; \\
 v_1 &= v_N = 0; & \dot{v}_1 &= \dot{v}_N = 0; \\
 x_1 &= x^0; & x_N &= x_N^0; & \dot{x}_1 &= \dot{x}_N = 0; \\
 u_1 &= x^0; & x_N &= x_N^0; & \dot{u}_1 &= \dot{u}_N = 0;
 \end{aligned} \quad (5)$$

• в нижних узлах внутренней и внешней оболочки каркаса с  $N=2l+1$  элементами расчетной сети, разбитой по  $k$  элементов на одну дугу тора:

$$u_{l-k} = u_{l-k}^0; \quad u_{l+k} = u_{l+k}^0. \quad (6)$$

Граничные условия предполагают, что нижние узлы мягкой оболочки должны дви-

гаться только вертикально на выбранном расстоянии от центральной оси, так как соединены коническими мембранами. Последнее допущение позволяет избежать особенностей по широтным натяжениям, которые возникают в полюсных точках  $l-k$  и  $l+k$  на поверхности рассматриваемых мягких оболочек.

Система уравнений (1)–(4) с учетом граничных условий (5)–(6) решается методом Рунге–Кутты четвертого порядка. В качестве начальной формы мягкой оболочки принимается форма при  $P_Q = P_{Q0}$  и  $P_P = P_{P0}$ .

В качестве примера программной реализации поставленной задачи рассматривается динамическое взаимодействие надувного средства спасения массой  $M = 120$  кг, в начальный момент падающей на экран с высо-

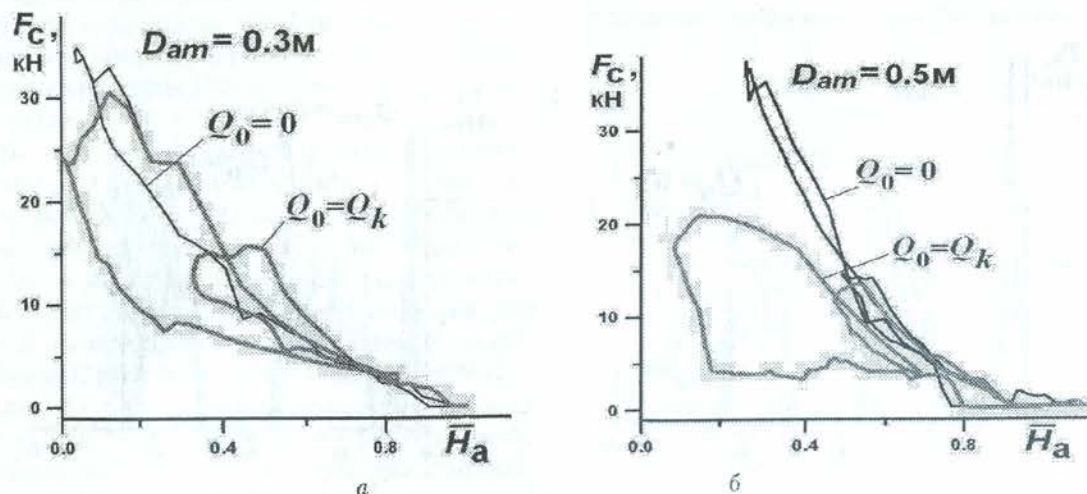


Рис. 4. Упругие характеристики надувного средства спасения



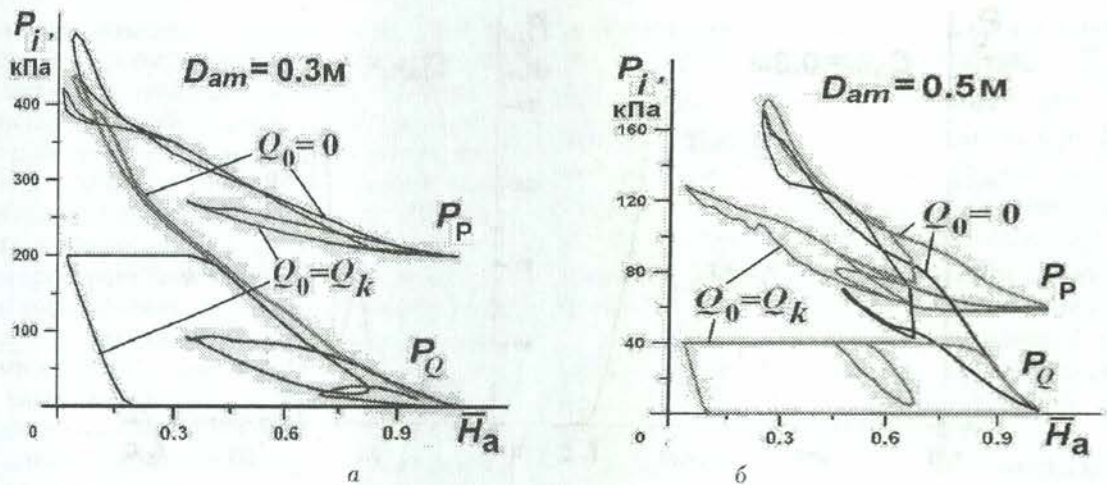


Рис. 5. Изменения давлений в полостях пневмоупругого основания

ты  $H_{сбр} = 1,2$  м, снабженной пневмоупругим основанием в виде многополостных сферообразных оболочек с диаметрами, равными  $D_{ам} = 0,3$  и  $0,5$  м и закрепленными на нижнем твердом теле. Мягкие оболочки нагружены внутренним давлением  $P_{P_0}$  и  $P_{Q_0}$  и изготовлены из анизотропного материала с погонными модулями упругости в широтном и меридиональном направлениях равными  $E_s = E_m = 0,5 \cdot 10^6$  Н/м (рис. 2). Законы регулирования давления во внутренней полости сферообразной оболочки, обеспечиваемые отсечными клапанами при динамическом взаимодействии, приведены на рис. 3.

Основным параметром пневмооснования является упругая характеристика — зависимость силы упругости  $F_E$  от степени обжатия пневмооснования  $\bar{H}_a = y_2/H_a$  [2]. Упругие характеристики надувного средства спасения, принятые в исследовании, приведены на

рис. 4, а, б. Видно, что все приведенные характеристики имеют нелинейный вид и включают гистерезисные процессы, вызванные силами демпфирования движения двухмассовой системы на прямом и обратном ходе обжатия пневмоупругого основания.

Параметрические исследования показали, что упругая характеристика надувного средства существенно зависит от степени отбора воздуха из внутренней полости сферообразной оболочки.

С уменьшением диаметра оболочки влияние степени отбора воздуха на жесткость пневмооснования становится менее заметным. При этом диапазон обжатия мягкой оболочки существенно снижается из-за вероятности «пробоя» пневмооснования.

Сравнительный анализ выявил основные отличия динамических режимов при взаимо-

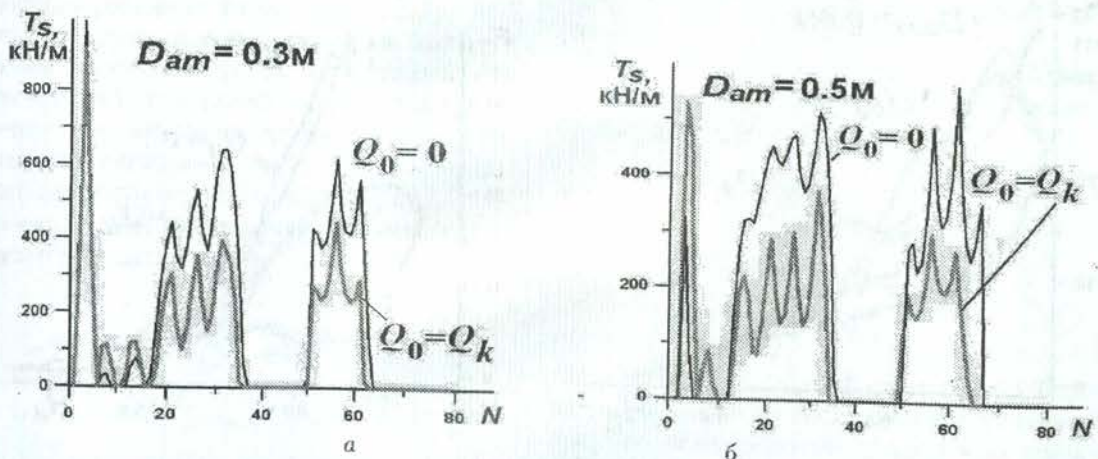


Рис. 6. Эпюры широтных натяжений при максимальном обжатии пневмооснования



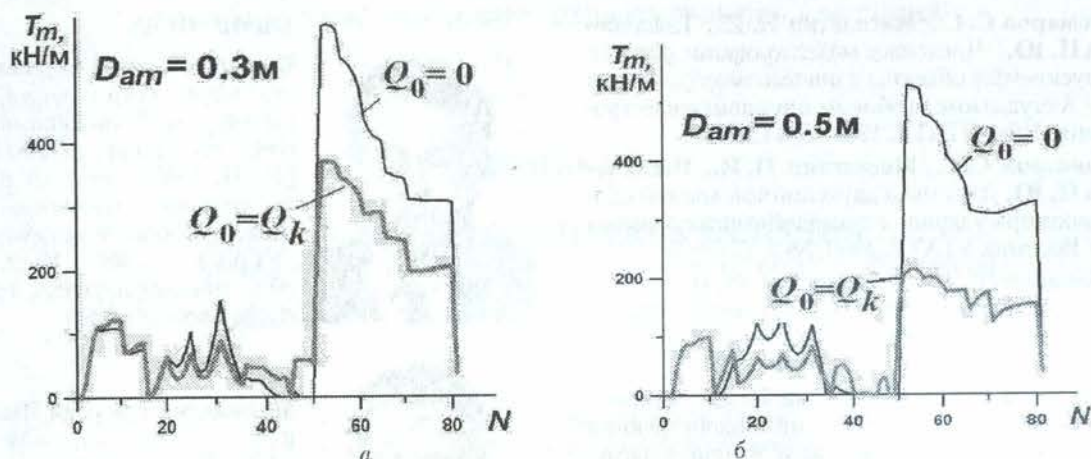


Рис. 7. Эпюры меридиональных натяжений при максимальном обжатии пневмооснования

действию с экраном оболочек разного диаметра с рассматриваемыми схемами массообмена в подкупольной полости. Эти отличия заложены в путях преобразования энергии колеблющихся пневмосистем.

Оболочки с отбором воздуха при динамическом взаимодействии с нелинейным источником энергии ввиду интенсивного демпфирования, вызванного сбросом давления из подкупольной полости в окружающую среду, обеспечивают более эффективную передачу энергии на верхнее тело.

Энергия падающей на твердый экран двухмассовой системы аккумулируется в виде потенциальной энергии сжатого рабочего тела (воздуха) при обжатии мягкой оболочки и энергии упругой деформации обжатого пневмокаркаса, затем к ней добавляется энергия расширения в межпоршневой камере продуктов сгорания топливовоздушной смеси, и далее происходит срабатывание этой энергии при отскоке системы. Количественно соотношения указанных энергий для мягких оболочек в рассматриваемых процессах представлены на рис. 5.

В качестве условий, ограничивающих энергоемкость рассматриваемых пневмосистем, принимаются: прочность анизотропного материала, из которого изготовлена мягкая оболочка, и уровень перегрузки  $N_y$ , развиваемой в центре масс рассматриваемой системы при динамическом взаимодействии с нелинейным источником энергии вблизи экрана.

Анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемых оболочек при ударном нагружении показал, что при динамическом взаимодействии двухмассовой системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана в них происходят значитель-

ные изменения натяжений. На рис. 6 и 7 приведены распределения натяжений по узлам разбиения в широтном и меридиональном направлениях.

Видно, что меридиональные натяжения интенсивно меняются по узлам: от наименьшего в центре зоны контакта до максимального в заделке оболочки на нижнем твердом теле, а изменение широтных натяжений носит монотонный характер с максимумом в диаметральной части мягкой оболочки. После отскока и при дальнейшем движении пневмосистемы натяжения в ней меняются незначительно и колеблются вокруг значений, соответствующих статическому напряженно-деформированному состоянию. Проведенные исследования позволили выявить основные особенности колебательных процессов рассматриваемых двухмассовых систем с различными схемами массообмена в подкупольной полости пневмоупругих оснований при циклическом нагружении вблизи экрана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвилева Н. Ю. Динамика формирования мягких конусообразных пневмокаркасных оболочек при взаимодействии с экраном // Проектирование и расчет конструкций из мягких оболочек. Владивосток: ДВГМА, 1994. С. 63–85.
2. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Глобус И. Ю., Юдин В. Ф. Оптимизация диаграммы работы амортизатора посадочного устройства для спускаемых объектов // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: Межвуз. науч. сб. Уфа, 2000. Вып. 18. С. 15–30.



3. **Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю.** Численное моделирование посадки спускаемых объектов с пневмоамортизатором // Актуальные проблемы авиадвигателестроения. Уфа: УГАТУ, 1999. С. 415–435.
4. **Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю.** Динамика двухслойной мягкой оболочки при ударном взаимодействии с экраном // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 69–76.
5. **Комаров С. С., Мискактин Н. И.** Анализ эффективности пневмоупругих систем при посадке спускаемых объектов // Вестник УГАТУ. 2002. Т. 3, № 2. С. 179–186.
6. **Комаров С. С., Мискактин Н. И.** Взаимодействие сферообразных пневмоконструкций с экраном при циклическом ударном нагружении // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. 2004. № 20. С. 343–356.
7. **Komarov S. S., Miskaktin N. I.** Computer modeling of impact interaction with screen of double-mass solid system // Proc. of the 5th Int. Wordshop on Computer Science and Information Technologies CSIT 2003. Ufa, Russia, 2003. P. 115–117.



#### ОБ АВТОРАХ

**Комаров Сергей Сергеевич**, ст. науч. сотр., рук. СКБ авиац. устройств. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. пневмоупругости трапспортных систем.



**Мискактин Николай Иванович**, ст. науч. сотр. того же СКБ. Дипл. физик-теоретик (БГУ, 1976). Канд. техн. наук по проектированию и конструкциям судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1987). Иссл. в обл. теории оболочек и газовой динамики.